



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
FACOLTÀ DI SCIENZE POLITICHE

Dottorato di Ricerca in Storia Internazionale
(Metodi di Elaborazione Multimediale)
Ciclo XXIII

Tesi di Dottorato di Ricerca

**Esperimenti di *ether-drift* nel XX secolo.
Casi storici a confronto: Effetto Sagnac (Francia,
1913) ed Esperimenti di Miller (USA, 1921-26).**

FIS/08
M-STO/05

Candidato: Roberto Lalli
Matr.: R07487

Tutor: Chiar.mo Prof. Pasquale Tucci

Coordinatore: Chiar.mo Prof. Pasquale Tucci

Anno Accademico 2009/2010

Indice

Cap. 1.	Note introduttive	p. 1
1.1.	Introduzione	p. 1
1.2.	Il problema dell'etere alla fine del XIX secolo e le origini della teoria della relatività ristretta	p. 9
1.3.	Il rapporto tra teoria ed esperimento nella storia della teoria della relatività	p. 12
1.4.	I contesti nazionali nella storia dell'accettazione della teoria della relatività	p. 15
1.5.	Relazioni tra filosofia della scienza e storia della teoria della relatività	p. 19
1.6.	Il problema delle fonti	p. 21
1.7.	Ringraziamenti	p. 25
Cap. 2.	Immagini storiografiche	p. 29
2.1.	Introduzione	p. 29
2.2.	Filosofia della scienza: il caso Miller	p. 31
	2.2.1. <i>Premessa</i>	p. 31
	2.2.2. <i>Popper</i>	p. 31
	2.2.3. <i>Polanyi</i>	p. 33
	2.2.4. <i>Lakatos</i>	p. 38
	2.2.5. <i>Feyerabend</i>	p. 41
	2.2.6. <i>Zahar</i>	p. 44
	2.2.7. <i>Laymon</i>	p. 46
	2.2.8. <i>Conclusioni</i>	p. 50
2.3.	Libri di testo	p. 52
	2.3.1. <i>Premessa</i>	p. 52
	2.3.2. <i>Gli esperimenti di Miller</i>	p. 53
	2.3.3. <i>Effetto Sagnac</i>	p. 57
	2.3.4. <i>Conclusioni sulla storia implicita nei libri di testo</i>	p. 57

2.4.	Biografie di Einstein	p. 59
	2.4.1. <i>Premessa</i>	p. 59
	2.4.2. <i>Miller</i>	p. 59
2.5.	Letteratura anti-relativista	p. 62
2.6.	Storia esplicita	p. 67
	2.6.1. <i>Il caso Miller nei trattati di storia</i>	p. 67
	2.6.2. <i>L'effetto Sagnac nei resoconti storici</i>	p. 76
2.7.	Conclusioni	p. 84
Cap. 3	Premessa storica: l'etere luminifero nel XIX secolo	p. 87
3.1.	Introduzione	p. 87
3.2.	Esperienza di Bradley - La scoperta dell'aberrazione stellare (1728 ca.)	p. 89
3.3.	Teoria dell'etere luminifero stazionario	p. 93
3.4.	Il coefficiente di trascinamento di Fresnel	p. 97
3.5.	La teoria dell'etere trascinato di Stokes	p. 102
3.6.	L'esperimento di Fizeau	p. 107
3.7.	Teorie sull'impossibilità di osservare effetti ottici al primo ordine di $\frac{v}{c}$: Velmann, Mascart e Potier	p. 113
3.8.	Etere elettromagnetico	p. 118
3.9.	Esperimenti di Michelson e Morley	p. 123
3.10.	La teoria dell'etere di Lorentz e la contrazione di Lorentz-Fitzgerald	p. 136
3.11.	Altri esperimenti ottici di <i>ether-drift</i>	p. 141
3.12.	Lorentz e Poincaré	p. 144
3.13.	Esperimenti elettromagnetici di <i>ether-drift</i> (1902-04)	p. 153
3.14.	Le teorie di Lorentz, Poincaré ed Einstein (1904-5)	p. 155
3.15.	La teoria della relatività generale e la conferma di Eddington della deflessione dei raggi di luce (1919)	p. 161
3.16.	Conclusioni	p. 166

Cap. 4	L'effetto Sagnac: i predecessori, la scoperta e la relazione con la teoria della relatività nella Francia degli anni '20	p. 169
4.1.	Introduzione	p. 169
4.2.	L'esperimento di Sagnac del 1913	p. 172
4.3.	Predecessori	p. 178
4.4.	Georges Sagnac: teoria ottica, ricerche sperimentali ed interpretazione dell'effetto (1899-1914)	p. 182
4.5.	Perché Sagnac fu il primo a sperimentare l'effetto?	p. 189
4.6.	Accoglienza ed accettazione dell'effetto in Francia negli anni successivi alla scoperta	p. 192
	4.6.1. <i>Il contesto culturale francese</i>	p. 192
	4.6.2. <i>Georges Sagnac e la comunità accademica francese tra il 1914 e il 1921</i>	p. 193
	4.6.3. <i>La derivazione relativistico-generale di Langevin</i>	p. 200
	4.6.4. <i>Nazionalismo e antisemitismo</i>	p. 204
	4.6.5. <i>La caduta di Sagnac</i>	p. 207
4.7.	Conclusioni	p. 209
Cap. 5	Miller e gli esperimenti di <i>ether-drift</i> in USA (1902-1933)	p. 211
5.1.	Introduzione	p. 211
5.2.	Esperimenti di Morley-Miller (1902-1906)	p. 214
5.3.	Le prime osservazioni di Miller al <i>Mount Wilson Observatory</i> (1921)	p. 217
	5.3.1. <i>La preparazione</i>	p. 217
	5.3.2. <i>I primi esperimenti al MWO nell'aprile 1921 e la reazione di Einstein</i>	p. 219
	5.3.3. <i>Le osservazioni del dicembre 1921 al MWO</i>	p. 224
5.4.	Le ricerche di Miller a Cleveland (1922-24)	p. 226
5.5.	Il risultato positivo di Miller e la prima fase del dibattito (1924-26)	p. 234
	5.5.1. <i>L'annuncio del risultato positivo al convegno della NAS (aprile 1925)</i>	p. 234

5.5.2.	<i>Il dibattito successivo al convegno</i>	p. 237
5.5.3.	<i>La conferma del risultato positivo al convegno della AAAS (dicembre 1925)</i>	p. 243
5.6.	La reazione ai risultati di Miller	p. 249
5.6.1.	<i>La campagna stampa</i>	p. 249
5.6.2.	<i>Il dibattito teorico nel 1926</i>	p. 251
5.7.	Le altre ripetizioni dell'esperimento MM e il ruolo di Michelson (1926-30)	p. 259
5.7.1.	<i>L'esperimento di Piccard sul pallone aerostatico in Europa (1926)</i>	p. 259
5.7.2.	<i>Gli esperimenti MM del Caltech (1926-27)</i>	p. 261
5.7.3.	<i>Il ruolo di Milchelson</i>	p. 265
5.8.	Il definitivo rigetto dei risultati di Miller negli anni '30	p. 279
5.9.	Conclusioni	p. 284
Cap. 6	La nuova analisi di Shankland dei dati di Miller	p. 287
6.1.	Introduzione	p. 287
6.2.	La relazione tra Miller e Shankland (1934-41)	p. 289
6.3.	La prima fase del lavoro di Shankland sui dati di Miller (1950-52)	p. 292
6.4.	I cambi di argomentazione e la pubblicazione dell'articolo (1952-55)	p. 298
6.5.	L'accoglienza dell'articolo presso la comunità scientifica	p. 306
6.6.	Conclusioni	p. 309
Conclusioni		p. 311
Bibliografia		p. 319

Capitolo 1

Note introduttive

1.1. Introduzione

Una parte minoritaria della comunità scientifica contesta la validità della teoria della relatività, sia ristretta, sia generale, sulla base di alcuni esperimenti ottici della prima metà del secolo XX che furono interpretati dai loro autori come prova dell'esistenza di un moto rispetto all'etere, inteso come sostegno delle onde di luce. L'esistenza di questa esigua percentuale di scienziati è una costante che ha esempi lungo tutto l'arco del XX secolo ed è caratterizzata dall'utilizzo di medesimi argomenti e dalla credenza nell'esistenza dell'etere.

Secondo questi fisici, che definirò anti-relativisti, alcuni esperimenti costituirebbero anomalie all'interno del quadro teorico relativista rispetto ai due principi alla base della teoria della relatività ristretta: il principio di relatività rispetto a tutte le leggi della fisica (Principio I) e il principio dell'indipendenza della velocità della luce nel vuoto dal moto della sorgente (Principio II). Si tratta degli esperimenti di Dayton Clarence Miller (1866-1941) condotti a Mount Wilson (California) tra il 1921 e il 1926, e degli esperimenti che hanno portato alla scoperta dell'effetto Sagnac da parte di Georges M. M. Sagnac (1869-1926), compiuti a Parigi nel 1913.

Miller e Sagnac sono accomunati dal non aver mai accettato le teorie della relatività e dall'aver creduto nella possibilità di ripristinare una comprensione dei fenomeni ottici basata sull'esistenza di un etere luminifero che Einstein aveva posto fuori dall'ambito della ricerca scientifica nel 1905 con l'esplicita frase: “*Die Einführung eines 'Lichtäthers' wird sich insofern [...] überflüssig erweisen*”.¹

Nell'immensa bibliografia sulla storia della relatività esiste una quantità non irrilevante di riferimenti a tali lavori. Alcuni studi storici approfondiscono specificamente l'uno o l'altro

¹ Einstein, A. (1905) “Zur Elektrodynamik bewegter Körper”, *Annalen der Physik*, 17 (1905): 891-921, p. 892. La traduzione italiana è “l'introduzione di un 'etere luminifero' si dimostrerà superflua” in Stachel, J. (ed.) (2001) *L'anno memorabile di Einstein: I cinque scritti che hanno rivoluzionato la fisica del Novecento* (Bari: Dedalo, 2001), p. 134.

di tali esperimenti, ma la quasi totalità di questi studi ha un inquadramento teorico ben determinato; essi sono scritti da fisici che avevano il fine principale d'interpretare tali risultati sperimentali e sono, quindi, viziati da una visione preconstituita sulla loro importanza e/o sul loro significato. Questo risulta vero qualunque sia la posizione del fisico autore di tali studi, anti-relativista o relativista che sia.

Gli altri studi storici, che non si riferiscono alla polemica teorico-interpretativa, approfondisco alcuni dati parziali della storia di tali esperimenti, ma nessuno di questi mette in relazione tali eventi storici tra loro e in un contesto adeguato, ossia quello della ricezione e comprensione delle teorie di Einstein nella prima metà del secolo XX all'interno delle rispettive comunità scientifiche nazionali. Mi ripropongo, con questa ricerca, di colmare tale lacuna storiografica, compiendo un lavoro sia di revisione dei dati storici delle fonti secondarie, sia di approfondimento e re-interpretazione delle fonti primarie scevra da qualsiasi teoria preconstituita sul loro significato fisico. Con il mio studio intendo affrontare il rapporto delle comunità scientifiche nazionali con tali esperimenti dalla loro esecuzione fino al momento in cui la questione da questi posta venne considerata risolta, ovvero fino al momento in cui la quasi totalità di tali comunità smise di considerare i loro risultati un problema per la teoria della relatività ristretta.

Tale scelta implica una diversità del termine superiore nei due casi perché, come si vedrà, l'effetto Sagnac ebbe una conclusione accettabile già negli anni '20 in Francia, mentre per gli esperimenti di Miller si considera come termine superiore la pubblicazione di un articolo di Robert S. Shankland (1908-1982) e dei suoi collaboratori nel 1954 e le successive reazioni a questo. Tale articolo è, nella storia che chiamerò "standard", la conclusione del caso, in quanto propone una spiegazione accettabile dell'effetto trovato da Miller senza nessuna contrapposizione con la teoria della relatività ristretta.²

Considerando le definizioni di Helge Kragh di "storia orizzontale", ossia "lo studio dell'evoluzione nel tempo di un argomento dato, molto specifico"³ e "storia verticale" "dove la scienza in *focus* è vista come un semplice elemento della vita culturale e sociale del tempo che non può essere isolato dagli altri dello stesso periodo"⁴, il mio lavoro di ricerca consisterà di una parte orizzontale basata, principalmente, sulla letteratura scientifica del

² Shankland, R. S. (1955) "New Analysis of the Interferometer Observations of Dayton C. Miller", *Reviews of Modern Physics*, 27 (1955): 167-78.

³ Kragh, H. (1987) *An Introduction to the Historiography of Science* (Cambridge: Cambridge University Press, 1987); versione utilizzata trad. it. *Introduzione alla Storiografia della Scienza* (Bologna: Zanichelli, 1990), p. 8.

⁴ Kragh (1990), *op. cit.*, pp. 89-90.

XX secolo dei casi trattati, e di una più approfondita parte verticale, corrispondente alla situazione storica nel momento in cui Sagnac e Miller compiono le proprie ricerche e le reazioni delle comunità scientifiche nazionali a cui appartennero.

Come vedremo, lo studio approfondito della sezione “verticale” della presente tesi porterà nuova luce sull’indagine storiografica “orizzontale” che, nell’affrontare specifici casi scientifici, non riesce a considerare elementi storici, non prettamente scientifici, che influirono profondamente sul comportamento delle comunità scientifiche.

Nella struttura orizzontale di questa tesi il limite superiore scelto sfiora, nel caso di Miller, il dibattito contemporaneo; procedimento che trovo adeguato perché:

Non esiste un limite superiore naturale per la storia della scienza; benché, tradizionalmente, la storia abbia a che fare con il passato, è difficile trovare argomenti convincenti per cui il presente non sia passibile di trattamento storico. In effetti, recentemente, si è andata sviluppando la tendenza a considerare dal punto di vista storico, anche attività scientifiche molto recenti o contemporanee.⁵

Per quanto concerne l’inquadramento generale in cui inserire i casi trattati, esso dipende dal punto di partenza storiografico espresso all’inizio del presente paragrafo inerente al dibattito contemporaneo sulla relatività.

Gli esperimenti ottici e le ricostruzioni teoriche di Miller e Sagnac sono, quindi, visti come parte integrante della storia della ricezione delle teorie della relatività nel legame che questa ebbe con la storia del concetto di etere luminifero nel XIX secolo e degli esperimenti di *ether-drift* (vento d’etere). Inquadrerò, quindi, i casi scelti in tale ambito ampiamente studiato dagli storici contemporanei e, per far ciò, partirò da alcune ipotesi storiografiche che renderò palesi in questo e nei prossimi paragrafi.

Alcune di tali ipotesi storiografiche sono implicite nella stessa scelta dell’argomento di tesi. Molti storici, fisici e filosofi della scienza, infatti, si sono occupati della storia della relatività da diverse prospettive approfondendo determinati ambiti che toccano il soggetto della presente tesi in diversi modi, che possono essere schematizzati in:

- a) origini e nascita della teoria della relatività ristretta;

⁵ Kragh (1990), *op. cit.* p. 32.

- b) creazione della teoria della relatività generale;
- c) storia dell'accettazione della relatività a partire dal 1905;
- d) la vita, il pensiero, l'opera scientifica e filosofica di Albert Einstein.

I primi tre punti hanno una netta separazione temporale e storiografica, ma il punto d) ha forti punti d'intersezione con gli altri. È, infatti, comprensibile che in molti articoli o libri appartenenti al punto d), gli autori discutano e facciano affermazioni storiografiche sugli altri punti. Questo perché la storia della teoria della relatività è indissolubilmente legata, dall'*annus mirabilis* in poi, alla figura di Albert Einstein come risulta palese dalla letteratura a lui dedicata.

Questo punto è di non poca rilevanza in questa tesi e nella storia della fisica. Il programma di ricerca relativista non fu certo sviluppato dal solo Einstein, ma è premessa fondamentale di questa tesi che la storia dell'accettazione delle teorie relativiste venga sovrapposta alla storia dell'accettazione delle "teorie di Einstein", come spesso esse venivano chiamate negli anni '20.

Altra premessa fondamentale è che negli anni '20 ci si riferì spesso alla teoria della relatività senza distinzioni tra la teoria della relatività ristretta o generale. Questa situazione porta a considerare l'esistenza di una "*relativity revolution*", che aveva portato all'introduzione di nuovi concetti fondamentali di "*space, time, matter and radiation*" nel 1905 e che fu completato nel 1915 con la creazione della teoria della relatività generale.⁶ Nel corso della presente tesi mi riferirò a questo processo col nome di relatività, mentre distinguerò tra relatività ristretta e generale ogniqualvolta il contesto teorico permetterà questo passaggio ad una specifica teoria.

La storia, o piuttosto le "due storie in relazione", che qui mi propongo di approfondire appartengono senza dubbio al contesto dell'accettazione: sarà questo l'ambito principale delle fonti primarie e secondarie prese in considerazione. Per le fonti secondarie recherò tutti gli ambiti in cui i casi scelti sono stati utilizzati a titolo di esempio, in particolare la filosofia della scienza.

⁶ Renn, J. (2004) "The Relativity Revolution from the Perspective of Historical Epistemology", *Isis*, 95 (2004): 640-48, p. 648.

Hanson afferma che “*philosophy of science without history of science is empty; history of science without philosophy of science is blind*”.⁷ Questo è vero per la storia della fisica in generale, ma ancor più nel caso degli esperimenti di Sagnac e di Miller è necessario considerare gli aspetti epistemologici nel loro sviluppo storico: le teorie della relatività scatenarono un enorme dibattito fisico, epistemologico e metafisico in merito alla loro interpretazione. Lo studio storico scelto dovrà per forza di cose riferirsi alla prassi della comunità scientifica e al suo impianto metodologico. Diverranno, quindi, elementi centrali della mia discussione alcune caratteristiche della storia dell’interpretazione della relatività e l’analisi della prassi metodologica dei fisici presi in considerazione. Questo anche perché gli esperimenti studiati, quelli di Miller in particolare, sono citati da alcuni filosofi della scienza come esempio di una particolare tesi epistemologica. Ritengo, perciò, interessante chiarire al meglio delle fonti disponibili il contesto storico e teorico, le prefigurazioni personali, le relazioni con le rispettive comunità accademiche dei fisici che compirono tali esperimenti, quali furono le reazioni delle comunità accademiche nazionali a questi, quanto questo processo sia ascrivibile ad una particolare metodologia e quale fu il rapporto di Einstein con tali esperimenti.

Come data di nascita della teoria della relatività ristretta pare naturale riferirsi alla pubblicazione dell’articolo di Einstein “Zur Elektrodynamik bewegter Körper” nel 1905.⁸ Si è considerato questo un punto di cesura, piuttosto che di continuità, rispetto alle ricerche precedenti in quanto creatore di due posizioni antagoniste che sono evidenziabili lungo tutto il secolo XX: da un lato i sostenitori della relatività, dall’altro gli anti-relativisti. Nel compiere questa riduzione si fa senza dubbio una forzatura, ma si rende evidente l’importanza di trattare in un’unica tesi il contesto, lo sviluppo e le reazioni ad esperimenti della prima metà del XX secolo che sono spesso citati come anomalie delle teorie della relatività.⁹

Considerare la pubblicazione di un articolo teorico un momento di rottura tra due visioni del mondo è una delle prime scelte storiografiche fondamentali di questa tesi, in quanto determinante sia della scelta dell’argomento di studio, sia della selezione delle fonti. Ciò non porta ad accettare di per sé una visione kuhniana della storia della scienza come un

⁷ Hanson, N. R. (1962) “The Irrelevance of History of Science to Philosophy of Science”, *The Journal of Philosophy*, 59 (1962): 574-86, p. 580.

⁸ Einstein (1905), *op. cit.*

⁹ Con il termine anomalia ci si riferisce all’uso che ne fa il filosofo e storico della scienza Thomas S. Kuhn (1922-1996) in Kuhn, T. S. (1962) *The Structure of the Scientific Revolutions* (Chicago: University of Chicago Press, 1962).

susseguirsi di rivoluzioni scientifiche e scienza normale, né una visione metodologica à la Lakatos. È mio obiettivo, anzi, considerare se e quando queste ipotesi metodologico-storiografiche siano pertinenti ai casi scelti.¹⁰

Resta una premessa necessaria alla scelta stessa dell'oggetto di studio il fatto che tratterò di una porzione della storia della fisica del XX secolo, accettando il fatto che è “ragionevole creare una divisione fra il XIX e il XX secolo nella storia della fisica”.¹¹

Le problematiche metodologiche e interpretative di un tale lavoro sono molteplici e attraversano diversi piani. Si dovrà prendere in esame il contesto generale del passaggio tra una fisica classica, in particolare la fisica dell'etere luminifero e/o elettromagnetico, ad una fisica relativista. In questo insieme generale, mi riferirò in particolare ai seguenti punti:

- il rapporto tra teoria ed esperimento nell'accettazione delle teorie di Einstein;
- una possibile distinzione tra fisici sperimentali e teorici nel contesto della ricezione della relatività;
- l'esistenza di comunità scientifiche nazionali e il rapporto tra loro nella prima metà del secolo XX;
- problemi epistemologici nella lettura storica di passaggi che Kuhn definisce rivoluzionari e quanto i casi scelti possano adeguarsi o meno a tali generalizzazioni;
- le reciproche interferenze tra una storia puramente scientifica e avvenimenti storici che formano il contesto culturale più ampio; nello specifico le relazioni tra fisica anti-Einsteiniana e visioni nazionalistiche e antisemitiche che attraversavano varie fasce della società, non ultima la comunità scientifica;
- il problema della scelta e delle interpretazioni delle fonti, la possibilità di trovarne di nuove, la re-interpretazione di fonti già citate e la valutazione delle fonti orali nella storia della fisica del XX secolo rispetto ad un argomento che può ritenersi contemporaneo.

¹⁰ Per la metodologia dei programmi di ricerca scientifici di Lakatos vedere Lakatos, I. (1970) “Falsification and the methodology of scientific research programme”, in Lakatos, I. e Musgrave, A. (eds.) (1970) *Criticism and the Growth of Knowledge* (Cambridge: Cambridge University Press, 1970): 91-195.

¹¹ Kragh (1990), *op. cit.*, p. 83

Tutti i temi succitati costituiscono termini di dibattito storiografico e sarà compito dell'autore rendere esplicite le scelte fatte per chiarire lo sfondo interpretativo nella rivisitazione storica dei casi studiati.

Trattandosi d'argomenti al centro del dibattito scientifico contemporaneo, queste scelte risulteranno fondamentali nella critica alle ricostruzioni antecedenti e porteranno a conclusioni che contrastano nettamente con quelle dei fisici anti-relativisti. Questo porta ad una domanda storiografica che sarà parte delle conclusioni della tesi: quanto è possibile, nella storia della scienza, ricostruire avvenimenti storici che sono causa di polemica teorica contemporanea senza essere indotti a prendere posizione dal punto di vista interpretativo?

Nel Cap. 2 analizzerò le immagini storiche degli argomenti scelti, differenziando tra storia implicita e storia esplicita, nella letteratura secondaria: libri di testo, trattati di filosofia della scienza, biografie di Albert Einstein, articoli e libri di storia riguardanti l'accettazione e le interpretazioni delle teorie della relatività, articoli del dibattito contemporaneo riguardante la spiegazione di questi. Un paragrafo di questo capitolo riguarderà gli studi più prettamente storici aventi sezioni dedicate ad uno o ambedue i casi studiati.

Nel Cap. 3 affronterò le premesse storiche, ovvero la storia delle origini della teoria della relatività ristretta con riferimento agli esperimenti di *ether-drift*, in particolare quello di Michelson-Morley del 1887, e il passaggio alla teoria della relatività generale, fino al 1919, anno in cui le osservazioni di Eddington sulla deflessione dei raggi di luce intorno al Sole parvero confermarono le previsioni di tale teoria.¹²

Nel Cap. 4 si tratterà la storia dell'effetto Sagnac, dalla sua prima previsione teorica del 1892 da parte di Sir Oliver J. Lodge (1851-1940)¹³ fino alla conclusione del dibattito su di esso in Francia negli anni '30. Una sezione rilevante di tale capitolo riguarderà le ricerche del fisico Georges M. M. Sagnac nel suo contesto, ovvero all'interno della comunità scientifica francese, a partire dal 1900, anno della pubblicazione della sua teoria ottica, fino alla sua morte avvenuta nel 1928.

Il Cap. 5 sarà dedicato alla storia delle ripetizioni dell'esperimento di Michelson-Morley compiuti da Miller e da altri sperimentatori. Si partirà quindi dall'analisi degli esperimenti

¹² Eddington, A. S., Dyson, F. W., e Davidson, C. (1920) "A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations made at the Total Eclipse of May 29, 1919", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 220 (1920): 291-333; p. 332.

¹³ Lodge, O. J. (1893) "Aberration problems – a discussion concerning the connection between ether and gross matter; with some new experiments", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 184 (1893): 727-807.

di Morley-Miller del 1902-1906, per terminare con le reazioni della comunità scientifica statunitense all'articolo conclusivo di Miller sull'argomento, pubblicato nel 1933.¹⁴

Nel Cap. 6 tratterò la storia dell'analisi dei dati di Miller compiuta da Shankland, McCuskey, Leone e Kuerti a partire dalla relazione tra Shankland e Miller fino alla ricezione dell'articolo pubblicato nel 1955.¹⁵

Nel Cap. 7 trarrò le conclusioni storiografiche derivanti dalla messa in relazione dei due casi studiati rispetto alle domande poste nel presente capitolo.

¹⁴ Miller, D. C. (1933) "The Ether-Drift Experiment and the Determination of the Absolute Motion of the Earth", *Reviews of Modern Physics*, 5 (1933): 203-42.

¹⁵ Shankland et al. (1955), *op. cit.*

1.2. Il problema dell'etere alla fine del XIX secolo e le origini della teoria della relatività ristretta

Tale argomento è fonte di ricca bibliografia ed accese polemiche storiografiche. La comprensione del passaggio tra la fisica dell'etere e la teoria della relatività ristretta è stato molto condizionato dalla diffusione delle tesi di Sir Edmund Whittaker che, nel 1951, ascrisse tale teoria a Lorentz e Poincaré. Secondo Whittaker, *“Einstein published a paper which set forth the relativity theory of Poincaré and Lorentz with some amplifications, and which attracted much attention”*.¹⁶

Questa visione della nascita della teoria della relatività ristretta ha dato origine ad un folto dibattito storiografico sul ruolo di Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) e Henri Poincaré (1854-1912) nella creazione e nelle prime interpretazioni di tale teoria.¹⁷

Questo argomento è stato notevolmente approfondito ed è spesso incentrato sulla questione della priorità della creazione della teoria, ma quello che qui interessa maggiormente è capire come le differenze tra le teorie di Lorentz, Poincaré ed Einstein vennero intese dai fisici presi in considerazione e dalle diverse comunità scientifiche del periodo, in particolare statunitense e francese.

¹⁶ Whittaker, E. (1953) *A History of the Theories of Aether and Electricity Volume II: The Modern Theories 1900-1926* (Dover edition, New York: Dover, 1989), p. 40.

¹⁷ La nascita della teoria della relatività ristretta è stata affrontata, a parte dal già citato Whittaker (1953) da numerosi fisici, storici e filosofi della scienza. In accordo con la tesi di Whittaker, anche se partendo da diversi punti di vista, vi sono i lavori di Keswani, G. H. (1965) “Origin and Concept of Relativity”, *British Journal of the Philosophy of Science*, 15 (1965): 286-306; 16 (1965): 19-32; 273-294; e, parzialmente, Scribner Jr., C. (1964) “Henri Poincaré and the Principle of Relativity”, *American Journal of Physics*, 32 (1964): 672-78; e Giannetto, E. (1995) “The Rise of Special Relativity: Poincaré Works Before Einstein”, in *Atti del XVIII Congresso Nazionale di Storia della Fisica e dell'Astronomia* (a cura di P. Tucci), (Milano: Università degli Studi di Milano, 1999): 181-216.

Una storiografia di riferimento che sottolinea le differenze e l'originalità dell'approccio di Einstein nella creazione della teoria della relatività speciale si torva in Darrigol, O. (2000) *Electrodynamics from Ampère to Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 2000); Janssen, M., e Stachel, J. (2004) “The Optics and the Electrodynamics of Moving Bodies”, *Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte*, Preprint 265 (2004): 1-36; Darrigol, O. (2005) “The Genesis of the Theory of Relativity”, *Séminaire Poincaré*, 1 (2005): 57-78; Miller, A. I. (1981) *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and early interpretation (1905-1911)* (Reading: Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1981); Miller, A. I. (1987) *Imagery in Scientific Thought: Creating 20th-Century Physics*, (1st ed. Boston: Birkhäuser, 1984) (2nd ed. Cambridge, MA: MIT Press, 1987); Goldberg, S. (1984) *Understanding Relativity* (Oxford: Clarendon Press, 1984); Holton, G. (1973) *Thematic Origins of Scientific Thought. Kepler to Einstein* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1973); Kahan, T. (1959) “Sur les origines de la théorie de la relativité restreinte”, *Revue d'Histoire des Sciences*, 12 (1959): 159-65; Hirose, T. (1976) “The Ether Problem, the Mechanistic Worldview, and the Origins of the Theory of Relativity”, in *Historical Studies in the Physical Sciences*, 7 (1976): 3-82; Tonnellat, M. A. (1971) *Histoire du Principe de Relativité* (Paris: Flammarion éditeur, 1971). Per uno studio dal punto di vista della differenza dei programmi di ricerca di Lorentz ed Einstein vedere Schaffner, K. F. (1969) “The Lorentz Electron Theory of Relativity”, *American Journal of Physics*, 37 (1969): 498-513. Zahar, E. (1973) “Why did Einstein's Programme Supersede Lorentz's?”, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 24 (1973): 95-123, 223-62. Per la diffusione avuta anche in ambienti non specifici questo argomento trova spazio anche in Pais, A. (1982) *'Subtle ist he Lord': The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 1982).

Cercherò di considerare come e quando le differenze sottolineate da numerosi studiosi tra le teorie di Lorentz, Poincaré ed Einstein venivano percepite nell'affrontare i casi Miller e Sagnac, dando così nuovi spunti per l'approfondimento del dibattito storiografico tuttora in corso.

Un altro tema di dibattito sulle origini della teoria della relatività speciale è l'importanza che ebbe l'esperienza di Michelson-Morley nella formulazione data da Einstein a tale teoria. Poiché questo tema è inscindibile da quello dell'importanza degli esperimenti nell'accettazione della stessa l'affronterò in un paragrafo dedicato a questo argomento (par. 1.3).

Mi è sembrato opportuno dedicare un capitolo (Cap. 3) ai temi dell'etere durante il secolo XIX e alla nascita della teoria della relatività ristretta. Molte delle polemiche storiografiche sui casi presi in esame nascono proprio da una diversa valutazione del problema dell'etere, per cui esporrò i fatti storici accertati da vari studiosi e le diverse interpretazioni di alcuni eventi particolari.

Per quanto concerne l'inizio della premessa storica, seguendo una tradizione storiografica diffusa e richiamandomi, in particolare, ai lavori di Darrigol, Janssen e Stachel,¹⁸ ho scelto come punto di partenza il primo esperimento che coinvolge il concetto di *ether-drift*: il fenomeno dell'aberrazione stellare scoperta da James Bradley (1692-1762) nel 1728.¹⁹

Nel considerare le origini della teoria della relatività ristretta, mi focalizzerò sul concetto di etere e sugli esperimenti di *ether-drift* non approfondendo lo sviluppo delle teorie elettromagnetiche della seconda metà del XIX. Questa è una scelta obbligata dai temi trattati nella tesi e, anche se ne risulterà un'analisi incompleta, sarà sufficiente nel ristretto ambito dei casi scelti. Al contrario di molte delle trattazioni sulle origini della relatività, ho deciso di concludere la premessa storica con le osservazioni di Arthur S. Eddington (1882-1944) del 1919. Da quel momento in poi, negli ambienti scientifici e non, Einstein viene riconosciuto come l'ideatore della nuova visione del mondo e il suo programma di ricerca si distingue definitivamente dal programma di ricerca dell'etere elettromagnetico di Lorentz. Nell'articolo che rese pubblici i risultati delle osservazioni si trova l'affermazione:

¹⁸ Janssen e Stachel (2004), *op. cit.*; e Darrigol (2005), *op. cit.*

¹⁹ Bradley, J. (1729) "Account of a new discovered motion of the Fix'd Stars", *Transaction of the Royal Society*, 35 (1729): 637-61.

[...] the results of the expeditions to Sobral and Principe can leave little doubt that a deflection of light take place in the neighbourhood of the sun and that it is of the amount demanded by Einstein's generalised theory of relativity, as attributable to the sun's gravitational field²⁰

Le conclusioni a cui giunsero Eddington e i suoi collaboratori ebbero una rilevanza storica così massiccia che è impossibile non considerare questo momento un come punto di svolta. Con questa scelta si accetta che tale avvenimento ebbe una grande influenza sulla comunità dei fisici e sulla cultura di massa del periodo, e che esso produsse un intenso dibattito sui significati fisici e filosofici della relatività, percepita come un unico programma. Da quel momento in poi è possibile scorgere due sezioni ben distinte all'interno della comunità scientifica: da una parte i sostenitori delle teorie di Einstein, dall'altra i suoi avversari. Questa scelta riduttiva non vuole nascondere la complessità del problema in un banale schema dialettico, ma tale semplificazione sembra particolarmente efficace nei casi presi in considerazione, tenendo conto anche del ruolo psicologico svolto dalla risonanza che le osservazioni di Eddington ebbero grazie alla campagna stampa internazionale.²¹ L'importanza delle osservazioni del 1919 non può essere sottovalutata anche per quanto riguarda lo sviluppo di teorie epistemologiche, infatti:

Popper recalled in his autobiography that he was led to his falsifiability criterion because of the spectacular confirmation of Einstein's prediction of the gravitational bending of light by the British eclipse expedition of 1919.²²

Tale evento, così significativo da portare Karl Raimund Popper (1902-1994) alla sua teoria della falsificabilità come teoria di demarcazione tra scienza e pseudo-scienza, ebbe una tale risonanza da spostare l'attenzione della comunità scientifica sulle teorie della relatività e delineare in maniera netta due schieramenti: pro e contro Einstein.

²⁰ Eddington et al. (1920), *op. cit.*, p. 332.

²¹ Vedere a tal proposito Pais (1982), *op. cit.*, cap.16; e Sponsel, A. (2002) "Constructing a 'Revolution in Science': The Campaign to Promote a Favourable Reception for the 1919 Solar Eclipse Experiments", *The British Journal for the History of Science*, 35 (2002): 439-67.

²² Brush, S. G. (1999) "Why was Relativity Accepted?", *Physics in Perspective*, 1 (1999): 184-214, p. 187.

1.3. Il rapporto tra teoria ed esperimento nella storia delle teorie della relatività

Trattando di casi sperimentali, la mia ricerca s'inserisce appieno nel dibattito storiografico sul rapporto tra teoria ed esperimenti nella storia della relatività. In modo particolare, può dare nuovi spunti su quanto questi furono significativi nel contesto della scoperta e, soprattutto, nel contesto della giustificazione di tale teoria.

I casi studiati fanno, infatti, parte del contesto successivo a quello della scoperta. Questo tema ha un legame molto forte con temi epistemologici e, in particolare, di metodo scientifico. Sarà interessante, perciò, trarre conclusioni sul metodo usato consciamente, o inconsciamente, dai fisici studiati e confrontarlo con quello dalla maggior parte dei fisici dello stesso ambiente. Quello che qui interesserà sarà cercare di capire se si possano fare ipotesi sul metodo applicato dagli studiosi presi in esame, grazie alle fonti primarie.

I dibattiti storiografici sul rapporto tra teorie della relatività ed esperimento nella letteratura secondaria si possono dividere in tre rami:

- 1) influenza del risultato nullo dell'esperimento di Michelson-Morley (1887) sullo sviluppo del pensiero di Einstein e sulla creazione della teoria della relatività ristretta;
- 2) disposizione di Einstein verso gli esperimenti;
- 3) importanza degli esperimenti nell'accettazione delle teorie di Einstein.

Questi temi sono difficilmente scindibili e fonti di un ampio dibattito storico ed epistemologico. Gli studi sul rapporto di Einstein con gli esperimenti partono proprio dalla sua relazione con l'esperimento di Michelson-Morley e offrono immagini molto diverse della metodologia di Einstein. Come afferma Holton:

*[...] these two cases [la teoria della relatività speciale di Einstein e l'esperimento ideato da Michelson nel 1880] have in fact held additional interest for historians and philosophers of science; for, as we shall see, it has been the overwhelming preponderance of opinion over the last half century that Michelson's experiments and Einstein's theory have a close genetic connection.*²³

²³ Holton, G. (1969) "Einstein, Michelson and the "crucial" experiment", *Isis*, 60 (1969): 133-97, p. 133.

Holton critica la ricostruzione dei fisici e dei filosofi che hanno reso popolare l'immagine dell'esperimento di Michelson-Morley come *experimentum crucis* per la teoria della relatività ristretta, sia nella storia implicita, contenuta nei libri di testo e nei trattati filosofici, sia nella storia esplicita, in articoli e libri di storia.²⁴

Il tema dell'influenza dell'esperimento di Michelson-Morley nella creazione della teoria della relatività ristretta è legata alla storiografia delle origini della teoria della relatività (par. 1.2). Del dibattito su quanto questo esperimento possa essere definito *crucis*, mi occuperò dettagliatamente solo per approfondire quanto esso fu percepito come tale nelle comunità scientifiche statunitense e francese nella prima metà del secolo XX. L'esperimento di Miller, in particolare, fu una ripetizione dell'esperimento di Michelson-Morley e, nei capitoli a lui dedicati, approfondirò le connessioni tra il suo lavoro e la percezione dell'importanza dell'esperimento per le teorie della relatività.²⁵

Il tema dell'influenza dell'esperimento di Michelson-Morley sulla nascita della teoria della relatività ristretta ha dato origine ad un altro filone di ricerca che si riferisce al rapporto di Einstein con gli esperimenti.²⁶ In tale letteratura l'esperimento di Miller ha un certo spazio con differenti interpretazioni, mentre Sagnac non ne ha alcuno. Questi studi uniscono, in

²⁴ Tra i libri citati da Holton di maggiore rilevanza nella formazione della storia implicita della "*genetic connection*" fra esperimento di Michelson e teoria della relatività di Einstein, abbiamo Reichenbach, H. (1928) *Die Philosophie der Raum-Zeit Lehre* (Berlin: Walter de Gruyter, 1928); traduzione ing. in *The Philosophy of Space and Time* (New York: Dover, 1957); Grünbaum, A. (1960) "Logical and Philosophical Foundations of the Special Theory of Relativity", in Danto, A. e Morgenbesser, S. (1960) *Philosophy of Science* (New York: Meridian Books, 1960): 399-434; Grünbaum, A. (1963) *Philosophical Problems of Space and Time* (New York: Knopf, 1963); i testi di storia esplicita citati sono Borse, H. A e Motz, L. (eds.) (1966) *The World of the Atom* (New York: Basic Books, 1966); Jaffe, B. (1960) *Michelson and the Speed of Light* (New York: Doubleday, 1960). Tra i libri non citati da Holton di una certa importanza è Wertheimer, M. (1945) *Productive Thinking* (1st ed., New York: Harper, 1945; enlarged edition 1959). Un apporto alla revisione dell'immagine classica dell'esperimento di Michelson-Morley come *experimentum crucis* lo diede anche Shankland, in Shankland, R. S. (1963) "Conversations with Albert Einstein", *American Journal of Physics*, 31 (1963): 47-57; Shankland, R. S. (1964) "Michelson-Morley Experiment", *American Journal of Physics*, 32 (1964): 16-35; Shankland, R. S. (1973b) "Michelson's role in the development of relativity", *Applied Optics*, 12 (1973): 2280; Shankland, R. S. (1973a) "Conversations with Einstein II", *American Journal of Physics*, 41 (1973): 895-901 (1973). Il punto di vista di Shankland cambiò nel corso del tempo e sarà affrontato nel Cap. 6 a lui dedicato. L'opinione di Holton è condivisa in Miller, A. I. (1984) *Imagery in Scientific Thought: Creating 20th-Century Physics*, (1st ed. Boston: Birkhäuser, 1984; 2nd ed. Cambridge, MA: MIT Press, 1987), Cap V; pp. 187-217; Stachel, J. (2002b) "Einstein and Michelson: The Context of Discovery and the Context of Justification", in Stachel, J. (2002a) *Einstein from 'B' to 'Z'* (Boston: Birkhäuser, 2002): 177-90. Vedere anche Earman, J., Glymour, C., e Rynasiewicz, R. (1982) "On Writing the History of Special Relativity", *Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, Volume 1982/2: *Symposia and Invited Papers* (Chicago: University of Chicago Press, 1982): 403-16.

²⁵ Per la storia degli esperimenti di *ether-drift* di Michelson, Morley e Miller, il testo di riferimento è Swenson Jr., L. S. (1972) *The Ethereal Ether* (Austin & London: University of Texas Press, 1972), sulle interpretazioni storiografiche di Swenson mi soffermerò a lungo durante la mia tesi.

²⁶ Oltre a Holton (1969), *op. cit.* il tema è stato trattato in molti testi di filosofia della scienza e, con un maggior riguardo delle fonti storiche, da Hentschel, K. (1992) "Einstein's attitude towards experiments: testing relativity theory 1907-1927", *Studies on History and Philosophy of Science*, 23 (1992): 593-624; Stachel, J. (2002c) "Einstein and Ether Drift Experiments" in Stachel (2002a), *op. cit.*, pp. 171-76, oltre alle affermazioni che si possono ricavare dalle innumerevoli biografie su Einstein.

maniera difficilmente districabile, interpretazioni storiografiche con ipotesi metodologiche. Il lavoro storico da me compiuto affronterà questo tema dettagliatamente con un'analisi delle fonti primarie (in particolare la corrispondenza di Einstein) e potrebbe dare nuovi spunti di riflessioni anche su tale ambito.

L'importanza degli esperimenti nell'accettazione delle teorie della relatività da parte della comunità scientifica è anch'esso tema di dibattito storiografico e in esso la mia ricerca potrà dare spunti ancor più significativi, in quanto la mia tesi proporrà una scelta di fonti e una loro interpretazione che amplieranno il lavoro già compiuto da altri.²⁷

La storiografia riguardante l'accettazione delle teorie della relatività non è vasta e si è occupata in special modo delle differenze nazionali (vedi par. 1.4), quindi ritengo che il mio studio potrà contribuire ad ampliare la conoscenza di alcune dinamiche della comunità scientifica rispetto alle teorie di Einstein nella prima parte del XX secolo.

²⁷ Vedere Brush (1999), *op. cit.*; Goldberg (1984), *op. cit.*; Glick, T. F. (ed.) (1987) *The Comparative Reception of Relativity*, *Boston Studies in the Philosophies of Science*, V. 103, (Dordrecht: Reidel, 1987); Crelinsten, J. (2006), *Einstein's Jury, The Race to Test Relativity* (Princeton and Oxford: Princeton University Press, 2006).

1.4. I contesti nazionali nella storia dell'accettazione della relatività

Il contesto naturale del mio studio, quello della ricezione della relatività, può essere suddiviso per comunità scientifiche nazionali. Questo modo di strutturare la storia delle teorie della relatività, in particolare della sua accettazione, ha molti esempi nella storiografia contemporanea.²⁸ Come sostiene Goldberg:

*[...] one can see in the response of individual scientists manifestations of “national differences”. In other words, one can understand the response in terms of traditional national systems and concerns. At the very least one can identify in the nature of the response of individuals a compatibility with other national traits. [These traits] are closely related to the nature of the social customs and social institutions.*²⁹

Questa affermazione vale per ambiti molto diversi e porta Goldberg a proporre il “*national style of science*”³⁰ che “*involves different ways of thinking about science, the embeddedness of science in different value systems, and the attaching to science of different ideological markers*”.³¹

Molti storici della scienza partono dalla convinzione che in generale non siano vere le affermazioni:

1. *Knowledge about the physical world is not subject to any interpretation. It is ultimately confined by sense experience.*
2. *Understanding of the concepts in science is universal to the extent that science employs the language of mathematics.*³²

Queste premesse, a volte implicite, sono soggette a diverse critiche basate sulla storia delle diverse interpretazioni di una teoria dal punto di vista sia fisico sia filosofico.

²⁸ Goldberg (1984), *op. cit.*; Glick (ed.) (1987), *op. cit.*; Glick, T. F. (1988) *Einstein in Spain: Relativity and the Recovery of Science* (Princeton: Princeton University Press, 1988); Biezunski M. (1981) “La Diffusion de la Théorie de la Relativité en France” (Ph.D. Thesis, Université de Paris VII, 1981); Biezunski, M. (1991) *Einstein à Paris. Le Temps n’est plus...* (Saint Denis: Presse Universitaires de Vincennes, 1991); Bolella, V. (1998) “L’introduction de la Relativité en France, 1905-1922” (Ph.D. Thesis, Université de Nancy 2, 1998).

²⁹ Goldberg (1984), *op. cit.*, p. 181.

³⁰ Goldberg (1988) “Putting New Wine in Old Bottles: The Assimilation of Relativity in America” in Glick (ed.) (1988), *op. cit.*, 1-26, a p. 1.

³¹ Glick, T. F. (1988) “Cultural Issues and Relativity” in Glick (ed.) (1988), *op. cit.*, 381-400, p. 382.

³² Goldberg (1988), *op. cit.*, p. 2.

Questo è particolarmente vero nelle prime reazioni alle teorie della relatività, per come queste vennero comprese all'interno delle strutture concettuali e accademiche delle diverse nazioni.

Per Glick i “*national styles of science*” possono riferirsi a diversi ambiti generali che influirono non poco sullo sviluppo e sull'accettazione della relatività nei diversi contesti:

- sistema d'idee e valori che potrebbero aver influito su una diversa comprensione di termini uguali;
- le strutture sociali e professionali della scienza, non ultima l'organizzazione del sistema educativo, e la capacità dei gruppi istituzionali di partecipare attivamente allo sviluppo del programma di ricerca relativista;
- l'importanza, nella comunità scientifica, delle comunità disciplinari di fisica, Matematica e Astronomia e la loro influenza sullo sviluppo delle teorie relativiste;
- differenze nelle convinzioni filosofiche, in particolar modo la presenza di una tendenza positivista o idealista nelle varie comunità nazionali;
- la comprensione, nei circoli non scientifici, delle teorie della relatività grazie a quelle che potrebbero essere chiamate le “*popularisations*” di queste teorie, e l'influenza di tale comprensione sul comportamento degli scienziati di una certa comunità nazionale.

Questi ambiti molto generali potrebbero aver influito:

- A) sulla diversa comprensione delle teorie di Einstein, dal punto di vista fisico, metafisico ed epistemologico;
- B) sulla capacità di una comunità scientifica nazionale di diventare “attiva” e non “passiva” nello sviluppo di queste teorie.

Contrariamente alle affermazioni di Merz, che vede il secolo XX come quello in cui “*science at least has become international*”³³, io accetterò il punto di vista comparativo e mi riferirò alle comunità scientifiche nazionali per quanto concerne le reazioni ai casi scelti nella prima metà del secolo XX. Non pretendo con questa tesi di approfondire tutti gli aspetti succitati, ma di tenerli presente nelle interpretazioni e nella scelta delle fonti. Tale

³³ Merz, J. T. (1904) *A History of European Thought in the Nineteenth Century* Vol 1 (2nd ed. Edinburgh/London: William Blackwood and Sons, 1904), p. 18.

approccio permette, infatti, di considerare la scienza come una pratica sociale: sarà parte fondamentale della tesi considerare come le differenti comunità scientifiche nazionali reagirono ai lavori di Sagnac e di Miller e confrontare queste reazioni tra loro. La ricerca sulle fonti d'archivio verrà fatta solo per le comunità statunitensi e francesi, mentre le reazioni degli scienziati degli altri paesi verranno considerate sulla base delle loro pubblicazioni e/o delle fonti secondarie.

L'unico modo di approssimarsi all'opera scientifica come ambito sociale è quello di considerare un determinato ambiente nella scelta delle fonti e tale lavoro può essere compiuto solo riguardo ad una determinata parte del mondo scientifico, visto l'enorme aumento del numero di fisici avvenuto nel XX secolo. Una ricerca riguardante una comunità scientifica che non si basi sulle opere di pochi individui richiede scelte precise rispetto all'ambito complessivo, e quella delle comunità nazionali statunitense e francese, nel mio caso specifico, pare una restrizione del campo d'indagine obbligata.

Una volta che si consideri la scienza e, in particolare, la fisica una disciplina di cui gli aspetti sociali sono una componente fondamentale, così come in altri campi del sapere umano, è d'obbligo considerare altri aspetti del contesto nazionale che possono aver influito sull'atteggiamento e sul pensiero degli scienziati considerati. Per questo cercherò collegamenti con i seguenti temi:

- le difficoltà di relazione tra differenti comunità accademiche nazionali dovuto a contrasti politici;
- possibile antisemitismo che potrebbe aver influito sulle propensioni verso le teorie di Einstein nelle comunità scientifiche francese e statunitense, così come avvenne in Germania;
- il ruolo e le modalità dei viaggi di Einstein in Francia e negli Usa, dopo la fine della prima guerra mondiale e la loro accoglienza.

Questi approfondimenti ci permettono di considerare gli eventuali collegamenti tra il comportamento degli scienziati e avvenimenti extra-scientifici, inoltre chiariscono alcune dinamiche poco studiate nel percorso che portò all'accettazione delle teorie di Einstein.

La storiografia della scienza spesso non tiene conto della politica e delle relazioni internazionali, e sviluppa delle metodologie che separano l'ambito scientifico dal contesto

generale. Questa prospettiva è, senza dubbio, necessaria per uno studio particolareggiato di alcuni argomenti scientifici, ma risulta fuorviante in altri casi. In quelli che si intendono studiare, per esempio, non si può prescindere dagli aspetti legati alla persona di Einstein, il suo essere di origine ebraica, le sue posizioni politiche e religiose, la sua enorme ed immediata fama anche presso i non specialisti, e, ovviamente, il suo pensiero scientifico. Questi temi sono affrontati quasi esclusivamente nelle varie biografie di Einstein ed in alcuni studi sull'antisemitismo tedesco nella prima metà del secolo XX. Mio proposito è di ampliare alla Francia ed agli Usa, in rapporto agli esperimenti di *ether-drift*, eventuali relazioni con fatti extra-scientifici, e di analizzarne l'importanza in base alle fonti primarie.³⁴

I casi di Sagnac e Miller potrebbero portare a scoperte essenziali anche rispetto ad altre comunità scientifiche ma queste saranno considerate solo grazie a fonti secondarie e ad articoli pubblicati. Dalla ricerca svolta sembra che i casi di Miller e Sagnac non ottennero la stessa risonanza avuta all'interno della loro comunità accademica. L'ultima affermazione andrebbe, però, verificata con uno studio specifico delle fonti d'archivio nei diversi Paesi.

³⁴ Per una bibliografia di studi storici sull'anti-einsteinismo per ragioni politiche vedere Goenner, H. (1993a) "The Reaction to Relativity Theory I: The Anti-Einstein Campaign in Germany in 1920", in Beller, M., Cohen, R. S., Renn, J. (eds.) *Einstein in context* (Cambridge: Cambridge University Press, 1993): 107-33; Goenner, H. (1993b) "The reaction to relativity theory in Germany III: Hundred Authors Against Einstein", in Norton, J. e Earman, J. (eds.) *Einstein Studies*, Vol. 6 (Boston: Birkhäuser, 1993); Moatti, A. (2007) *Einstein: Un Siècle Contre Lui* (Paris: Odile Jacob, 2007); Stachel, J. (2002d) "Einstein's Jewish Identity", in Stachel (2002a), *op. cit.*, pp. 57-84; Hentschel, K. (ed.) (1996) *Physics and National Socialism: An Anthology of Primary Sources* (Basel/Boston/Berlin: Birkhäuser Verlag, 1996); tra le biografie di Einstein che affrontano in modo significativo questo lato della sua vita, vedere Frank, P. (1949) *Einstein: Sein Leben und seine Zeit* (Munich: Paul List, 1949); Seelig, C. (1952) *Albert Einstein: Eine Dokumentarische Biographie* (Zürich/Stuttgart/Vienna: Europa Verlag, 1952) e Clark, R. W. (1973) *Einstein, the Life and Times* (London, Sydney/Auckland/Toronto: Hodder and Stoughton, 1973).

1.5. Relazioni tra filosofia della scienza e storia della relatività

L'affermazione delle teorie della relatività ristretta all'interno della comunità scientifica e la sostituzione della dinamica newtoniana con quella einsteiniana ha portato Kuhn a considerare questo passaggio come una rivoluzione scientifica all'interno della fisica.³⁵ Che si accettino o no le sue tesi, "Kuhn ha però certamente lasciato la sua impronta nella metascienza. Nessuno studioso dell'argomento può ignorare le sue idee, e il vocabolario che ci ha lasciato in eredità viene oggi usato su vasta scala, persino da coloro che non accettano le tesi di Kuhn".³⁶

È diventato comune parlare di passaggio tra paradigma newtoniano e paradigma einsteiniano e tale processo è spesso definito "rivoluzione scientifica". Non è semplice capire quanto gli storici che si riferiscono alla rivoluzione relativista condividano le tesi di Kuhn, visto che l'uso del suo linguaggio è divenuto un *modus operandi* molto diffuso. Nonostante le critiche al concetto kuhniano di paradigma, che trovano ampio spazio nel dibattito epistemologico post 1962,³⁷ questo termine può essere utile per comodità di rappresentazione storiografica. Pur ritenendo vero che quella newtoniana e quella einsteiniana corrispondono a due visioni del mondo con caratteristiche diverse, il termine di "*relativity revolution*" per indicare il periodo che va dalla crisi della meccanica newtoniana fino alla sostanziale affermazione della teoria della relatività generale, dovrà essere reso specifico nel contesto delle comunità nazionali e dei casi studiati con un approfondimento sulle fonti primarie.

Il dibattito in merito al ritenere o meno l'affermazione della relatività una rivoluzione scientifica è assai ricco tra storici, filosofi della scienza e fisici.³⁸ Nel cercare di mantenere una ricostruzione razionale nella storia della scienza e prendendo spesso come esempio il succedersi delle teorie di Newton e Einstein, Imre Lakatos propose la metodologia dei programmi di ricerca scientifici, che diede avvio a numerosi studi particolareggiati sull'argomento.³⁹ Pur non addentrandomi nel dibattito epistemologico e non accettando

³⁵ Kuhn (1962), *op. cit.*

³⁶ Oldroyd, D. (1989) *Storia della filosofia della scienza* (Milano: Mondadori, 1989), p. 427.

³⁷ Da questo dibattito nasce il poscritto di Kuhn del 1969 nel quale cercava una definizione meno ambigua di paradigma, in Kuhn T. (1970) "Postscript-1969" in *The Structure of Scientific Revolutions* (2nd ed., Chicago: University of Chicago Press, 1970).

³⁸ Per un esempio dell'interesse degli stessi fisici per questo tema vedere Bergia, S. (1978) *Einstein e la relatività* (Roma/Bari: Laterza, 1978), Appendice: pp. 255-293.

³⁹ Lakatos (1970), *op. cit.*; nel caso specifico della teoria della relatività è influente l'articolo Zahar (1973), *op. cit.*

come struttura d'inquadramento precostituito le teorie storiografiche di Kuhn e di Lakatos, penso sia utile definire quello newtoniano e quello einsteiniano come due programmi di ricerca molto diversi. Concluderò, poi, la mia tesi con un raffronto tra lo studio storico dei casi particolari e gli inquadramenti generali succitati per trarre conclusioni sulla validità delle diverse teorie storiografiche in questi ambiti specifici.

1.6. Il problema delle fonti

Il mio lavoro di ricerca si sviluppa in una sezione della storia del XX secolo e una parte di questo tocca un'analisi storica del dibattito quasi contemporaneo. Questo porta a dover affrontare i temi collegati alla possibilità d'interpretare con distacco un argomento ancora in evoluzione applicando a questo un metodo storiografico. La posizione di partenza è che questa analisi storica sia possibile una volta che si renda esplicito il criterio di attendibilità delle fonti. Per far questo divido la mia ricerca delle fonti in due fasi.

Prima fase: il lavoro dei fisici presi in esame e il rapporto con le loro comunità nazionali nel momento della loro attività. Questa prima fase prevede quattro sezioni diverse:

- Georges M. M. Sagnac e la contemporanea comunità scientifica francese;
- le ripetizioni dell'esperimento di Michelson-Morley negli USA e la comunità scientifica statunitense nel prima metà del secolo;
- Robert S. Shankland e la comunità scientifica internazionale degli anni '50;
- le reazioni da parte della comunità scientifica internazionale nella prima metà del secolo agli esperimenti di *ether-drift* presi in considerazione.

Per la prima sezione le fonti prese in considerazione saranno:

- a) articoli scientifici pubblicati di Sagnac;
- b) articoli e libri scientifici pubblicati in Francia che citano l'effetto Sagnac nella prima metà del XX secolo;
- c) articoli e libri pubblicati da esponenti della comunità scientifica francese sulla teoria della relatività nella prima metà del secolo XX;
- d) documenti appartenenti al *Fond Sagnac*, situato negli *Archives Nationales* di Parigi;
- e) *Dossier Sagnac* della *Faculté des Sciences* di Parigi, negli *Archives Nationales* di Parigi;
- f) documenti trovati negli archivi dell'*Académie des Sciences* di Parigi che riguardano Georges Sagnac o fisici che hanno avuto una qualche relazione con il suo lavoro;
- g) Archivio Langevin conservato all'*École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI)* di Parigi;

- h) Archivio Einstein conservato nella *Hebrew University* di Gerusalemme, ma con copie nel *Howard Gotlieb Archival Research Center (Boston University)* e presso *Einstein Paper Project* al *Caltech* (Pasadena);
- i) giornali francesi dell'epoca.

Le fonti trovate nelle ricerche di archivio si dividono in :

- lettere;
- note e foto di laboratorio;
- manoscritti di opere pubblicate;
- protocolli e registri di istituzioni scientifiche su Georges Sagnac;
- pre-print;
- articoli pubblicati con note a margine;
- documenti legali.

Per la seconda e terza sezione le fonti prese in esame sono:

- a) articoli scientifici di Miller;
- b) articoli pubblicati da fisici della comunità scientifica statunitense che commentano gli esperimenti di Miller o che riguardano esperimenti simili;
- c) articoli e libri pubblicati da fisici della comunità scientifica statunitense sulle teorie della relatività che citano gli esperimenti in questione;
- d) documenti trovati negli archivi su vari fisici che possono aver avuto un ruolo attivo in questi casi (Dayton C. Miller, Robert S. Shankland, Albert Einstein, Albert A. Michelson, Ludwik Silberstein, George E. Hale, Walter S. Adams, Francis G. Pease, Frederick H. Seares, Henry G. Gale, Charles St. John, Walter F. G. Swann);
- e) alcuni documenti privati di Robert S. Shankland, conservati nell'ufficio del Prof. William Fickinger del *Case Western Institute*, verso il quale sono riconoscente per la possibilità avuta di analizzarli approfonditamente;
- f) documenti in varie istituzioni che hanno avuto collegamenti con il lavoro di Miller o che possono essere indicativi delle reazioni della comunità scientifica statunitense (*Case Western Reserve University, Mount Wilson Observatory, Carnegie Institution of Washington, National Academy of Sciences, American Physical Society*);

- g) documenti trovati in archivi statunitensi dove vengono conservate le carte di alcuni fisici che hanno avuto una corrispondenza con Miller, Michelson o Einstein sugli esperimenti di *ether-drift* (Stephen G. Brush, Robert A. Millikan, Paul S. Epstein, Thomas C. Mendenhall, Edwin C. Kemble, Elmer Hutchisson, Elizabeth R. Laird, Gordon S. Fulcher, George D. Birkhoff, Arvid Reuterdaahl, Robert Wood, Philip M. Morse, Emerson Pugh, Charles L. Poor, John C. Merriam);
- h) interviste conservate all'*American Institute of Physics* che citano Miller (Robert S. Shankland, Elmer Hutchisson, Edwin C. Kemble, Frederic Palmer);
- i) i dati autobiografici di Phillip M. Morse;
- j) giornali statunitensi della prima metà del XX secolo.

Tra i documenti archivistici mi soffermerò su:

- lettere;
- note di laboratorio;
- taccuini, annotazioni private;
- manoscritti di opere scientifiche;
- protocolli e registri di istituzioni scientifiche;
- pre-print;
- libri di testo utilizzati;
- interviste già realizzate;
- documenti riguardanti ammissioni a società culturali e istituzioni;
- richieste di strumentazione scientifica.

Per la quarta sezione si considerano soltanto gli articoli scientifici o i libri che hanno avuto una diffusione internazionale che citano gli esperimenti di Miller e Sagnac o le loro teorie.

Seconda fase: la storia orizzontale dell'effetto Sagnac e degli esperimenti di Miller durante il secolo XX. Per questa seconda fase si considera solo la letteratura scientifica e, soprattutto, la storiografia di tali casi durante il secolo XX.

Fonti private o semi-pubbliche sono, perciò, considerate solo per chiarire le figure storiche di Sagnac, Miller e Shankland e per approfondire quali furono le reazioni non pubbliche ai loro lavori, nella speranza che tali fonti private aggiungano argomenti per comprendere perché gli esperimenti in esame non vennero considerati così problematici per le teorie della relatività come vorrebbe una contemporanea storiografia anti-relativista.

Per quanto concerne le interviste e i dati autobiografici considerati, essi saranno utilizzati in aggiunta ad altre fonti scritte, universalmente considerate più attendibili. Queste rimangono uno strumento molto utile per approfondire la percezione che le figure intervistate avevano dell'opera di Miller, alcune caratteristiche della sua personalità, e il suo approccio generale alla fisica e all'insegnamento. Mettendo in relazione le diverse interviste e le altre fonti si può ottenere un quadro alquanto completo e non contraddittorio, pur considerando le criticità dell'utilizzo delle fonti orali.

1.7. Ringraziamenti

La mia opera di ricerca non sarebbe stata in alcun modo possibile senza l'aiuto di numerose persone ed istituzioni che mi hanno seguito e permesso di approfondire tale lavoro.

La mia ricerca è stata supportata dal Dottorato in Storia Internazionale (Metodi di Elaborazione Multimediale) dell'*Università degli Studi di Milano* e, per quanto concerne una parte della ricerca archivistica negli USA, dal *Center for History of Physics - American Institute of Physics*.

Ringrazio innanzitutto il Prof. Pasquale Tucci che mi ha supportato, anche al di là del suo ruolo istituzionale, dandomi possibilità e strumenti di lettura, e seguendomi costantemente nella mia ricerca, il Dr. Leonardo Gariboldi e lo staff del *Dipartimento di Fisica* dell'*Università degli Studi di Milano*. Un altro profondo ringraziamento va a tutto il collegio docenti del Dottorato in Storia Internazionale (Metodi di Elaborazione Multimediale), in particolare alla Prof.ssa Paola Olla Brundu del *Dipartimento di Studi Internazionali*.

Un ringraziamento particolare va anche al Prof. John Stachel (*Boston University*) per aver seguito i miei studi, avermi aiutato nella ricerca su Einstein negli USA e per approfondite discussioni sul rapporto di Einstein con tali casi, il Prof. Gregory Good (*Center for History of Physics - American Institute of Physics*) per avermi supportato, anche finanziariamente, nella mia ricerca archivistica negli USA e il Prof. William Fickinger (*Case Western Institute*) per avermi portato a conoscenza di numerosi documenti riguardanti l'opera di Miller e di Shankland che sono conservati nel suo ufficio e per le molte discussioni sul lavoro di questi.

Nella mia ricerca archivistica sono numerose le persone che mi hanno supportato:

Dr. Joe Anderson (*Niels Bohr Library and Archives dell'American Institute of Physics*), Melanie Brown (*Niels Bohr Library and Archives dell'American Institute of Physics*), Sue Hanson (*Kelvin Smith Library, Special Collections Research Center, Case Western Reserve University*), Jill Tatem (*Case Western Reserve University Archives*), Helen Conger (*Case Western Reserve University Archives*), Prof. Diana Kormos-Buchwald (*Einstein Paper*

project), Ze'ev Ronkranz (curator of the *Albert Einstein Archive – Einstein Paper Project*), Ana Guimaraes (*Cornell University – Rare Books and Manuscripts*), Claire Kennedy (*The Huntington Library*), Ann M. Kenne (*St. Thomas University Archives and Special Collections*), John Strom (*Carnegie Institution of Washington*), James Stimpert (*Sheridan Library, Johns Hopkins University*), Jennyfer Bryan (*Nimitz Library, U.S. Naval Academy*), Joanna Corden (*Royal Society of London*), Carol Leadenham (*Hoover Institution Archives*), Lora T. Brueck (*Worcester Polytechnic Institute*), Margaret Anderson (*Worcester Polytechnic Institute – Archives and Special Collections*), Marina Marmioli Hassan (*Fondazione Centro di Documentazione Ebraica Contemporanea*), David Kessler (*The Bancroft Library*), Loma Karklins (*California Institute of Technology Archives*), Claudine Pouret (*Académie des Sciences de Paris*), Thierry Pin (*Archives Nationales*), Delphine Herve (*Archives Nationales*), Édith Pirio (*Archives Nationales*), Bianc Ruehling (*Georg-August-Universitaet Goettingen*), Ida Marnati (*Biblioteca del Dipartimento di Fisica - Università degli Studi di Milano*), Monica Follini (*Biblioteca del Dipartimento di Fisica – Università dagli Studi di Milano*), i partecipanti del XXX, XXXI e XXXII congresso della *Società Italiana degli Storici della Fisica e dell'Astronomia (SISFA)*, e del XCIV e XCVI congresso della *Società Italiana di Fisica (SIF)* che hanno ascoltato e commentato le mie ricerche. I partecipanti del III e IV congresso della *European Society for the History of Science (ESHS)* e del XXIII *International Congress of History of Science and Technology* per le discussioni sulle mie ricerche.

Ringrazio per il supporto datomi lo staff dei seguenti Archivi e Istituzioni:

Albert Einstein Archive

Archives de l'Académie des Sciences de Paris;

Archives Nationales di Parigi;

Biblioteca del Dipartimento di Fisica di Milano;

Case Western Reserve University Archives;

Center for History of Physics/Niels Bohr Library and Archives - American Institute of Physics;

Fond Langevin all'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris;

Harvard University Archives;

Howard Gotlieb Archival Research Center, Boston University;

Huntington Library, San Marino (CA);

Istituto Lombardo, Accademia di Scienze e Lettere, Milano;

Royal Society of London.

Capitolo 2

Immagini storiografiche

2.1. Introduzione

La letteratura scientifica offre diverse immagini della storia degli esperimenti di Sagnac e di Miller e del loro rapporto con le teorie della relatività. Queste visioni variano in base al contesto generale in cui tali argomenti sono inseriti, sia esso filosofico, storico o teoretico. Esiste, quindi, su questi casi una letteratura storiografica vasta e differenziata sia esplicita che implicita. La diversità di immagini storiche che se ne ricava non dipende solo dell'ambito generale in cui questi appaiono, ma anche dall'obiettivo principale dell'autore che ne tratta.

Il caso Miller, per esempio, ha trovato ampio spazio all'interno di indagini di filosofia della scienza sull'atteggiamento metodologico della comunità scientifica. La storia implicita racchiusa in tali discussioni epistemologiche appare subordinata alle necessità argomentali dell'autore.

L'effetto Sagnac e/o episodi scientifici ad esso collegato non compaiono, invece, nelle discussioni filosofiche sul metodo scientifico, ma sono apparsi con una certa frequenza all'interno della letteratura scientifica contemporanea: da un lato nelle applicazioni dell'effetto nella navigazione aerospaziale e nella sincronizzazione del GPS, dall'altro, nello sviluppo di esperimenti su circuiti in rotazione e nelle problematiche teorico-interpretative all'interno del programma di ricerca relativista.

Un sunto schematico delle apparizioni dei casi trattati in diversi ambiti bibliografici si trova nel seguente elenco:

- filosofia della scienza: solo il caso Miller è presente, mentre non v'è alcun riferimento a Sagnac (par. 2.2);
- biografie di Einstein: è presente solo Miller (par 2.3);

- libri di testo sulla Fisica moderna o di Ottica: sono presenti entrambi (par. 2.4);
- letteratura anti-relativista: sono molto presenti entrambi (par. 2.5).

Le storie implicite deducibili dalle fonti sopra citate presentano caratteristiche del tutto differenti; gli anti-relativisti, per esempio, appoggiano le loro argomentazioni proprio sulla mancanza di un'analisi storica nei libri di testo. La letteratura anti-relativista è, perciò, quella che presenta un maggior interesse nell'approfondimento storico. Le esplicite esigenze teoriche degli anti-relativisti, però, vengono difese con un *pathos* eccessivo e impediscono loro un approccio metodologicamente corretto alla storia degli esperimenti di Miller e Sagnac.

A questa situazione di storia implicita molto confusa e conflittuale si aggiungono alcuni studi puramente storici, di diversa entità, che hanno riguardato innanzitutto gli esperimenti di Miller nel contesto storiografico delle ripetizioni dell'esperimento di Michelson-Morley, e solo in misura minore l'effetto Sagnac.

Dalla situazione mostrata nelle righe precedenti nasce la necessità di approfondire questi casi ancora al centro di polemiche che si basano, appunto, su una diversa lettura storica degli avvenimenti, ma, soprattutto, si cercherà di analizzare le relazioni delle comunità accademiche nazionali con tali episodi.

2.2. Filosofia della Scienza: il caso Miller

2.2.1. Premessa

Mentre l'effetto Sagnac non trova alcuno spazio nella letteratura filosofica, il caso degli esperimenti di Miller è stato utilizzato da importanti filosofi della scienza o come esempio di una particolare metodologia, o per dimostrare l'assenza di metodologia nella prassi scientifica nella sua evoluzione storica. Il rapporto metodologico tra teoria ed esperimenti o tra insieme di teorie ed esperimenti è alla base di uno dei dibattiti più accesi dell'epistemologia contemporanea. Tale dibattito ha avuto un momento molto prolifico negli anni '60 e vari filosofi hanno utilizzato il caso Miller nelle loro argomentazioni. Come si vedrà, le storie raccontate sono molto diverse tra loro essendo queste utilizzate in un ambito argomentativo complesso. Già Holton ha richiamato l'importanza della storia implicita nella storiografia contemporanea e spesso un discorso indiretto compiuto da una persona autorevole ha fornito un'immagine storica nota, più di analisi storiografiche accurate, ma non diffuse.¹

2.2.2. Popper

In questa rassegna bibliografica mi sembra d'obbligo partire con il lavoro di Karl R. Popper, in quanto è riconosciuto che da esso abbia preso le mosse gran parte del dibattito epistemologico contemporaneo, non solo a livello cronologico. Il principio di falsificazione ingenuo porterebbe a considerare gli esperimenti di Miller una confutazione della teoria della relatività ristretta e, di conseguenza, della teoria della relatività generale per come era stata sviluppata da Einstein. Grazie a numerose affermazioni dello stesso Popper, sappiamo, però, che la sua metodologia nacque anche in risposta alla clamorosa affermazione della teoria della relatività generale dopo le osservazioni della deflessione dei raggi di luce intorno al Sole durante l'eclissi del 1919.²

Popper è a conoscenza degli esperimenti di Miller già nel 1934 e li cita nel noto trattato *Logik der Forschung*³, che divenne molto influente nella versione inglese, riscritta nel 1959,

¹ Holton, G. (1973) *Thematic Origins of Scientific Thought. Kepler to Einstein* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1973).

² Eddington, A. S., Dyson, F. W., e Davidson, C. (1920) "A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations made at the Total Eclipse of May 29, 1919", *Philosophical Transactions of Royal Society of London Series A*, 220 (1920): 291-333; p. 332.

³ Popper, K. R. (1934) *Logik der Forschung* (Tübingen: J. C. B. Mohr, 1934).

The Logic of Scientific Discovery.⁴ La citazione del caso Miller è identica nelle due versioni e si trova nel paragrafo dedicato al criterio della “serietà metodologica” nell’acceptabilità di un esperimento. Secondo Popper, il lavoro sperimentale, specie con risultato contrario alle aspettative, deve contenere le istruzioni per la sua ripetibilità. Il caso Miller entra in questo contesto perché il risultato trovato era contrario a quello ritenuto valido del precedente esperimento di Michelson-Morley del 1887. Vediamo le poche frasi che Popper dedica al caso Miller:

In the literature of physics there are to be found some instances of reports, by serious investigators, of the occurrence of effects which could not be reproduced, since further tests led to negative results. A well-known example from recent times is the unexplained positive result of Michelson’s experiment observed by Miller (1921-1926) at Mount Wilson, after he himself (as well as Morley) had previously reproduced Michelson’s negative result. But since later tests again gave negative results it is now customary to regard these latter as decisive, and to explain Miller’s divergent result ‘due to unknown sources of error.’⁵

Popper descrive Miller come un investigatore serio che ha fornito tutte le basi per la riproducibilità dell’esperimento. La trattazione che Popper fa degli esperimenti di Miller è quasi contemporanea agli avvenimenti e mostra l’immagine di una comunità scientifica compatta nel ritenere i risultati dell’esperimento dovuti ad un errore sistematico a causa delle successive ripetizioni che non hanno verificato lo stesso effetto. Sarebbe interessante conoscere le fonti che Popper utilizza, ma l’autore non ne cita alcuna, anche nel caso delle frasi virgolettate.⁶ È degno di attenzione anche il “*well-known*” con cui Popper descrive il risultato non nullo degli esperimenti di Miller, chiara indicazione della notorietà di cui questi godevano a metà degli anni ’30 anche in Europa.

Popper non affronta il rapporto tra i risultati di Miller e le teorie della relatività. Il caso Miller rimane rinchiuso nel contesto epistemologico della relazione tra esperimenti simili

⁴ Popper, K. R. (1959) *The Logic of Scientific Discovery* (1st English ed., London: Hutchinson & Co, 1959), citazione da (London/New York: Routledge, 2004).

⁵ Ibid., p. 24.

⁶ Tale frase è del tutto identica a quella utilizzata da Sir Charles G. Darwin (1887-1962) nel suo discorso presidenziale alla Section A della *British Association for the Advancement of Sciences (BAAS)* a Cambridge nel 1938, quattro anni più tardi, pubblicato in Darwin, C. G. (1939) “Logic and Probability in Physics”, *Philosophy of Science*, 6, (1939): 48-64, p. 51. Questa fonte è sicuramente utilizzata da Polanyi (Par. 2.2.3); vedere Polanyi, M. (1958) *Personal Knowledge, Towards a Post-critical Philosophy* (London: Routledge & Kegan, 1958), versione utilizzata Polanyi (1962), (corrected ed., London: Routledge & Kegan Ltd, 1962), p. 13.

che hanno ottenuto risultato diverso. In questo contesto, Popper ritiene che la scelta della comunità scientifica di considerare i risultati di Miller causati da una sconosciuta sorgente d'errore sia stata un'operazione razionale. La storia implicita che ne deriva appare alquanto semplice.

Alcuni dei filosofi successivi che trattarono il caso ribaltarono, però, l'immagine della razionalità della comunità accademica anche utilizzando, probabilmente, le stesse fonti.

2.2.3. Polanyi

Nel proseguo del dibattito novecentesco tra filosofi della scienza, il caso Miller viene spesso citato come esempio di tesi contrapposte tra coloro che cercavano criteri e metodologie razionali della scienza, come Popper e Lakatos, e chi desiderava dimostrare l'esistenza di elementi irrazionali nei processi scientifici. Viste le forti diversità nelle ipotesi di fondo è naturale che le versioni storiche appaiano profondamente diverse. In ordine cronologico il secondo influente filosofo della scienza ad adoperare gli esperimenti di Miller nelle proprie argomentazioni fu Michael Polanyi (1891-1976) che aveva obiettivi del tutto diversi da Popper e, come vedremo, da Lakatos.

Negli anni '50, il filosofo della scienza, economista e chimico Polanyi scrive una narrazione implicita degli avvenimenti legati agli esperimenti di Miller e alle reazioni della comunità scientifica che ha avuto una certa rilevanza nell'immagine attuale della storia di tale caso.⁷ Polanyi utilizza gli esperimenti di Miller, per la prima volta nel capitolo "*Scientific Convictions*" del trattato *The Logic of Liberty*, come esempio di atteggiamento della comunità scientifica verso esperimenti contrari alla teoria dominante. Polanyi descrive così l'atteggiamento della comunità scientifica contemporanea agli esperimenti di Miller:

The firmness of our belief in the new epistemologically sifted conception of space and time may be illustrated by the following event. In 1925 the American Physicist D.C. Milner [sic] repeated, for the first time after a generation, Michelson's experiment on which the theory of relativity was originally based. Equipped with the most modern instruments, he thought he had right to check up on these rather hoary observations of a great master. His results contradicted those of Michelson and he announced this to a representative gathering of

⁷ Essa fu ripresa anche nella diffusa biografia di Einstein: Clark, R. W. (1973) *Einstein, the Life and Times*, (London/Sydney/Auckland/Toronto: Hodder and Stoughton, 1973), p. 316.

*physicists- But not one of them thought for a moment of abandoning relativity. Instead – as Sir Charles Darwin once described it- they sent Milner [sic] home to get his results right.*⁸

Il resoconto di Polanyi riguarda la reazione della comunità scientifica agli annunci dei risultati di Miller: essa appare scettica nei confronti dei suoi dati sperimentali perché la relatività era già diventata un credo strutturato. Polanyi non distingue qui tra teoria della relatività ristretta e generale, considerando implicitamente la relatività come un unico programma di ricerca. Polanyi non cita fonti, tranne l'espressione di Sir Charles G. Darwin (vedi nota 6), ma non esistono elementi per capire se si tratti di fonti scritte o di comunicazioni verbali. Nonostante questa evidente mancanza di metodologia storica, le affermazioni di Polanyi costituiscono una parte rilevante di storia implicita della reazione agli esperimenti di Miller. Solo in un trattato successivo (1958) si renderà evidente che l'unica fonte è proprio Darwin e si chiarificherà meglio il contesto. Anche in questo caso l'esempio storico ha una sua chiara funzione come sostegno di una tesi sull'atteggiamento epistemologico della comunità scientifica. Polanyi ha l'intenzione di sottolineare l'importanza delle convinzioni teoriche rispetto alla verità sperimentale e la reazione all'annuncio di Miller viene utilizzata come esempio della fede della comunità scientifica verso la relatività nel periodo in questione. Secondo Polanyi, tale fede fece compiere un atto di rifiuto privo di un atteggiamento critico-metodologico razionale.

*Whether any particular discovery is recognized and developed further, or discouraged and perhaps even smothered at birth, will depend on the kind of belief or disbelief which it evokes among scientific opinion.*⁹

Nel trattato *Personal Knowledge* del 1958 l'esempio di Miller trova uno spazio maggiore, con diversi elementi che nel 1951 erano del tutto assenti.¹⁰ Appare chiaro che la fonte citata nel precedente trattato sia il discorso presidenziale che Sir Darwin tenne nel 1938 (nota 6). Esiste un articolo del 1939 di Darwin che ripete le affermazione sugli esperimenti di Miller del discorso inaugurale dell'anno precedente. L'articolo di Darwin è sulla metodologia scientifica e i suoi toni sono molto meno netti rispetto a quelli di Polanyi (1951), come

⁸ Polanyi (1951), *op. cit.*, p. 12.

⁹ *Ibid.*, p. 11.

¹⁰ Polanyi, M. (1958) *Personal Knowledge: Towards a Post-Critical Philosophy* (London: Routledge and Kegan Paul Ltd, 1958).

meno nette sono le sue affermazioni sulla prassi scientifica. Darwin polemizza con l'approccio logico alla confutazione sperimentale ed evidenzia l'importanza di un atteggiamento probabilistico nel valutare teorie ed esperimenti:

For some twenty years the theory of relativity grew enormously, based on this one experiment [the Michelson-Morley experiment], and then it was felt that it would be proper for some one else to repeat the work, and Dr. Dayton Miller undertook the task. We cannot see any reason to think that his work should be inferior to Michelson's, as he had at his disposal not only all the experience of Michelson's work, but also the very great technical improvements of the intervening period, but in fact he failed to verify the exact vanishing of the ether drift. What happened? Nobody doubted relativity. There must therefore be some unknown source of error which had upset Miller's work.¹¹

Concentrandoci solo sulle affermazioni storiche, vediamo che Darwin generalizza un suo atteggiamento come se fosse quello di tutta la comunità scientifica. Considera il suo atteggiamento razionale perché:

We do not believe in relativity because of the Michelson-Morley experiment; it is one, and an important one, of a number of cumulative pieces of evidence which all fit together, and it is this cumulation and not any one of its pieces that makes us believe in relativity.¹²

L'approccio metodologico di Darwin è basato sul concetto di probabilità come elemento fondamentale nella scelta di un impianto teorico una volta che venga considerato tutto l'insieme dei dati sperimentali a disposizione.

La visione di Polanyi della prassi scientifica lo aveva portato, invece, a dipingere un'immagine ingigantita dell'atteggiamento di incredulità della comunità scientifica rispetto ai dati di Miller. Un'altra interessante affermazione di Darwin è quella concernente il fatto che la relatività fosse basata sull'esperimento di Michelson-Morley. Questo tema troverà approfondito spazio nel corso della mia tesi, sia nella discussione in merito alla sua veridicità storica, sia nella percezione che si aveva del rapporto tra teoria della relatività ristretta e tale esperimento nella prima metà del secolo XX.

¹¹ Darwin (1939), *op. cit.*, p. 51.

¹² Darwin (1939), *op. cit.*, pp. 51-2

Polanyi, nel 1958, fa affermazioni meno nette, citando le frasi di Darwin senza esacerbarne il contenuto. Seppur con atteggiamento metodologicamente corretto rispetto alle fonti, Polanyi le usa per fare asserzioni diverse che hanno probabilmente avuto un'influenza su alcune tesi anti-relativistiche contemporanee. Polanyi inizia con il far proprie le tesi di Miller del 1933,¹³ affermando che l'esperimento di Michelson-Morley era non nullo anche se inferiore alle aspettative e fu in seguito valutato da Miller come 9 km/s. A questo aggiunge:

*An effect of the same magnitudo was reproduced by D.C. Miller and his collaborators in a long series of experiments extending from 1902 to 1926, in which they repeated the Michelson-Morley experiment with new, more accurate apparatus, many thousand of times.*¹⁴

Come vedremo, queste tesi sono identiche a quelle contenute nell'articolo di Miller (1933). Polanyi, quindi, ha utilizzato acriticamente l'articolo più noto e strutturato di Dayton C. Miller. Polanyi è anche più preciso rispetto al meeting già citato in (1951) nel quale alle dichiarazioni di Miller gli scienziati avrebbero reagito con incredulità a causa della loro fede dogmatica nella relatività. Si tratta della comunicazione presidenziale dell'*American Physical Society (APS)* in cui Miller espone i suoi risultati sperimentali il 29 dicembre 1925 nel meeting congiunto con l'*American Association for the Advancement of Science (AAAS)*. Nel Cap. 5 vedremo come le reazioni della comunità scientifica dopo questo convegno siano state ambivalenti e la trattazione storica debba essere molto più complessa. Secondo Polanyi un atteggiamento puramente razionale avrebbe dovuto portare la platea a sospendere il giudizio fino a nuove prove:

*But no: by that time they had so well closet their minds to any suggestion which threatened the new rationally achieved by Einstein's world-picture, that it was almost impossible for them to think again in different terms. Little attention was paid to the experiments, the evidence being set aside in the hope that it would one day turn out to be wrong.*¹⁵

¹³ Miller, D. C. (1933) "The Ether-Drift Experiment and the Determination of the Absolute Motion of the Earth", *Reviews of Modern Physics*, 5 (1933): 203-42.

¹⁴ Polanyi, M. (1958), *op. cit.*, p. 12.

¹⁵ Polanyi, M. (1958), *op. cit.*, p. 13.

Polanyi afferma, inoltre, che gli unici a dare valore agli esperimenti di Miller furono i fisici sovietici per ragioni ideologiche. La fonte di questa affermazione è la moglie di Paul Ehrenfest (1880-1933), che in quel periodo era professore in U.R.S.S. Polanyi continua poi la sua analisi dando ragione a John Lighton Synge (1897-1995):¹⁶

*The Special Theory of relativity is accepted on other grounds than the experiments of Michelson and Morley. Among these are the observations by G. Joos [...], R.J. Kennedy [...], K.K. Illingworth [...], Michelson, Pease and Pearson [...], which have shown the absence of ether drift by other methods than the Michelson interferometer.*¹⁷

Polanyi cita la spiegazione teorica di Synge e conclude la sua discussione storica degli esperimenti di Miller citando la soluzione trovata da Shankland e i suoi collaboratori nel 1955,¹⁸ poco prima della pubblicazione del suo trattato.

*More recently, some of Miller's original data sheets have been analysed by R.S. Shankland [...] who conclude that the apparent ether drift was simulated by statistical fluctuations and temperature effects.*¹⁹

Nella modalità con cui ora Polanyi tratta il caso Miller appare evidente così la rilevanza di avvenimenti scientifici avvenuti tra 1951 e il 1958. Tra la prima versione della storia, che potremmo chiamare la versione forte, e l'ultima vi sono le pubblicazioni di Synge e Shankland, che hanno fornito delle spiegazioni ai dati di Miller. Polanyi in (1958) cita entrambe le spiegazioni senza prendere posizione sulla validità di queste, ma il fatto che l'argomento sia stato affrontato a livello scientifico, con possibili soluzioni al problema, ha indotto Polanyi a mitigare le sue tesi. Rispetto alla versione forte, inoltre, la nuova rivela alcune fonti, almeno nella seconda parte della sua discussione. La storia tracciata, ad ogni modo, risulta ancora non precisa e rimane ancorata alla necessità di Polanyi di utilizzare questo caso come dimostrazione della falsità dell'affermazione che:

¹⁶ Synge, J. L. (1952) "Effects of Acceleration in the Michelson-Morley experiment", *Scientific Proceedings of the Dublin Royal Society*, 26 (1952): 45-54.

¹⁷ Polanyi (1958), *op. cit.*, p. 13.

¹⁸ Shankland, R. S. (1955) "New Analysis of the Interferometer Observations of Dayton C. Miller", *Reviews of Modern Physics*, 27 (1955): 167-78.

¹⁹ Polanyi (1958), *op. cit.*, p. 13.

Science is simply based on experiments which anybody can repeat at will.

[The experience of Miller] shows that any critical verification of a scientific statement requires the same powers for recognizing rationality in nature as does the process of scientific discovery, even though it exercises these at a lower level.²⁰

Polanyi, inoltre, fa un'altra importante affermazione sull'accettazione della relatività che verrà presa in considerazione nel corso della tesi:

At the time that Miller announced his results, relativity had yet made few predictions that could be confirmed by experiment. Its empirical support lay mainly in a number of already known observations. The account which the new theory gave of these known phenomena was considered rational, since it derived them from one single convincingly rational principle.²¹

Polanyi dà ampio spazio al caso Miller perché esso fornisce molti spunti per la sua visione filosofica, contrariamente a Popper, che lo cita a malapena in una nota. La visione che ne scaturisce è quella di un esperimento chiaramente contrario alla teoria della relatività ristretta e di una comunità scientifica che non dà peso ad esso perché in contrasto con la propria presa di posizione antecedente. Un agire, questo, difficile da inserire in una qualsiasi metodologia razionale.

2.2.4. Lakatos

Di altro avviso è Imre Lakatos (1922-1974) che cita Miller nella sua trattazione della storia degli esperimenti del tipo Michelson-Morley inserita nell'articolo sulla metodologia dei programmi di ricerca scientifici.²² Nel discorso di Lakatos, l'esperimento di Michelson-Morley e le sue ripetizioni diventano un interessante esempio della non esistenza dell'*experimentum crucis*. Tali esperimenti vengono inseriti nel contesto della lotta tra due programmi di ricerca: quello relativista e quello dell'etere. Secondo Lakatos solo dopo che il programma avviato da Einstein aveva soppiantato l'altro in maniera definitiva, per varie e complesse ragioni, l'esperimento di Michelson e Morley del 1887 venne visto, *a posteriori*, come *crucis*.

²⁰ Polanyi (1958), *op. cit.*, p. 13.

²¹ Polanyi (1958), *op. cit.*, p. 13.

²² Lakatos, I. (1970) "Falsification and the methodology of scientific research programme", in Lakatos, I., e Musgrave, A. (eds.) *Criticism and the Growth of Knowledge* (Cambridge: Cambridge University Press, 1970): 91-195.

La storia della reazione della comunità accademica agli esperimenti di Miller costituisce una delle principali argomentazioni a favore della tesi:

Even when a research programme is seen to be swept away by its predecessor, it is not swept away by some 'crucial' experiment; and even if some such crucial experiment is later called in doubt, the new research programme cannot be stopped without a powerful upsurge of the old programme.²³

L'esperimento cruciale di cui parla Lakatos è proprio il Michelson-Morley e il dubbio su di esso si riferisce alle affermazioni di Miller, che non hanno portato la comunità accademica a diffidare del programma di ricerca relativista. Lakatos utilizza, così, il caso Miller per confutare il falsificazionismo ingenuo e l'esistenza nella storia della fisica di *experimenta crucis* che, da soli, riescano ad essere causa decisiva nella scelta tra due teorie contrastanti, e sottolinea in maniera chiara le sue differenze da Polanyi nell'interpretazione di questo evento.

Polanyi tells us with gusto how, in 1925, [...] Miller announced that [...] he had 'overwhelming evidence' for an ether-drift; yet the audience remained committed to Einstein's theory. Polanyi draws the conclusion that no "objectivist" framework can account for the scientist's acceptance or rejection of theories [...].

But my reconstruction makes the tenacity of the Einsteinian research programme in the face of alleged contrary evidence a completely rational phenomenon and thereby undermines Polanyi's 'post-critical'-mystical message.²⁴

Lakatos critica aspramente Polanyi, ma sembra prendere da questi alcune informazioni sulla storia dell'accoglienza delle affermazioni di Miller. Queste qui diventano un elemento a favore della tesi che, se anche l'esperimento di Michelson-Morley avesse ottenuto risultato positivo, il programma di ricerca di Einstein sarebbe progredito ugualmente. Proprio in questo contesto, il caso Miller diventa emblematico.

²³ Ibid., p. 163.

²⁴ Lakatos (1970), *op. cit.*, p. 163 [enfasi di Lakatos].

When Miller, an ardent champion of the classical ether programme, published his sensational claim that the Michelson-Morley experiment was sloppily conducted and in fact there was an ether wind, the news correspondent of Science crowed that 'Professor Miller's results knock out the relativity theory radically'. In Einstein's view, however, even if Miller had reported the true state of affairs '[only] the present form of relativity theory' would have to be abandoned. In fact, Synge pointed out that Miller's results [...] do not conflict with Einstein's theory: only Miller's explanation of them does. One can easily replace the extant auxiliary theory of rigid bodies by a new, Gardner-Synge theory, and then Miller's results are fully digested within Einstein's programme.²⁵

La trattazione del caso Miller da parte di Lakatos è pieno di spunti che sono da riconsiderare con un appropriato approfondimento storiografico. La citazione di Lakatos del corrispondente manca del nome dell'autore, Ludwik Silberstein (1872-1948), che, come vedremo, era critico verso la teoria della relatività generale ben prima degli esperimenti di Miller. Lakatos, inoltre, enfatizza nella frase di Einstein le parole “*present form*” aggiungendo “[*only*]” che stravolge il senso del rapporto di Einstein con gli esperimenti di Miller come potremo vedere nel Cap. 5.

Anche sulla conclusione del problema Miller, le scelte storiografiche di Lakatos sono fortemente dettate dalle sue tesi sulla metodologia dei programmi di ricerca scientifici. In Lakatos appare, infatti, enfatizzato il ruolo di Gardner-Synge nella spiegazione del caso Miller all'interno del programma di ricerca relativista, mentre la spiegazione di Shankland non compare assolutamente. La soluzione di Shankland era quella accettata all'interno del programma di ricerca relativista, al contrario della proposta Gardner-Synge, e Lakatos ne era a conoscenza se aveva letto, come sembra dalla bibliografia, Polanyi (1958).

La spiegazione di Gardner-Synge era evidentemente un esempio più significativo perché comportava un cambio teorico di un certo peso all'interno delle teorie della relatività, mentre la spiegazione di Shankland spiegava il risultato di Miller come effetto locale dovuto alla temperatura e, quindi, non influiva assolutamente sull'impianto del programma di ricerca così come proposto da Einstein, il quale, infatti, non apprezzò il tentativo compiuto da Synge.²⁶ La ricostruzione storica effettuata da Lakatos ha, così, alcuni elementi comuni a

²⁵ Lakatos (1970), *op. cit.*, p. 163. [tutte le enfasi sono di Lakatos, anche quelle contenute nelle citazioni]

²⁶ Vedere Shankland, R. S. (1963) “Conversations with Albert Einstein”, *American Journal of Physics*, 31 (1963), 47-57.

quella di Polanyi: la comunità scientifica non accettò l'esperimento di Miller perché il programma di ricerca relativista era troppo ben avviato e un singolo esperimento non poteva minarne l'accettazione. È diverso solo il giudizio di razionalità che Lakatos dà di questo processo, ma non la storia implicita del processo stesso. Tale visione, come quella di Polanyi, non considera le altre ripetizioni sperimentali ed è dovuta alle sue necessità argomentative, ma la storia implicita che ne nasce ha ancora una certa influenza nella conoscenza diffusa del caso Miller.

2.2.5. Feyerabend

Un altro noto utilizzo del caso Miller si trova nella prima edizione del trattato *Against Method* di Feyerabend, dove egli afferma brevemente:

La teoria speciale della relatività fu conservata nonostante chiari risultati sperimentali in conflitto con essa ottenuti nel 1906 da Kaufmann e nonostante la confutazione di D.C. Miller (parlo di confutazione perché l'esperimento dal punto di vista delle tecniche sperimentali dell'epoca, fu condotto non meno bene degli anteriori esperimenti di Michelson e Morley).²⁷

A parte una concisa nota successiva, questa è l'unica citazione che Feyerabend fa, nei suoi scritti, dell'opera di D. C. Miller. In questa frase vi sono due informazioni storiche: l'esperimento di Miller era accurato e costituiva una confutazione della teoria della relatività ristretta che venne, però, conservata. Nella seconda edizione dello stesso trattato, pubblicato nel 1988, troviamo che la citazione di Miller ha subito un deciso ridimensionamento:

*The special theory of relativity was retained despite Kaufmann's unambiguous results of 1906 and despite D.C. Miller's experiments.*²⁸

In questa ancor più concisa espressione sono scomparsi sia il termine confutazione sia la valutazione sull'accuratezza dell'esperimento. Probabilmente Feyerabend ha avuto qualche

²⁷ Feyerabend, P. (1975) *Against Method: Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge* (1st ed.: London: New Left Books, 1975) citazioni da trad. it. *Contro il metodo: Abbozzo di una Teoria anarchica della conoscenza* (Milano: Feltrinelli, 2005), p. 47.

²⁸ Feyerabend, P. (1993) *Against Method. Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge* (3rd ed. New York: Verso, 1993), p. 40.

critica o, quanto meno, ha attinto ad informazioni che hanno mitigato la visione degli esperimenti di Miller che lui aveva descritto nella precedente edizione.

L'affermazione del 1988 non propone un'immagine storica del caso Miller, che viene utilizzato, a fianco dei risultati di Kaufmann del 1906, come esempio di esperimenti non conformi alla teoria della relatività ristretta, ma che non furono così influenti da farla abbandonare. Nelle note, però, Feyerabend mantiene, in entrambe le edizioni, le stesse espressioni che aggiungono altre informazioni storiche sugli esperimenti di Miller.

*Miller's work was studied by Lorentz for many years, but he could not find the trouble. It was only in 1955, twenty years after Miller had finished his experiments, that a satisfactory account of Miller's results was found.*²⁹

Feyerabend evidenzia così il lato problematico dei risultati di Miller, tanto importante da essere studiato per anni da uno dei massimi teorici dell'epoca. Tale questione fu risolta, secondo Feyerabend, solo nel 1955, ossia con il lavoro di Shankland e dei suoi collaboratori. Unendo a queste affermazioni, l'asserzione di Feyerabend che la teoria della relatività ristretta fu mantenuta nonostante i dati contrari degli esperimenti di Miller appare chiaramente il quadro storico degli avvenimenti proposto dal filosofo viennese. La seconda versione produce nel lettore un'impressione simile alla prima, anche se alcune espressioni forti sono state eliminate. Le fonti utilizzate da Feyerabend sono le conversazioni di Shankland ed Einstein pubblicate nel 1963³⁰ e il convegno svoltosi a Pasadena del 1927 sull'esperimento di Michelson-Morley e sulle sue ripetizioni.³¹ A questo convegno parteciparono Miller, Albert A. Michelson (1852-1931), Roy J. Kennedy, H. A. Lorentz (1853-1928), Paul S. Epstein (1883-1966) e il prof. E. R. Hedrick della *University of California*.

Gli atti della conferenza furono pubblicati a dicembre del 1928 su *The Astrophysical Journal*, e sono uno degli articoli sugli esperimenti di Miller più conosciuti e più citati. È ragguardevole il fatto che tra i partecipanti ci fossero Michelson, Miller e Lorentz, ma se presa come unica fonte può creare una visione distorta, in particolare del rapporto di

²⁹ Feyerabend (1993), *op. cit.*, p. 41.

³⁰ Shankland (1963), *op. cit.*

³¹ Michelson et al. (1928) "Conference on the Michelson-Morley Experiment: Held at the Mount Wilson Observatory Pasadena California, February 4 and 4, 1927", *The Astrophysical Journal*, 63 (1928): 341-402.

Lorentz con gli esperimenti di Miller. Rimandando l'analisi sul contesto di tale conferenza nel capitolo dedicato a Miller (Cap. 5), qui mi limito a inquadrare le affermazioni storiche di Feyerabend all'interno del suo discorso generale, visto che queste hanno avuto una notevole influenza sulla conoscenza attuale degli esperimenti di Miller. Il capitolo in cui Feyerabend cita Miller ha l'obiettivo di dimostrare che nessuna teoria è d'accordo con tutti i fatti conosciuti, e che questo disaccordo non dipende dalla non attendibilità delle procedure sperimentali. Per Feyerabend il caso Miller è un esempio di uno dei due disaccordi tra teoria e fatto, quello numerico, definito in questo modo:

Una teoria fa una certa predizione numerica e il valore che viene ottenuto nella realtà differisce dalla predizione fatta più di quanto non consenta il margine d'errore³²

Le sintetiche asserzioni di Feyerabend sugli esperimenti di Miller rientrano in questa convinzione generale. In tale contesto, tutte le complessità legate alla storia vengono eliminate, ma non per questo risulta meno condizionante l'immagine storica dell'avvenimento che ne risulta. Feyerabend, perciò, si trova ad enfatizzare l'importanza degli esperimenti di Miller, citando il presunto lavoro di Lorentz, e l'accuratezza dell'esperimento, senza per nulla citare le ripetizioni successive con risultato nullo.

È interessante qui sottolineare un'altra tesi di Feyerabend che risulta significativa rispetto al tema del rapporto di Einstein con gli esperimenti di Miller. Esiste una polemica storiografica sull'attitudine di Einstein verso gli esperimenti basata su due immagini opposte: la prima presenta Einstein quasi come un falsificazionista ingenuo, l'altra afferma che il creatore delle teorie della relatività metteva gli esperimenti in secondo piano rispetto al valore intrinseco di una teoria. Feyerabend contesta la visione, proposta da Popper e ripresa recentemente da Hentschel,³³ di un Einstein che avrebbe rinunciato alla sua teoria nel caso di chiare indicazioni contrarie degli esperimenti. Feyerabend parla, invece, di un "atteggiamento di scarso rispetto nei confronti degli esperimenti [che] esisteva in lui [...] già dal principio".³⁴

³² Feyerabend (2005), *op. cit.*, p. 46.

³³ Hentschel, K. (1992) "Einstein's attitude towards experiments: testing relativity theory 1907-1927", *Studies on History and Philosophy of science*, 23 (1992): 593-624.

³⁴ Feyerabend (2005), *op. cit.*, p. 48.

Su questo argomento tornerò in seguito, con la convinzione che uno sguardo alla complessità della storia degli esperimenti di Miller possano gettare luce anche su questo dibattito. Feyerabend, com'è noto, non credeva si potesse definire un metodo scientifico realmente in grado di guidare una comunità scientifica nella sua prassi quotidiana o che fosse stata seguita storicamente dalla comunità scientifica nel delimitare un contesto scientifico da uno pseudo-scientifico. È fin troppo semplice dire che una tesi così forte, come tutte le trattazioni filosofiche qui presentate, porti a distorcere il reale corso della storia.

2.2.6. Zahar

Le storie implicite finora esposte hanno tutte avuto una certa rilevanza nella storiografia sugli esperimenti di Miller. Esistono anche altri epistemologi che hanno considerato d'interesse il caso, ma le storie implicite da essi presentate hanno avuto una diffusione decisamente inferiore. Ho scelto di trattare anche questi altri casi, indipendentemente dall'influenza che essi hanno sulla storiografia concernente gli esperimenti di Miller.

Elie Zahar ha affrontato un tema correlato di notevole interesse epistemologico che si iscrive nelle questione generale della reazione agli annunci di Miller. In particolare, Zahar analizza la reazione e le affermazioni di due scienziati: Albert Einstein e Max Born (1882-1970).³⁵ Zahar descrive il caso Miller in questo modo:

In 1926 D. C. Miller claimed to have performed a variant of the Michelson-Morley experiment, thereby establishing a result which contradicts Special Relativity [...]. The experiment was repeated but no results similar to Miller's were obtained. According to the conventionalist view, Miller's alleged basic statements have no objective value, hence need not be taken seriously by science. But M. Born, far from ignoring Miller's claim, paid a visit to Miller and inspected his experimental set up- he concluded that the instruments used by Miller were unreliable [...]. The phenomenological thesis, as opposed to its conventionalist rival, provides a rationale for Born's attitude.³⁶

³⁵ Zahar, E. (1983) "The Popper-Lakatos Controversy in the Light of 'Die Beiden Grundprobleme der Erkenntnistheorie'", *The British Journal for the Philosophy of Science*, 34 (1983): 149-71.

³⁶ Zahar, E. (1983), *op. cit.* p. 158.

Nel proseguo afferma che anche l'atteggiamento di Einstein fu razionale rispetto alle ripetizioni degli esperimenti. Visto che nessuna di queste aveva confermato i dati di Miller, era logico non considerare gli esperimenti di Miller una confutazione, ma Zahar considera maggiormente razionale l'atteggiamento di Born che volle vedere lo strumento delle misure di Miller:

But given the crucial nature of the experiment, Born wisely decided to go much further than Einstein: he effectively refused [...] the clause [...] stating that the instruments used by Miller were reliable. [...] both Einstein and Born agreed that Miller truthfully reported what he saw.

L'approccio di Zahar deriva dalla tesi di Duhem-Quine secondo cui un esperimento non si relaziona solo ad una singola teoria ma a tutto un insieme di affermazioni esplicite ed implicite. Se una teoria è messa in relazione con più esperimenti simili e solo uno di essi sembra confutarla, mentre tutti gli altri confermano la teoria, è probabile che si debba tener conto di caratteristiche specifiche dell'esperimento confutante e non della teoria generale che è sotto giudizio sperimentale. L'analisi di Zahar ripropone, così, il concetto di probabilità che era già stato utilizzato da Sir Darwin per descrivere la reazione della comunità scientifica del periodo ai dati di Miller. L'utilizzo di avvenimenti storici a favore di questa tesi si basa, però, su presupposti alquanto diversi da quelli di Darwin. Zahar è il primo filosofo, dopo Popper, ad evidenziare l'importanza degli esperimenti successivi, con risultato nullo, nella scelta della comunità scientifica di non considerare validi i risultati di Miller. Il giudizio di razionalità di Zahar si basa proprio sul fatto che il risultato di Miller non venne confermato da nessuno. Per portare avanti la sua tesi, però, Zahar compie una forzatura storiografica che inficia le basi delle sue argomentazioni. Einstein e Born, infatti, si relazionarono con gli esperimenti di Miller quando la prima ripetizione non era stata ancora eseguita. Born, che si trovava a Pasadena nell'inverno 1925-26, approfitta della vicinanza e visita Miller al *Mount Wilson Observatory* durante le osservazioni del febbraio 1926.³⁷ La prima ripetizioni fu compiuta da Auguste Piccard solo nel luglio 1926 e senza

³⁷ Born descrive l'episodio nel 1965: "In un primo tempo Miller affermò di aver scoperto, per mezzo di un grande interferometro di Michelson, il "vento d'etere" prodotto dal moto della Terra; qualche tempo dopo ritirò quest'affermazione in quanto lo spostamento delle frange d'interferenza da lui trovato era troppo piccolo (credo che abbia poi attribuito tale spostamento al moto del sistema solare). Quando nel 1925-26 mi recai negli Stati Uniti, ferveva ancora la discussione sulle misure eseguite da Miller. Andai perciò a trovarlo a Mount Wilson, presso Pasadena, e mi feci mostrare l'apparecchio in funzione. Era un uomo piccolo e modesto, che ben volentieri mi lasciò armeggiare col

che il risultato potesse confutare le conclusioni di Miller.³⁸ Con una lettura storica dei documenti privati riguardanti la reazione di Born, il quadro risulta diverso da come viene presentato da Zahar. Einstein, inoltre, si occupa dell'esperimento di Miller da subito ed afferma il suo giudizio negativo su di essi ben prima delle ripetizioni, a cui, ad ogni modo risulta interessato. Le reazioni dei due scienziati e quella di altri scelti come indicativi dell'atteggiamento della comunità accademica, verranno affrontati in seguito (Cap. 5) e disegnano un panorama composito. Nel caso di Born e di Einstein le altre ripetizioni giocarono un ruolo del tutto secondario sul giudizio che essi avevano sull'esperimento e la visita di Born non fece che confermare un giudizio che egli si era fatto su basi teoriche.³⁹

2.2.7. Laymon

Gli esperimenti di Miller, i suoi risultati e le diverse interpretazioni di questi hanno trovato maggiore spazio in alcuni articoli di Ronald Laymon scritti all'interno del dibattito su quanto la contrazione di Lorentz-Fitzgerald fosse un'ipotesi *ad hoc*. Laymon contesta le posizioni di Adolf Grünbaum sull'indipendenza degli esperimenti di Michelson-Morley e Kennedy-Thorndike nel rendere l'ipotesi di contrazione di Lorentz-Fitzgerald falsificabile.⁴⁰

suo gigantesco interferometro. Trovai l'apparecchio molto instabile e di scarsa affidabilità: bastava un leggero movimento della mano o un colpo di tosse a confondere talmente le frange d'interferenza da rendere impossibile la lettura. Da quel momento persi completamente fiducia nei risultati ottenuti da Miller; conoscevo invece, fin dal mio soggiorno a Chicago nel 1912, l'affidabilità degli apparecchi usati da Michelson e l'esattezza delle sue misure. Il mio scetticismo è stato confermato dalle ulteriori ricerche, e oggi il risultato ottenuto da Michelson, che cioè non esiste un "vento d'etere", è universalmente accettato", in Einstein A. e Born, H. e M. (1969) *Briefwechsel 1916-1955* (München: Nymphenburger GmbH., 1969), versione utilizzata trad. it. *Scienza e Vita: lettere 1916-1955* (Torino: Einaudi, 1973), pp. 88-89. La moglie di Born aveva scritto ad Einstein l'impressione di Born pochi mesi dopo l'accaduto. "Tra l'altro Max ha assistito a Mount Wilson agli esperimenti di Miller ed è rimasto sbalordito dalla trascuratezza con cui vengono eseguiti", Lettera di Hedwig Born ad A. Einstein, 11 aprile 1926, in *ibid.*, p. 107.

³⁸ Piccard, A., e Stahel, E. (1926) "L'expérience de Michelson, réalisée en ballon libre", *Comptes Rendus*, 183 (1926): 420-21.

³⁹ Nel 1922, dopo i primi esperimenti di Miller a Mount Wilson, Born aveva scritto ad Einstein: "Caro Einstein di recente è stata qui una studiosa di fisica, attualmente residente in Olanda, e ci ha detto che l'esperimento di Michelson è stato ripetuto in America, questa volta con risultato positivo: ne avrebbe dato notizia H. A. Lorentz. Ne sai nulla? Poiché l'esperimento di Michelson è una di quelle cose che sono "praticamente" vere a priori, non credo una parola di queste voci; ma noi tutti saremmo grati se trovassi il tempo di scriverci due righe in proposito", Born a Einstein, 6 agosto 1922, in *ibid.*, p. 86.

⁴⁰ Laymon, R. (1980a) "Independent Testability: The Michelson-Morley and Kennedy-Thorndike Experiments", *Philosophy of Science*, 47 (1980): 1-37. Le posizioni di Grünbaum riguardo questo argomento si trovano in Grünbaum, A. (1959) "The Falsifiability of the Lorentz-Fitzgerald Contraction Hypothesis", *The British Journal for the Philosophy of Science*, 10 (1959): 48-50; Grünbaum, A. (1960) "Logical and Philosophical Foundations of the Special Theory of Relativity", in Danto, A. e Morgenbesser, S. *Philosophy of Science* (New York: Meridian Books, 1960): 399-434, e Grünbaum, A. (1963) *Philosophical Problems of Space and Time* (New York: Knopf, 1963). L'esperimento di Kennedy-Thorndike, comunemente noto come un esperimento corroborante la teoria della relatività ristretta, in particolare della trasformazione di Lorentz della coordinata temporale, fu pubblicato nel 1932 in Kennedy, R. J. e Thorndike, E. M. (1932) "Experimental Establishment of the Relativity of Time", *Physical Review*, 42 (1932): 400-18.

Laymon, nella sua dimostrazione della profonda similitudine tra i due esperimenti sopra citati affronta il lavoro di Miller così come appare nell'articolo del 1933 e la spiegazione data da Shankland e i suoi collaboratori nel 1955. Laymon usa gli articoli Miller (1933) e Shankland et al. (1955) sia come fonte storica che come spunto per riflessioni metodologiche e, nel far questo, sottolinea alcune questioni storiche riguardanti gli esperimenti di Miller e la loro soluzione. La discussione di Laymon risulta la più dettagliata all'interno della letteratura filosofica, perché considera approfonditamente le ripetizioni dell'esperimento di Michelson-Morley con l'obiettivo di evidenziare quali caratteristiche queste avevano in comune. Laymon si pone il problema di capire perché le caratteristiche comuni erano tali da renderli ripetizioni di uno stesso esperimento, contrariamente a quanto avvenne per l'esperimento di Kennedy-Thorndike, che venne considerato di altro tipo. Laymon è, quindi, il filosofo della scienza che ha avuto un maggiore interesse nel considerare l'opera di Miller perché poteva essere un buon esempio per le sue teorie metodologiche.⁴¹ Per questo Laymon approfondisce il rapporto tra gli esperimenti di Miller e le successive ripetizioni, affermando:

*After Miller had announced his positive results there was considerable interest in repeating the Michelson-Morley experiment with an eye to testing specifically for the correctness of Miller's claimed direction of absolute motion. Is this now to count as defining a distinct experiment type or is this aim somehow to be subsumed under the more general one of determining an absolute direction and speed?*⁴²

La domanda finale di Laymon pone un problema fondamentale del caso qui trattato dal punto di vista metodologico: se gli obiettivi per cui un esperimento è realizzato sono tra le caratteristiche che lo definiscono o meno e porta a chiedersi cosa si intende per esperimenti del tipo Michelson-Morley. Nel proseguo considererò cosa accadde dal punto di vista storico senza addentrarmi in problematiche metodologiche, ma comprendere come furono considerati storicamente tali esperimenti potrà costituire un ampliamento delle discussioni filosofiche e la base per ulteriori domande. Tra le questioni specifiche che Laymon pone troviamo quella del come e perché la scelta dei bracci uguali nell'esperimento di Michelson-

⁴¹ Laymon, R. (1980b) "Idealization, Explanation and Confirmation", *Proceeding of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, Vol. 1 (Chicago: University of Chicago Press, 1980): 336-50.

⁴² Laymon (1980a), *op. cit.*, p. 31.

Morley fu storicamente determinata. Questa domanda trova una risposta proprio nell'articolo di Miller (1933), più che in altri studi storici. La scelta dei bracci uguali è, secondo Laymon, totalmente inessenziale ai calcoli teorici sottesi all'esperimento, ma fu resa necessaria dall'utilizzo della luce bianca rispetto alle tecnologie dell'epoca. Fra le ripetizioni successive a quelle di Miller, Laymon si sofferma su quella di Roy J. Kennedy del 1926:⁴³

Unlike Michelson's experiment, Kennedy's interferometer utilized perpendicular mirrors, polarized light, and a minimized total path length. As a means of reducing spurious or interfering causes, Kennedy housed his apparatus in a metal enclosure that contained a helium atmosphere. However, from the point of view of the aether theory, being contained in a metal enclosure is itself an interfering cause since such an enclosure "entrains" the aether and prevents it from being causally efficacious. (See Miller 1933, p. 240.) Some support for the general approach suggested here, of defining experimental types according to aims of measurement and determination, is obtained from the fact that despite the many differences between Kennedy's 1926 and Michelson's 1887 experiments, the former was typically described as being a "repetition" and "refinement of the Michelson-Morley experiment."⁴⁴

Laymon, inoltre, evidenzia che:

The strategy followed by Michelson and later by Miller was to increase accuracy by means of increasing total path lengths. Miller, for example, increased the length of the light paths from Michelson's 2200 centimeters to over 6400 centimeters. (Miller 1933, p. 209.) However, one could not automatically claim a corresponding increase in the accuracy of the claimed experimental results since increasing path lengths served to exacerbate the problem of isolating the interferometer from disturbing thermal effects and mechanical stresses and strains. Hence, Miller undertook a series of experimental runs to demonstrate that these disturbing influences were sufficiently regular so that their effects on fringe shift could be analyzed away.⁴⁵

⁴³ Kennedy, R. J. (1926) "A Refinement of the Michelson-Morley Experiment", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 12 (1926): 621-29.

⁴⁴ Laymon (1980a), *op. cit.*, p. 28.

⁴⁵ Laymon (1980a), *op. cit.*, p. 28.

Laymon mostra, nella sua esposizione, di seguire completamente l'articolo di Miller dal punto di vista storiografico. Non è suo interesse la storia dell'esperimento, ad ogni modo fa alcune affermazioni storiche e non metodologiche che sarà interessante criticare in base a fonti diverse.

L'esempio di Miller e la storia della soluzione di Shankland del suo controverso risultato diventa, per Laymon, ancora più importante nell'articolo (1980b), in cui cerca di dimostrare la differenza tra idealizzazione teorica, spiegazione teorica e conferma sperimentale. Le fonti rimangono le stesse del precedente articolo, ma questa volta Laymon fa risaltare la differenza tra la previsione teorica della teoria della relatività ristretta e i risultati degli esperimenti del tipo Michelson-Morley che, secondo Miller non è mai stato esattamente nullo. Laymon sostiene che:

It is fortunate for the history of physics that Miller was late for his calling, as defender of the aether theory, by a few decades. By the time Miller announced his comprehensive analysis in 1933, the battle for aetherial views had long since been lost and Relativity had won the day. Nevertheless, Shankland considered it of some value to carefully appraise Miller's arguments. One curious result of Shankland's appraisal is his flat contradiction of Miller's claims to have shown that a variation of heat sources produced no corresponding change (of the appropriate sort) in fringe shift.⁴⁶

Laymon sta sottolineando una delle problematiche irrisolte della storia riguardante gli esperimenti di Miller, ossia la contraddizione tra lo stesso Miller che afferma di aver testato a sufficienza l'effetto da non poterlo ritenere dipendente da variazioni di temperatura e Shankland che reputa i risultati di Miller dipendenti proprio da questo. Laymon sostiene, inoltre, che Shankland non dà alcuna spiegazione di questo grande contrasto. Il filosofo è portato, quindi, a concludere la sua discussione che, nel caso dell'accettazione della soluzione di Shankland, "*the original idealized sketch was defended by providing a saving modal auxiliary*".⁴⁷

Proveremo a riconsiderare in seguito la teoria filosofica di Laymon applicata ad un più attento utilizzo della fonti. Limitandomi qui ad una prima critica metodologica, è necessario

⁴⁶ Laymon (1980b), *op. cit.*, p. 341.

⁴⁷ Laymon (1980b), *op. cit.*, p. 341

evidenziare che Laymon ha considerato solo due articoli pubblicati, i più importanti e noti, e non tutto il percorso.

In questo paragrafo dedicato alle “storie implicite” descritte nella filosofia della scienza, Laymon non può essere considerato a pieno titolo perché i suoi articoli, come quello di Zahar, hanno avuto scarsa risonanza presso la comunità scientifica, rispetto all’influenza di Popper, M. Polanyi, Lakatos e Feyerabend. Le storie implicite di Zahar e di Laymon sono state inserite sia per completezza bibliografica, sia perché sarà interessante paragonare le loro tesi ad una storia più dettagliata degli esperimenti di Miller anche se esse non hanno inciso sull’immagine della storia degli esperimenti di Miller diffusa presso la comunità scientifica.

2.2.8. Conclusioni

La filosofia della scienza si è occupata da subito delle problematiche metodologiche che il risultato di Miller implicava. Le descrizioni storiche e le informazioni rilevanti che si trovano nella letteratura epistemologica sono molto diverse tra loro e del tutto subordinate al ruolo d’esempio argomentativo per cui esse erano utilizzate. In tali riletture le fonti non sempre sono citate e, spesso, ci si raffronta con una sola di queste. Si trova qui una problematica presente in tutta la letteratura filosofica che utilizza esempi storici: da un lato il caso storico diventa un esempio avvalorante teorie metodologiche, dall’altro la teoria metodologica trasforma il caso storico nel momento stesso in cui di esso vengono sottolineate alcune caratteristiche subordinate alle argomentazioni dei diversi autori.

Come abbiamo visto, il caso Miller è stato usato sia per confermare la razionalità metodologica della prassi scientifica, sia per sottolineare elementi irrazionali nella storia della scienza, come la mancanza di una reale propensione empirista da parte della comunità scientifica in generale o di qualche scienziato in particolare. La ricerca della realtà storica è del tutto secondaria rispetto all’immagine di scienza posseduta dagli autori, ciononostante alcune delle ricostruzioni scritte in questo paragrafo sono tra le più note presso la comunità scientifica. Quando si tratta il caso Miller dal punto di vista storiografico è necessario rapportarsi con queste influenti descrizioni storiche, dato che i filosofi qui trattati hanno ritenuto i risultati degli esperimenti di Miller un interessante caso scientifico. Dalle ricostruzioni fatte da Polanyi, Lakatos, Feyerabend, e Laymon risulta che la comunità scientifica ha interagito con questi considerandoli non sufficienti a confutare un impianto

teorico come quello relativista che, al momento degli esperimenti di Miller, sembrava ben affermato, almeno per quello che concerne la relatività ristretta. Popper e Zahar, invece, evidenziano il ruolo storico svolto dalle ripetizioni con risultato non nullo nel rifiuto definitivo dei risultati di Miller da parte della comunità scientifica. In nessuna di queste ricostruzioni appaiono i dibattiti che hanno seguito gli annunci di Miller e le difficoltà teoriche interne all'esperimento stesso. Proprio nel porre una lente d'ingrandimento sulla storia degli esperimenti di Miller e sulle reazioni della comunità scientifica statunitense, può essere trovata una visione diversa da quelle finora riportate.

Al contrario degli esperimenti di Miller, l'effetto Sagnac non trova spazio nella letteratura filosofica, da cui si può dedurre che questo non fu mai considerato un problema metodologico, o che non sia stato sufficientemente noto presso la comunità scientifica come caso emblematico.

2.3. Libri di testo

2.3.1. Premessa

In una tesi di questo tipo l'utilizzo dei libri di testo di livello universitario come fonte ha una doppia valenza. Essi possono essere considerati sia una fonte primaria riguardo l'accettazione delle teorie della relatività nel suo processo storico all'interno delle diverse comunità scientifiche, sia una fonte secondaria per quanto concerne la storia implicita dei casi qui trattati in essi contenuta.

La separazione tra un utilizzo e l'altro da un lato deve essere netta e rispondere a dei criteri precisi, dall'altro lato possiede un imprescindibile senso di arbitrarietà nella scelta di tali criteri. Una domanda insita nella trattazione storiografica di eventi accaduti nel XX secolo, infatti, è: quando un libro di testo può essere considerato come fonte primaria e quando, invece, può essere ritenuto una fonte secondaria?

In questa tesi, i due criteri scelti come linea di demarcazione sono lo spazio, ossia il luogo di pubblicazione e di diffusione del testo, e il tempo, cioè l'anno di pubblicazione. Coerentemente con la scelta storiografica iniziale di studiare la storia dei casi scelti nell'ambito delle rispettive comunità scientifica, i libri di testo considerati come fonte primaria saranno quelli francesi, per il caso Sagnac, e quelli in lingua inglese che ebbero una certa presenza nelle università statunitensi, per il caso Miller.

La linea di demarcazione temporale sarà posta in modo da considerare un ampio raggio successivo agli avvenimenti studiati: in Francia dal 1914 all'inizio della Seconda Guerra Mondiale, mentre negli USA dal 1920 al 1960. Saranno considerati fonte secondaria, invece, i libri di testo diffusi negli attuali corsi universitari che hanno avuto un'influenza comprovata nella formazione dell'attuale comunità scientifica internazionale. Definire quali siano questi libri non è banale e richiederebbe uno studio a sé stante, ma si assume che le biblioteche da me consultate abbiano a disposizione tutti i testi che hanno avuto una certa rilevanza nella formazione della comunità scientifica contemporanea. Alcuni testi di particolare rilevanza saranno, perciò, considerati sia fonte primaria che fonte secondaria in contesti diversi. In questo capitolo si affronterà solo la storia implicita dei casi scelti, quando presente, così come descritta nei libri di testo utilizzati come fonte secondaria.

2.3.2. *Gli esperimenti di Miller*

Nei libri di testo gli esperimenti di Miller trovano una, seppur scarsa, risonanza nella parte riguardante il ben noto esperimento di Michelson, chiamato più spesso di Michelson-Morley. I libri di testo che trattano tale esperimento come una prova a favore della teoria della relatività ristretta tendono a minimizzare, se non addirittura a ignorare, le affermazioni di Miller. Da questi risulta che l'esperimento di Michelson-Morley ha avuto sempre un risultato nullo. Alcuni testi arrivano ad affermare che furono gli stessi Michelson e Morley a compiere osservazioni in diversi periodi dell'anno confermando l'assenza di qualsiasi effetto dovuto al vento d'etere. Su queste asserzioni, spesso storicamente imprecise, s'impenna la polemica anti-relativista sulla valenza degli esperimenti di Miller. Michelson e Morley, infatti, non affermarono in maniera netta il risultato nullo, ma soltanto che questo era molto inferiore alle aspettative, e non realizzarono mai il loro proposito di ripetere l'esperimento in diversi periodi dell'anno.

È lo stesso Miller ad evidenziare come le versioni riduttive ed erronee dell'esperimento, presenti in molti trattati dell'epoca, siano state un incentivo alla ripetizione dell'esperimento negli anni '20. Miller aveva lavorato con Morley e sapeva che l'esperimento di Michelson-Morley non era stato ripetuto e che un piccolo effetto sembrava essersi verificato, anche se inferiore a quello previsto dalle teorie dell'etere allora sotto giudizio sperimentale.

Studiando il problema nello specifico, il nome di Miller scompare gradualmente dai libri di testo, per cui mi soffermerò sulle storie implicite degli esperimenti del tipo Michelson-Morley proposte da alcuni testi contemporanei di riconosciuta rilevanza e dai testi all'interno dei quali Miller è menzionato in modo esplicito.

Uno dei pochi libri di testo che citava Miller nella trattazione dell'esperimento di Michelson-Morley è il noto *Introduction to Modern Physics* di Floyd K. Richtmyer (1881-1939).⁴⁸ Nell'edizione del 1934, la prima in cui viene introdotta la teoria della relatività ristretta come appendice, l'articolo del 1933 di Miller appare come un “*excellent Historical account*” dell'esperimento di Michelson-Morley.⁴⁹ Quando l'edizione venne ampliata, grazie all'aggiunta di E. H. Kennard in qualità di co-autore, e la teoria della relatività ristretta cominciò a far parte integrante degli argomenti trattati, sparì il giudizio di “*excellent*

⁴⁸ Richtmyer, F. K. (1934), *Introduction to Modern Physics* (2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1934). Vedere anche Goldberg, S. (1984) *Understanding Relativity: Origins and Impact of a Scientific Revolution* (Oxford: Clarendon Press, 1984), p. 281.

⁴⁹ Ibid., p. 715.

Historical account” che era stato in passato attribuito all’articolo di Miller, qui ridotto a mera citazione bibliografica.⁵⁰ Il testo di Richtmyer e Kennard, che ha avuto un certa influenza, almeno nella formazione dei fisici statunitensi, afferma che Michelson e Morley ripeterono l’esperimento in diversi periodi del giorno e dell’anno. È possibile che alcuni testi successivi continuarono ad utilizzare queste affermazioni senza controllarne la veridicità. Nel 1969, con l’aggiunta di un nuovo co-autore, J. N. Cooper, vennero introdotte alcune correzioni:

*Observations made by the Michelson method at various times of day and at different seasons of the year by physicists in different parts of the world always yielded the same negative result.*⁵¹

La ripetizione dell’esperimento citata è quella più recente, ossia quella compiuta da Cedarholm e Townes nel 1959, anch’essa con risultato nullo, al contempo il nome di Miller sparisce perché il nuovo testo risulta privo di riferimenti bibliografici nelle note a piè pagina.⁵² Questo volume, come afferma Goldberg, è uno dei più utilizzati negli *Advanced Undergraduate courses* negli USA. Oltre a darci un’indicazione del cambiamento in atto rispetto all’accoglienza della relatività all’interno di tale comunità scientifica, mostra chiaramente come, dopo la Seconda Guerra Mondiale, una generazione di fisici potesse ancora ricevere informazioni contraddittorie. Da un lato essi leggevano che il risultato dell’esperimento di Michelson-Morley era definitivo e verificato più volte, dall’altro avevano come riferimento bibliografico l’articolo di Miller che affermava decisamente il contrario. La versione del 1969, invece, appare più precisa e vicina al susseguirsi degli avvenimenti anche se gli esperimenti di Miller vennero del tutto ignorati, forse per soddisfare la necessità didattica di uniformare il sapere sull’esperimento di Michelson-Morley.

Imprecisione, questa, presente in altri libri di testo, per diversi livelli di scolarizzazione. L’esperimento di Michelson-Morley compare, infatti, nell’ottava edizione del libro di A. W.

⁵⁰ Richtmyer, F. K., e Kennard E. H. (1942) *Introduction to Modern Physics* (3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1942), p. 128. Le edizioni successive 4th e 5th ripropongono la parte dell’esperimento Michelson-Morley senza alcuna variazione.

⁵¹ Richtmyer, F. K., Kennard E. H., e Cooper, J. N. (1969) *Introduction to Modern Physics* (6th New York: McGraw-Hill, 1969), p. 52.

⁵² Cedarholm, J. P., e Townes, C. H. (1959) “A New Experimental test of Special Relativity”, *Nature*, 184 (1959): 1350-51.

Smith e J. N. Cooper, (1972) e anche qui si afferma, in maniera imprecisa, che Michelson e Morley ripeterono l'esperimento in diversi periodi dell'anno.⁵³ Questa imprecisione è spesso presente nei libri di testo sulla teoria della relatività ristretta, essendo questi volumi interessati ad un'esposizione didattica di una teoria in cui l'esperimento di Michelson-Morley ha un risultato nullo per definizione. Questi testi non considerano, quindi, in nessun caso le difficoltà sperimentali e, in questo modo, compiono affermazioni errate quando considerate in una prospettiva storica. Anche Taylor e Wheeler sostengono che Michelson e Morley ripeterono l'esperimento durante il corso dell'anno e che la velocità della luce nei due bracci dell'interferometro risultò la stessa a meno di 1/6 della velocità orbitale terrestre. Gli autori hanno la possibilità di citare come esperimento maggiormente accurato quello di Jaseja, Javan, Murray e Townes contemporaneo alla scrittura del libro, mentre il nome di Miller è del tutto assente.⁵⁴

Nelle monografie dedicate alla relatività, Miller non appare quasi mai e quando succede vi sono delle evidenti imprecisioni, per es. Schwartz, nel 1968, arriva ad affermare che Miller ha ripetuto l'esperimento di Michelson-Morley ottenendo un risultato nullo.⁵⁵

Un libro che ha avuto una notevole diffusione negli USA, e non solo, fu scritto da W. K. H. Panofsky e M. Phillips nel 1955, con una seconda edizione ampliata del 1962.⁵⁶ Gli autori dedicano un capitolo alle conferme sperimentali della teoria della relatività ristretta. In esso appare una tabella, presa dall'articolo di Shankland del 1954, in cui sono presentati tutti gli esperimenti del tipo Michelson-Morley con i loro risultati.⁵⁷ Gli autori affermano che l'esperimento compiuto da Michelson e Morley nel 1887 aveva un'accuratezza di 10 km/s, di molto inferiore alla velocità orbitale della Terra. Passando alla storia dei risultati di Miller, Panofsky e Phillips osservano:

Much discussion resulted from the experiments of Miller, which gave positive indication of a velocity of about 10 km/s apparently directed toward a certain point in space, but improved

⁵³ Smith, A. W., e Cooper, J. N. (1972) *The Elements of Physics* (8th ed. New York: McGraw-Hill Book Co, 1972), p. 536. Vedere anche Van Name, F. W. (1952) *Modern Physics: Developments of the Twentieth Century* (New York: Prentice-Hall, 1952), p. 62.

⁵⁴ Taylor, E. F., Wheeler J. A. (1963) *Spacetime Physics* (San Francisco: Freeman & Co., 1963), p. 14. La ripetizione dell'esperimento di Michelson-Morley al quale si riferiscono è Jaseja, T. S., Javan, A., Murray, J., e Townes, C. H. (1964) "Test of Special Relativity or of the Isotropy of Space by Use of Infrared Masers", *Physical Review*, 133 (1964): A1221.

⁵⁵ Schwartz, H. M. (1968) *Introduction to Special Relativity* (New York: McGraw-Hill, 1968), pp. 34-35.

⁵⁶ Panofsky, W. K. H., e Phillips, M. (1955) *Classical Electricity and Magnetism* (1st ed. Reading Mass.: Addison Wesley, 1955) e (2nd ed., Reading Mass.: Addison Wesley, 1962).

⁵⁷ Ibid., (2nd ed), p. 277. Vedi corrispondenza tra Shankland e Panofsky, descritta nel Cap. 6.

*techniques has confirmed the absence of a fringe shift, and a new analysis of Miller's data has shown that they are not inconsistent with those of other observers.*⁵⁸

A queste affermazioni segue la tabella fornita da Shankland e il giudizio finale degli autori che il risultato nullo può essere accettato “*with confidence*”.⁵⁹ Questo capitolo sulle basi sperimentali della teoria della relatività ristretta è uno dei più influenti e conosciuti, e per questo costituisce una sostanziosa parte della storia implicita degli esperimenti del tipo Michelson-Morley. Come mostra la corrispondenza tra Panofsky e Shankland (vedi Cap. 6), l'articolo dell'ultimo costituisce la fonte principale del paragrafo dedicato a tali esperimenti. Gli autori, infatti, hanno modo di inserire Miller nel contesto sperimentale e lo fanno seguendo la storia tracciata da Shankland.

Riassumendo le considerazioni sulla storia implicita contenuta nei libri di testo che hanno sezioni riguardanti la teoria della relatività ristretta, la situazione appare molto definita: l'esperimento di Michelson-Morley ha sempre avuto risultato nullo, a meno dei limiti di precisione della strumentazione e, inoltre, ha avuto un ruolo fondamentale nella creazione della teoria di Einstein del 1905. Le poche volte che l'esperimento di Miller viene nominato esso è inserito nel contesto esplicativo fornito da Shankland nel 1954.

Il contesto in cui il nome di Miller appare è, quindi, uno dei più fondamentali e dibattuti dal punto di vista storiografico. Il ruolo dell'esperimento di Michelson-Morley è stato enfatizzato nel contesto della giustificazione della teoria della relatività speciale, e nei testi appare come il primo esperimento con un risultato pienamente relativista. La difficoltà dell'esperimento e la complessità della relazione tra teoria ed esperimento richiederebbero, però, un approccio storiografico più preciso di quello contenuto nei libri di testo per comprendere il reale ruolo dell'esperimento di Miller. È stato ampiamente dimostrato che l'esperimento di Michelson-Morley non ha avuto quella valenza generatrice che spesso appare nei libri di testo e che questa descrizione semplicista ha un senso soprattutto didattico.⁶⁰

⁵⁸ Panofsky e Phillips (2nd ed. 1962), *op. cit.*, p. 276.

⁵⁹ *Ibid.*, p. 278.

⁶⁰ Vedere Holton, G. (1969), “Einstein, Michelson and the ‘crucial’ experiment”, *Isis*, 60, (1969): 133-97; Stachel, J. (2002b), “Einstein and Michelson: The Context of Discovery and the Context of Justification”, in Stachel, J. (2002a) *Einstein from ‘B’ to ‘Z’* (Boston: Birkhäuser, 2002): 177-90; Stachel, J. (2002d) “Einstein and Ether Drift experiments”, in Stachel (2002a), *op. cit.*, pp. 171-76, Shankland, R. S. (1964), “Michelson-Morley Experiment”, *American Journal of Physics*, 32 (1964): 16-35; e Darrigol, O. (2005), “The Genesis of the Theory of Relativity”, *Séminaire Poincaré*, 1 (2005): 57-78.

Questo non significa che la valenza che l'esperimento di Michelson-Morley ebbe nel contesto specifico della comunità scientifica statunitense non ebbe un qualche ruolo nell'accoglienza dei risultati di Miller come vedremo nel Cap. 5.

2.3.3. *Effetto Sagnac*

La presenza dell'effetto Sagnac nei libri di testo ha una disposizione molto particolare rispetto al caso Miller. L'effetto Sagnac, sperimentato la prima volta nel 1913, nel contesto teorico dell'etere di Fresnel, ha avuto uno sviluppo applicativo tale che è diventato d'interesse per la navigazione aerospaziale. Per questo, esso ha una certa presenza nei libri di ottica, ma il suo utilizzo applicativo non è argomento d'interesse della presente tesi e le sue descrizioni in tal senso non verranno analizzate. In questi testi, comunque, la presenza dell'effetto non è accompagnata da nessuna discussione storica.⁶¹

Nei libri di testo attinenti la relatività, l'effetto Sagnac ha un suo spazio nelle prime monografie in lingua tedesca, mentre scompare quasi del tutto nei testi successivi alla Seconda Guerra Mondiale.⁶² Il cercare di rispondere al perché di questa scomparsa sarà uno dei compiti della mia ricerca, ma possiamo fin d'ora dire che non si può parlare di storia implicita data da libri di testo, vista l'assenza nei testi moderni di qualsiasi riferimento a tale effetto. Anche quando si affronta il tema della rotazione uniforme in ambito relativistico-generale ci si riferisce all'effetto senza riferimenti storici e a volte non compare neanche il nome dello scopritore.⁶³

2.3.4. *Conclusioni sulla storia implicita nei libri di testo*

I casi studiati hanno, come abbiamo visto, scarsa presenza nei libri di testo, e quando vi sono, la loro storia implicita viene decritta con alcune imprecisioni che tendono ad annullare il discorso critico presente nel lavoro di tali scienziati. È avvenuto, quindi, che i fisici che

⁶¹ Vedere per es. Fowles, G. R. (1989) *Introduction to modern Optics* (New York: Dover, 1989), 315-16; e Lipson, A., Lipson, S. G., and Lipson, H. (1995) *Optical Physics* (3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1995), 302-3.

⁶² L'effetto Sagnac è presente come base sperimentale della teoria della relatività sia nella prima monografia della teoria della relatività scritta da Von Laue nel 1919, versione utilizzata trad. fran. Von Laue, M. (1924). *La Théorie de la Relativité - Tome 1: Le Principe De Relativité de la Transformation de Lorentz* (Paris: Imprimerie Gauthier-Villars et Co, 1924) pp. 26-27, 137-39 e 200-4, sia nel più diffuso, anche in epoca contemporanea, Pauli, W. (1921) *Relativitätstheorie* (Lipsia: Teubner, 1921), trad. it. *Teoria della Relatività* (Torino: Boringhieri, 1958), p. 29.

⁶³ Vedere per es. Landau, L. D., e Lifshits, E. M. (1967) *Teoreticheskaya Fizika T. 2 Teoriya Polyva* (Moskow: Nauka, 1967); trad. ingl. *Course of Theoretical Physics Vol. 2 The Classical Theory of Fields* (Oxford Pergamon Press, 1971); versione utilizzata trad. ital. *Teoria Dei Campi: Fisica Teorica 2* (III ed. Roma: Editori Riuniti/Edizioni Mir: 2004), p. 333-34.

ritenevano le teorie della relatività problematiche rispetto ad uno o entrambi i casi citati, trovassero la storia, così come presentata dai libri di testo, errata, spingendosi a volte a considerare volontario l'occultamento di fatti.

Per questo, il modo di affrontare i lavori di Miller e Sagnac nei libri di testo è stata la causa principale del cospicuo utilizzo di questi casi nella letteratura anti-relativista. Gli anti-relativisti hanno riconsiderato la storia degli autori con l'evidente fine di rivalutare le loro teorie in forte contrapposizione con le teorie di Einstein. In questi esperimenti, elemento fondamentale è la velocità della luce e, quindi, un'ipotesi fisica su cosa la luce sia. I moderni anti-relativisti riprendono, quindi, il decaduto concetto di etere come sostanza essenziale al fenomeno luce, seppur con molte differenziazioni rispetto a Miller e Sagnac. Il modo in cui i casi trattati vengono citati nei libri di testo ha fatto anche sì che su questa modalità s'instaurassero le accuse di dogmatismo verso la comunità scientifica nella loro accettazione passiva della relatività. Prendendo le distanze da codeste accuse, resta, però, necessario riscrivere la storia di questi casi per non lasciarne la ri-scrittura ai soli anti-relativisti, alle loro radicali convinzioni scientifiche e alla loro scarsa attenzione verso le metodologie storiografiche.

2.4. Biografie di Einstein

2.4.1. Premessa

E' impossibile affrontare un tema storiografico attinente alla ricezione della relatività senza considerare l'enorme bibliografia dedicata al suo autore. È raro assistere a una pressoché totale identificazione di una teoria con il nome del suo scopritore, come nel caso delle teorie della relatività ed è indubbio che la fama di Einstein molto ha influito anche nello sviluppo storico delle sue stesse teorie. Le biografie di Einstein sono, perciò, diffusamente lette e alcune di queste espongono una storia implicita dei casi scelti notevolmente conosciuta, sia in seno alla comunità scientifica che presso i non esperti.

2.4.2. Miller

Anche in questo caso, però, l'effetto Sagnac è completamente assente, mentre il nome di Miller e il risultato dei suoi esperimenti trova un considerevole spazio nelle discussioni sugli avvenimenti della vita di Einstein. Le numerosissime biografie di Einstein si differenziano sia per la prospettiva dell'autore, il quale modifica lo spazio dedicato agli avvenimenti, sia per la diffusione avuta. È da considerare, inoltre, che le prime trattazioni, seppur incomplete, sono state la base per quelle successive.

Dal punto di vista scientifico quella del Pais è tra le biografie più complete e più diffuse, per cui è d'obbligo cominciare da essa.⁶⁴ L'episodio su cui Pais si sofferma è quello in cui venne chiesto a Einstein cosa pensasse del risultato positivo ottenuto da Miller, durante la visita negli USA nel 1921. A questa domanda, Einstein rispose con la celeberrima frase "Sottile è il Signore, ma non malizioso" detta in tedesco e che venne scritta in inglese sulla pietra del caminetto della *Fine Hall* del nuovo Dipartimento di Matematica a Princeton nel 1930.⁶⁵

Tra le notizie riguardanti il caso Miller, tale informazione è la più diffusa nelle biografie di Einstein.⁶⁶ Pais affronta anche la storia scientifica dell'esperimento di Michelson-Morley.

⁶⁴ Pais, A. (1982), *'Subtle is the Lord... 'The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 1982).

⁶⁵ Pais (1982), *op. cit.*, p. 126. Oswald Veblen chiese ad Einstein il permesso di incidere la frase, ottenendo risposta poco dopo, nell'aprile del 1930. Veblen a Einstein, 17 aprile 1930; e Einstein a Veblen 30, aprile 1930, Washington, *Library of Congress* (LC), Manuscript Division, Oswald Veblen Papers, box 4, fol. Einstein (vedi Cap. 5).

⁶⁶ L'episodio si trova, in maniera pressoché identica, in Brian, D. (1996) *Einstein: A Life* (New York: John Wiley and Sons, 1996), p. 127; Fölsing, A. (1993) *Albert Einstein: A Biography* (New York: Penguin, 1997), originale tedesco

richiamandosi sia all'articolo di Miller del 1933, sia a quello di Shankland. In particolare, Pais sembra accettare la versione fornita da Shankland (1955), nell'affermazione che Michelson aveva ripetuto egli stesso l'esperimento fino al 1929 e che i dati di Miller hanno trovato una spiegazione grazie al lavoro di Shankland. Di seguito, Pais considera la reazione di Einstein, asserendo che il creatore delle teorie della relatività ritenesse i risultati di Miller dipendenti da variazioni di temperatura.⁶⁷

Le biografie che citano le dichiarazioni di Miller, asseriscono brevemente che esse si rivelarono poi sbagliate, tranne Clark che approfondisce la questione e delinea una storia delle reazioni della comunità scientifica prendendo come fonte principale il trattato di Polanyi, *The Logic of Liberty* (vedi par. 2.2.3). Vale la pena riportare la storia così come esposta da Clark, perché l'autore fa affermazioni molto precise sugli avvenimenti:

[...] nell'Osservatorio di Mount Wilson, alto nella Sierra che dominava Pasadena, Dayton Miller aveva insistito per anni in una elaborata ripetizione dell'esperimento Michelson-Morley, con la non ancora deposta speranza di modificarne il risultato. Nella primavera del 1921 ne aveva ottenuto uno che in effetti pareva smentire a tutta prima le conclusioni cui erano giunti i suoi predecessori; poi, sottoposto ad accurate analisi, il suo enunciato non aveva retto. Quattro anni dopo, però, Miller produsse nuovi e diversi dati. Da una lettera che Einstein indirizzò a Millikan sappiamo quale fu la sua reazione all'annuncio, perché diceva di dedurre, sempre che i dati proposti da Miller fossero stati giusti, che tutta la sua teoria si sarebbe rilevata inconsistente. Altri scienziati, ai quali Miller comunicò i risultati ottenuti nel corso di una riunione indetta appositamente, non ammisero i dubbi dal quale pareva sfiorato Einstein. "Nessuno di loro fu tentato neppure per un momento dall'idea di smentire la relatività" afferma Michael Polanyi. Anzi – com'ebbe a dire ai tempi Sir Charles Darwin – consigliarono bellamente Miller di tornarsene a casa e di rifare i calcoli. In seguito lo stesso Einstein si convertì più o meno al loro parere. Pare che avesse contribuito a persuaderlo l'amico Max Born, che nell'inverno 1925-26 visitò l'osservatorio di Mount Wilson e fece funzionare personalmente l'interferometro. "Era traballante e inattendibile" scrisse; "bastava il minimo movimento della mano o un leggero colpo di tosse perché le frange d'interferenza

Albert Einstein: Eine Biographie (Frankfurt: Verlag, 1993), p. 503. In Isaacson, W. (2007) *Einstein: His Life and His Universe* (New York: Simon & Shuster, 2007), p. 297, l'episodio viene esposto senza neanche citare il nome di Miller.

⁶⁷ La fonte che Pais utilizza è lettera di Einstein a Besso del 25 dicembre 1925, pubblicata in Einstein, A. e Besso, M. *Correspondance 1903-1955* (Paris: Hermann, 1979), p. 127 (vedi par. 5.5.1).

diventassero così instabili da essere illeggibili. Da quel momento perdetti ogni fiducia nei risultati di Miller”.⁶⁸

Sebbene le fonti utilizzate siano riportate in modo preciso, la storia che ne risulta è di gran lunga priva di fondamento metodologico e contiene affermazioni molto nette sia sulle reazioni della comunità scientifica sia sulle risposte di Einstein. Come vedremo affermazioni di tal fatta distorcono gli avvenimenti fino a modificarne l'essenza.

Non vi sono molte altre citazioni di Miller nelle biografie di Einstein e l'immagine storiografica che ne risulta è di un anti-relativista che ha cercato, con un certo clamore, di ribaltare le precedenti affermazioni in merito ai risultati dell'esperimento di Michelson-Morley, ma venne confutato da altri esperimenti successivi. La reazione di Einstein viene descritta quasi sempre come incredula fin dal principio. Isaacson è l'unico che cita la visita di Einstein a Miller nel 1921, senza, però, affrontare i particolari di tale incontro.⁶⁹ Solo Clark mostra un Einstein pronto a mettere in dubbio la propria teoria nel caso i dati di Miller fossero stati confermati.

Le biografie hanno ben altro scopo che quello di approfondire alcuni particolari marginali della vita di Einstein, però l'immagine da loro riportata è parte integrante della storiografia riguardante gli esperimenti di Miller; è, perciò, interessante notare che tutte riportano le successive confutazioni del loro risultato, mentre le reazioni di Einstein e della comunità scientifica alle affermazioni di Miller hanno caratteristiche spesso differenti.

⁶⁸ Clark (1973), *op. cit.*, versione utilizzata trad. it. Clark, R. W. *Einstein, la vita pubblica e privata del più grande scienziato del nostro tempo* (Milano, Rizzoli Editore, 1976), p. 349.

⁶⁹ Isaacson (2007), *op. cit.*, p. 300, descrive la visita di Einstein a Miller in cui il primo chiede al secondo di continuare gli esperimenti. Nella stessa pagina si afferma che esperimenti successivi di altri diedero ragione dello scetticismo iniziale di Einstein.

2.5. Letteratura anti-relativista

Gli esperimenti di Miller, e Sagnac sono utilizzati, nella letteratura anti-relativista, come base di molte delle critiche, anche contemporanee, alle teorie di Einstein. La storia implicita contenuta in questo tipo di articoli o trattati è spesso in diretta contrapposizione con la storia implicita contenuta nei libri di testo. Sotto accusa sono le narrazioni che tendono a sminuire i lavori teorici di Miller e Sagnac, i quali dedicarono gran parte della loro attività scientifica a contrastare la relatività.

Uno dei testi più diffusi tra quelli che considerano l'effetto Sagnac un fenomeno anti-relativista è il libro di Dean Turner e Richard Hazelett *Einstein Myth and the Ives Papers*.⁷⁰

Gli autori criticano l'atteggiamento di noncuranza della comunità accademica rispetto all'esperimento di Sagnac e alla ripetizione di Michelson e Gale del 1924:

*The name of Sagnac seldom appears in treatises of physics and rarely in textbooks. This neglect is apparently out of deference to relativists who claimed to have explained away Sagnac's experiment and the experiment of Michelson and Gale.*⁷¹

Il libro dedica una pagina alla storia dell'effetto Sagnac e alle derivazioni relativistiche di Langevin del 1921 e del 1937 evidenziando, però, che la critica posta da Ives non è stata mai discussa dalla comunità accademica.⁷²

Il libro ha avuto molta diffusione negli ambienti ostili alla relatività ed è stato fonte d'immagini storiografiche precise concernenti il caso Sagnac. Molto spesso la letteratura anti-relativista accomuna i casi di Miller e Sagnac, è, però, interessante notare come il nome di Miller non venga nemmeno menzionato all'interno di questo volume. Questo avviene perché l'obiettivo del libro è ripercorrere le tesi anti-relativiste di Herbert Eugene Ives (1882-1953), il quale non utilizzò mai il caso Miller come esperimento contrario alle teorie della relatività.

Possiamo ritenere il trattato di Turner e Hazelett la fonte storica prediletta da coloro i quali ritengono l'effetto Sagnac un'anomalia rispetto all'impianto teorico relativista. Le fonti che

⁷⁰ Turner, D. e Hazelett, R. (1979) *Einstein Myth and the Ives Papers. A Counter-Revolution in Physics* (Pasadena: Hope Publishing House, 1979).

⁷¹ Ibid., p. 251.

⁷² Ives, H. E. (1938) "Light Signals Sent Around a Closet Path", *J.O.S.A.*, 28 (1938): 296-99.

essi citano sono un articolo del fisico bulgaro Stefan Marinov (1931-1997) che ha cercato di mostrare l'inadeguatezza della spiegazione relativistica dell'effetto⁷³ e un articolo scritto da Post nel 1967.⁷⁴ Il lavoro di Post si apre con un'analisi storica dell'effetto Sagnac, mentre Marinov si limita a citare gli articoli nei quali viene dimostrata la presenza dell'effetto in diversi modi.

Turner e Hazelett vanno un po' oltre le descrizioni di Post e Marinov enfatizzando l'uso applicativo dell'effetto nella navigazione aero-spaziale e i moderni sviluppi. Data la diffusione del libro di Turner e Hazelett è razionale riferirsi a questo libro come la principale versione storiografica anti-relativista.

Ben diverso è l'approccio al caso Miller. La storia del caso Miller può essere divisa in due parti con una netta divisione temporale:

- la prima va dall'esperimento di Michelson-Morley all'articolo di Miller (1933) e comprende tutte le ripetizioni sperimentali compiute da Miller e altri fisici dal 1921 al 1930;
- il periodo successivo va da questo momento alla pubblicazione dell'analisi di Shankland del 1955.

Per quello che concerne la prima fase, le versioni anti-relativiste fanno propria la storia narrata da Miller in (1933), che comprende la descrizione dei vari esperimenti da lui compiuti. In questo testo si afferma che l'esperimento di Michelson-Morley non ha mai dato risultato esattamente nullo e che Michelson e Morley non hanno mai ripetuto l'esperimento dopo la pubblicazione dell'articolo. Questa versione dei fatti è in netto contrasto con molte affermazioni contenute in libri di testo (vedere par. 2.4). Le affermazioni di Miller sono citate come dimostrazione della dogmaticità della comunità scientifica, irrispettosa della verità storica.⁷⁵

Un atteggiamento simile dal punto di vista storiografico ha trovato un resoconto autorevole nel libro di Loyd Swenson *Ethereal Ether*.⁷⁶ Questo libro non può essere considerato appartenente alla letteratura anti-relativista perché il suo intento è esplicitamente storico e si allontana da qualsiasi interpretazione fisica. Facendo ciò, però, l'autore si pone in una

⁷³ Marinov, S. (1978) "Rotating Disk Experiments", *Foundations of Physics*, 8 (1978): 137-56.

⁷⁴ Post, E. J. (1967) "Sagnac Effect", *Review of Modern Physics*, 39 (1967): 475-93.

⁷⁵ Vedere per es. Cahill, R. T. (2005) "The Michelson and Morley 1887 Experiment and the Discovery of Absolute Motion", *Progress In Physics*, 3 (2005): 25-29.

⁷⁶ Swenson Jr., L. S. (1972) *The Ethereal Ether A History of the Michelson-Morley Aether-Drift Experiments, 1880-1930* (Austin/London: University of Texas Press, 1972).

posizione ambigua: da un lato valorizza il lavoro di Miller, utilizzandone acriticamente le parole, dall'altro non approfondisce la discussione sulle ripetizioni che hanno riconfermato il risultato nullo. L'opera di Swenson verrà spesso citata nel Cap. 5 per criticarne alcune specifiche affermazioni storiche, ma è importante dire già da ora che la sua ambiguità l'ha portata a diventare una delle principali fonti storiografiche di quelli che considerano i risultati di Miller una confutazione della teoria della relatività ristretta.

Questa duplicità del libro di Swenson di essere sia il libro che contiene la storia esplicita degli esperimenti di Michelson-Morley fino agli anni '30, sia la fonte principale della letteratura anti-relativista, lo rende il testo in assoluto più adatto con il quale riportare la parte della presente tesi dedicata a Miller.

Molto diverso è il discorso sulla seconda parte della storia legata agli esperimenti di Miller, quella incentrata sulla soluzione trovata da Shankland. Mentre Swenson non affronta l'argomento e l'articolo di Shankland viene utilizzato solo come fonte storiografica per gli esperimenti di Miller, altri autori anti-relativisti contemporanei guardano l'articolo di Shankland con molto sospetto e sottolineano il fatto che Miller aveva già controllato in maniera opportuna che l'effetto non fosse dovuto alla variazione di temperatura.⁷⁷

Un articolo di James DeMeo fornisce un chiaro esempio di come si possa utilizzare la storia con la finalità di enfatizzare l'importanza e il mistero dei risultati di Miller. A dispetto del fatto che l'articolo di DeMeo non è pubblicato da nessuna rivista storico-scientifica ritengo la diffusione delle sue affermazioni tale da considerare anche il web fonte di rappresentazioni storiografiche implicite dei casi trattati. Molto spesso articoli che si riferiscono all'etere o al "vento d'etere" non sono pubblicati da riviste scientifiche ortodosse, ed esiste solo una minima parte di riviste che non sia allineata con questa scelta, per esempio *Foundations of Physics* e *Apeiron*. Ad ogni modo gli articoli pubblicati che si rifanno agli articoli di Miller si riferiscono ad una storia che è molto simile a quella tracciata da DeMeo. Costui sostiene che l'articolo di Michelson, Pease e Pearson del 1929 fornisce un supporto indiretto ai dati trovati da Miller.⁷⁸ Secondo l'autore la stessa cosa accade con

⁷⁷ DeMeo, J. (2001) "Dayton Miller's Ether-Drift Experiments: A Flesh Look", *Infinite Energy Magazine*, 38 (2001): 72-81. Anche in www.orgonelab.org/miller.htm; Visionato l'ultima volta il 7 luglio 2010.

⁷⁸ Michelson, A. A., Pease, F. G. e Pearson, F. (1929a) "Repetition of the Michelson-Morley Experiment", *Nature*, 123 (1929): 88.

gli esperimenti di Michelson-Gale (1925) e di Kennedy-Thorndike (1932) che, letti accuratamente, mostrano un effetto dovuto al vento d'etere.⁷⁹ DeMeo, inoltre, afferma:

*Michelson went to his grave convinced that light speed was inconstant in different directions, and also convinced of the existence of the ether.*⁸⁰

Sebbene sia difficile trovare le asserzioni di DeMeo riproposte in articoli pubblicati, è convinzione dell'autore che queste idee facciano parte integrante della contemporanea visione dei fisici anti-relativisti che affrontano tali argomenti.⁸¹ Alcuni di questi arrivano ad affermare che *“Lorentz and Einstein were aware of Miller’s results and were that Michelson-Morley-Miller experiments had not given a null result”*.⁸² Lo stesso articolo riporta, inoltre, che Shankland e suoi collaboratori *“could not establish a direct and general correlation between Miller’s results and the thermal conditions during the experiments”*.⁸³

La stessa convinzione è espressa anche da Thomas J. Roberts che, non soddisfatto della spiegazione di Shankland, ha analizzato ancora i dati di Miller trovando una soluzione conforme alle predizioni della teoria della relatività speciale, senza nessuna ipotesi concernente l'etere. Il lavoro di Roberts è emblematico perché l'autore non sembra di parte nel ritenere che Shankland e i suoi collaboratori *“did not fully resolve the issue, because they merely showed a loose correlation between signal and temperature drift, but they did not give any argument or discussion of how that could generate such a remarkable result”*.⁸⁴

La rappresentazione storica proposta da DeMeo è molto più estrema, poiché egli parte dal notare che l'articolo di Shankland è stato scritto mentre si consultava con Albert Einstein. Da questo deduce che ci fosse una sorta di sostegno reciproco tra i due scienziati. DeMeo sostiene, inoltre, che Shankland afferma il falso quando dice che tutti gli esperimenti del tipo Michelson-Morley (a parte quelli di Miller) hanno dato risultato nullo, e parla di *“deliberate misrepresentation”* riguardo l'interpretazione dello *“slight positive results”* degli

⁷⁹ Kennedy, R. J., e Thorndike, E. M. (1932) “Experimental Establishment of the Relativity of Time”, *Physical Review*, 42 (1932): 400-18.

⁸⁰ DeMeo (2001), *op. cit.*

⁸¹ Le stesse argomentazioni sono state poste in comunicazioni personali dai fisici italiani Massimo Monti, Franco Selleri, Andrea Pagano e sono implicite nelle discussioni contemporanee sui dati di Miller.

⁸² Guerra, V., e De Abreu, R., (2007) “Comments on ‘From Classical to modern ether-drift experiments: the narrow window for a preferred frame’”, *Physics Letters A*, 361 (2007): 509-12, p. 510.

⁸³ *Ibid.*, p. 510.

⁸⁴ Roberts, T. J. (2006) “An Explanation of Dayton Miller’s Anomalous “Ether Drift” Result”, arXiv:physics/0608238v3, p. 2. L'articolo è stato proposta alla rivista *Review of Modern Physics* nel 2006, ma non è stato pubblicato.

esperimenti di Michelson-Morley, Morley-Miller, Sagnac, Michelson-Gale e Michelson-Pease-Pearson.⁸⁵ DeMeo afferma, per concludere, citando un'intervista a Shankland, che gli esperimenti di Miller crearono delle difficoltà nel conferimento del premio Nobel a Einstein nel 1921, essendo il maggior ostacolo all'accettazione della teorie della relatività.⁸⁶ Nell'utilizzo che DeMeo fa delle parole di Shankland emerge uno dei più interessanti problemi storiografici riguardanti gli esperimenti di Miller. Nell'intervista Shankland afferma realmente che il ritardo con cui Einstein ebbe il Nobel ed il fatto che non gli fu conferito per la teoria della relatività, ma per l'effetto fotoelettrico, potrebbero essere dipesi dagli esperimenti di Miller dell'aprile 1921. Come vedremo in modo approfondito nel Cap. 6, Shankland ha, però, spesso enfatizzato l'importanza degli esperimenti di Miller. Studi recenti hanno dimostrato, invece, che le scelte dell'*Accademia Reale Svedese delle Scienze* non ebbero nulla a che fare con i risultati di Miller.⁸⁷

DeMeo, in seguito, critica la spiegazione data da Shankland sulla base del fatto che Miller aveva già provato che non poteva essere un effetto di temperatura.⁸⁸

Gli autori anti-relativisti, citati e non, sono considerati "dissidenti", per utilizzare l'espressione di Roberts,⁸⁹ e le loro teorie sono spesso legate alla fede nell'esistenza dell'etere, concetto estraneo ai programmi di ricerca contemporanei. Ritengo, però, che le storie tracciate da questi autori, da un lato siano più approfondite delle storie implicite ortodosse contenute nei libri di testo, dall'altro forniscano elementi che possono essere analizzati in uno studio storico approfondito. Nel proseguo della mia tesi, perciò, terrò presenti tutte le affermazioni degli autori succitati con lo scopo di porli sotto il giudizio di una metodologia storica.

⁸⁵ DeMeo (2001), *op. cit.*

⁸⁶ L'intervista citata è Kimball, M. "An Interview with Dr. Robert S. Shankland, Subject: Dayton Miller", *Transcript of audio tape, 15 Dec. 1981*, da R. S. Shankland Papers, Case Western Reserve University Archives, Cleveland, Ohio.

⁸⁷ Elzinga, A. (2006) *Einstein's Nobel Prize: A Glimpse Behind Closed Doors: The Archival Evidence* (Sagamore Beach: Science History Publications, 2006).

⁸⁸ Dal 1925 in poi, Miller aveva affermato in maniera netta che aveva considerato l'effetto di temperatura non trovando alcuna corrispondenza con l'effetto osservato; vedere Miller (1933), *op. cit.*

⁸⁹ Roberts (2006), *op. cit.*, p. 1.

2.6. Storia esplicita

I lavori storici sull'effetto Sagnac e gli esperimenti di Miller sono di diverso tipo, ma nessuno di questi ha mai considerato le storie dei due casi all'interno delle reciproche comunità nazionali per poi porle a confronto.

La tipologia dei resoconti storici, poi, si differenzia molto rispetto ai due casi. Mentre il caso degli esperimenti di Miller è il più citato in trattati generali sulla storia della fisica del '900, numerosi articoli si sono dedicati a qualche lato particolare della storia dell'effetto Sagnac, molto meno noto dell'altro caso presso la comunità internazionale dei fisici. Il fatto che nessun articolo di ricerca storica abbia affrontato il caso Miller fa ritenere che esista una storia, che chiamerò "standard", comunemente accettata presso la comunità scientifica.

2.6.1. Il caso Miller nei trattati di storia

Il caso Miller è affrontato in maniera significativa e approfondita in due libri che forniscono un'immagine non del tutto coerente di alcuni passaggi emblematici della storia degli esperimenti di Miller e del definitivo rifiuto dei suoi risultati da parte della comunità scientifica statunitense: il già citato, e ben conosciuto, libro di Swenson e il meno noto libro di Crelinsten *Einstein's Jury*.⁹⁰

Entrambi sono studi puramente storici, il primo incentrato sulla storia degli esperimenti del tipo Michelson-Morley a partire dal primo esperimento di Michelson nel 1881, fino alle ripetizioni successive agli esperimenti di Miller. Lo studio di Swenson si conclude nel momento in cui Michelson viene proclamato come colui che riafferma, in maniera considerata definitiva, il valore nullo dell'esperimento.

Potrebbe sorgere una domanda: perché approfondire una ricerca storiografica già compiuta in modo esauriente e pubblicata in un libro, tra l'altro molto diffuso? Le ragioni sono essenzialmente due. La prima è che il resoconto storico di Swenson risulta incompleto per alcuni aspetti essenziali. Il mio studio vuole inserirsi su quello dello storico statunitense approfondendo lo studio della reazione agli esperimenti di Miller da parte della comunità scientifica statunitense, e di altre personalità, compreso Einstein, fino alla pubblicazione dell'articolo di Shankland e collaboratori (1954) e le reazioni a questo.

⁹⁰ Si tratta del classico Swenson (1972), *op. cit.*, e del recente Crelinsten, J. (2006), *Einstein's Jury, The Race to Test Relativity* (Princeton and Oxford: Princeton University Press, 2006).

Questa parte della storia non trova per nulla spazio nella trattazione di Swenson ed è stato possibile indagarla solo grazie alla consultazione delle carte di Shankland presenti presso il *Case Western Reserve University (CWRU) Archives* e presso lo studio del prof. Fickinger (*Case Western Institute*).

Il secondo punto riguarda, invece, una critica revisionista di alcune interpretazioni storiche di Swenson. Questo lavoro è, infatti, ambiguo dato che, in alcune affermazioni, sembra prendere le parti di Miller generalizzando i suoi atteggiamenti o pensieri a quelli di un'intera comunità scientifica. Come già affermato, questo deriva dal fatto che Swenson usa come fonte principale gli articoli di Miller e di Shankland, i quali, senza nulla togliere alla loro buona fede, avevano un interesse non prettamente storiografico nell'approccio al problema di *ether-drift*. Ho, perciò, compiuto un'opera di raffronto tra fonti primarie e secondarie diverse in modo da poter tratteggiare una storia meno inficiata da esigenze teorico-esplicative. L'approccio storiografico di Swenson agli esperimenti di Miller e alle sue ripetizioni non tiene molto conto, poi, del contesto generale, ossia quello dell'accettazione della relatività negli USA. Questo ha portato lo storico a interpretare alcune fonti in modo non corretto.

Molto più vicino a questo tipo di approccio è il lavoro di Crelinsten che, però, non ha come centralità lo studio degli esperimenti di *ether-drift*. Il trattato è, infatti, uno studio del lavoro sperimentale della comunità astronomica statunitense nel contesto della teoria della relatività generale fino al 1930. In questo ampio tema il lavoro di Miller entra solo in quanto era uno dei diversi esperimenti concernenti le teorie di Einstein eseguiti nel *Mount Wilson Observatory (MWO)* e perché alcuni astronomi contrari alla teoria della relatività generale guardarono con interesse i risultati di Miller. Il lavoro di Crelinsten affronta, quindi, alcuni aspetti della ricezione degli esperimenti di Miller nel contesto della progressiva accettazione della teoria della relatività generale ed è notevole fonte d'informazione. Raffrontando le versioni di Swenson e Crelinsten l'immagine risultante non è chiara, e sarà uno degli obiettivi di questa tesi paragonare le due versioni con le fonti primarie.

Altro autore che accenna ai risultati di Miller nel contesto della ricezione della relatività presso la comunità scientifica statunitense è Stanley Goldberg.⁹¹ Questi dedica, però, poco spazio a Miller, concentrandosi sugli esperimenti che egli compì con Morley tra il 1902 e il 1906. Tali esperimenti erano una ripetizione dell'esperimento di Michelson-Morley e

⁹¹ Goldberg (1984), *op. cit.*

dimostrarono l'indipendenza del risultato nullo dal cambio di materiale con cui veniva costruito l'interferometro. Goldberg non fa cenno alcuno agli esperimenti successivi, se non quando questi rientravano in altre fonti nel dibattito sulla relatività. L'immagine di Miller che ne risulta è quella di un anti-relativista che godeva di una certa autorevolezza all'interno della comunità scientifica statunitense.

In molti libri di storia della fisica il caso Miller, così come altre ripetizioni dell'esperimento di Michelson-Morley, non viene citato. Ciò avviene perché questi sono probabilmente ritenuti di secondaria importanza nello sviluppo della fisica nel XX secolo. In libri più specifici si trovano, invece, dei riassunti della storia che si differenziano di poco l'un l'altro. Inizio l'analisi di tali brevi resoconti con uno dei trattati più diffusi della storia della fisica del XX secolo: *Twentieth Century Physics*. Si potrebbe considerare la storia che si trova in tale opera una sorta di storia esplicita "standard", o, per dirla alla Kuhn, paradigmatica, all'interno dell'odierna comunità dei fisici.

Nel capitolo dedicato alla storia dell'ottica, un paragrafo è intitolato *The tale of Miller*.⁹² La breve lettura storica che in esso si dà del caso Miller è di notevole interesse perché affronta anche il significato dell'esperimento di Michelson-Morley. Per gli autori, l'esperimento di Michelson-Morley "*had a profound influence on late nineteenth century and early twentieth century physics as it disproved the existence of the aether*".⁹³ Questa breve affermazione si scontra con la tradizione storiografica contemporanea che si è occupata approfonditamente delle reazioni al risultato dell'esperimento di Michelson-Morley. Tale tradizione storiografica nega che il risultato nullo sia stato la confutazione dell'esistenza dell'etere (vedi Cap. 3). Il fatto che in un libro molto diffuso sulla storia della fisica del XX secolo appaia questa immagine è un chiaro indice della distorsione della conoscenza storica presente presso la comunità dei fisici.

Per quanto concerne, invece, la storia esplicita degli esperimenti di Miller, gli autori la trattano in pochissime righe:

⁹² Brown, R. G. W., e Pike, E. R. (1995) "A History of Optical and Optoelectronic Physics in the Twentieth Century", in Brown, L. M., Pais, A., e Pippard, B. (eds.) (1995) *Twentieth Century Physics Volume III* (Bath: IOP and AIP Press, 1995): 1385-1504.

⁹³ Ibid., p.1401.

This null [risultato dell'esperimento Michelson-Morley] was disputed by Miller. Whilst Miller failed to find the predicted displacement in his 65 m path system, he did, however, report an apparent small drift and continued to argue for the aether.

More sensitive and shorter-path interferometers failed to find any fringe displacement with interferometer rotation, and calculations showed that a temperature change of only 0.001 °C or a pressure change of only 0.05 mm Hg would have caused the Miller observation in his geometry.⁹⁴

Nella storiografia ufficiale, perciò, si considerano fondamentali gli esperimenti del tipo Michelson-Morley successivi a quelli di Miller e che ribadirono il risultato nullo. Si accetta, inoltre, che il dato di Miller sia dipeso da fattori locali come le variazioni di pressione o temperatura. La fonte citata dagli autori per queste informazioni è un libro di testo di ottica del 1955, contemporaneo all'articolo di Shankland.⁹⁵ La storia tracciata, seppur recente, è, perciò, incompleta per la sua brevità, ma soprattutto inficiata dall'utilizzo di fonti contemporanee allo svolgersi di eventi che risultarono risolutivi nella conclusione del caso scientifico legato agli esperimenti di Miller.

Sia gli autori di questa storia "standard", sia quelli delle fonti utilizzate, non sono storici, anzi il volume di riferimento più importante è un libro di testo universitario sull'interferometria molto diffuso; possiamo, perciò, affermare che questa versione può essere considerata a pieno titolo la storia all'interno di un paradigma di cui la teoria della relatività ristretta è parte integrante. Il fatto che la fonte principale sia un libro di testo fa riaffiorare tutte le problematiche riguardanti questa tipologia di volumi come sorgenti d'informazione storica (vedi par. 2.3).

Una visione storica più completa si trova nell'opera di Marie-Antoinette Tonnelat sulla storia del principio di relatività.⁹⁶ La nota e influente studiosa francese cita, infatti, l'esperienza di Miller diverse volte.

La prima volta lo fa nel paragrafo "*Vitesse de la lumière et temps absolu en théorie de Lorentz*". In questo paragrafo l'autrice nomina numerose esperienze per misurare la velocità della luce, tali da far apparire eventuali anisotropie di questa dovute alla velocità della Terra attraverso l'etere: satelliti di Giove (Roemer); aberrazione (Bradley), riflessione su due o

⁹⁴ Ibid., p.1401.

⁹⁵ Gli autori fanno riferimento per la parte conclusiva della storia di questi eventi a Tolansky, S. (1955) *An Introduction to Interferometry* (London: Longmans, 1955): 103-4.

⁹⁶ Tonnelat, M. A. (1971) *Histoire du Principe de Relativité* (Paris: Flammarion éditeur, 1971).

più specchi paralleli (Jeans), poi metodo di Wood, metodo delle celle di Kerr (Gaviola), metodi con l'applicazione dell'effetto Mossbauer. Dopo aver richiamato tutti questi metodi, Tonnellat afferma:

*Toutes ces méthodes doivent exclure [...] une synchronisation des horloges au moyen de signaux lumineux, afin d'éviter une pétition de principe. Néanmoins aucune réalisation concluante n'a été effectuée jusqu'ici.*⁹⁷

Miller viene nominato in una nota a questa frase così:

*L'expérience tentée par Miller fut interprétée hâtivement et semble conduire à un effet de transfert des ondes lumineuses par l'éther. Elle fut bientôt démentie et ne semble jamais avoir troublé la foi relativiste d'Einstein.*⁹⁸

Tonnellat sta sottolineando il fatto che l'interpretazione di Miller fu subito smentita, ed in seguito riporterà gli esperimenti che confutarono le posizioni di Miller, ma si concentra, soprattutto, sulla reazione di Einstein.

Nel paragrafo volto ad approfondire il rapporto tra Poincaré e il “*Principe de Relativité*” e la differenza con Einstein troviamo il secondo rimando al caso Miller. La studiosa vuole dimostrare la differenza di approccio alla pratica sperimentale tra Poincaré ed Einstein. Per mostrare questa differenza, Tonnellat afferma che, quando l'esperienza di Kaufmann sembrò contraddire le previsioni di Lorentz ed Einstein, Poincaré si trovò a considerare confutato, su basi sperimentali, il principio di relatività. Notevole differenza rispetto alla reazione di Einstein alle esperienze di Miller:

*On ne peut s'empêcher de comparer cette opinion avec la superbe indifférence d'Einstein devant les résultats compromettant des expériences de Miller.*⁹⁹

Il centro d'interesse della Tonnellat rimane la reazione di Einstein a questi esperimenti e non quello della comunità accademica, come se la storia del principio di relatività fosse

⁹⁷ Ibid., p. 109.

⁹⁸ Ibid., p. 109. [enfasi mia]

⁹⁹ Ibid., p. 125.

opera individuale riguardante il creatore della nuova teoria.

L'autrice affronta, però, in maniera più approfondita l'argomento del rapporto tra l'esperienza di Miller e la teoria della relatività nel paragrafo “*Déduction logique. Expérience et Relativité*” del capitolo XII “*Signification et portée du principe de relativité*”.

Tonnellat racconta l'episodio accaduto nel 1925 nella richiesta della stampa di commentare la notizia, cosa che Einstein non sembra aver fatto, mentre sappiamo che la reazione di Einstein fu una lettera all'amico Michele Besso (1873-1955), che Tonnellat cita:

*Je crois moi aussi que les expériences de Miller reposent sur des erreurs de températures. A aucun moment, je ne les ai prises au sérieux.*¹⁰⁰

Tonnellat commenta così le espressioni di Einstein:

*On pourrait penser qu'Einstein tranche bien légèrement le différend, qu'il obéit à quelque préjugé, voire à quelque ressentiment orgueilleux, qu'il aurait dû éprouver un certain bouleversement à cette entrée en scène d'un vent d'éther qui ruinait les bases de sa théorie. Or l'attitude d'Einstein était [...] inspirée par une invincible confiance, - non pas en ses propres travaux, - mais dans une suite de raisonnement dont la vérité lui apparaît infiniment plus probable et plus solide que l'apparition – de facto – d'un système privilégié.*¹⁰¹

Si può notare l'insistenza della Tonnellat sulle caratteristiche psicologiche di Einstein per passare poi al suo approccio metodologico e al suo pensiero. Una buona parte delle notizie che utilizza sembrano derivare da un lavoro dello storico della scienza Gerald Holton, che a lungo si è occupato di Einstein e del suo rapporto con gli esperimenti.¹⁰² È da notare, però, che nella ricostruzione compiuta da Tonnellat, le esperienze di Miller sembrano entrare nel percorso di Einstein nel 1925, mentre sappiamo da numerosissime fonti che Einstein era a conoscenza dei tentativi di Miller già dal 1921, tanto da aver anche fatto visita allo stesso Miller.

Una volta compiute le sue riflessioni sul modo di pensare di Einstein, che, come abbiamo visto, sono il fulcro centrale del trattato, Tonnellat descrive brevemente la storia delle

¹⁰⁰ Einstein, A., e Besso, M. (1979) *Correspondance 1903-1955* (Paris: Hermann, 1979), p. 127.

¹⁰¹ Tonnellat (1971), *op. cit.*, p. 450 [enfasi di Tonnellat].

¹⁰² Lo studio di Holton che Tonnellat cita è Holton, G. *Influences on and Reception of Einstein's rarely work in relativity Theory*, Preprint.

esperienza di Miller dopo il suo annuncio pubblico:

*Pour en revenir à l'expérience de Miller (dont les résultats ne furent jamais confirmés par des expériences plus précises), ses conclusions pouvaient être dues à de multiples causes d'erreur.*¹⁰³

Tonnellat sta utilizzando come fonti gli studi storici di Holton e l'articolo di Shankland. Ho già evidenziato le problematiche riguardanti l'uso dell'articolo di Shankland come fonte, mentre Holton è senza dubbio uno storico tra i più autorevoli e più conosciuti sulla rilevanza dell'esperimento di Michelson-Morley nello sviluppo del pensiero e delle teorie di Einstein.¹⁰⁴

Dopo questo breve resoconto della storia del caso Miller, Tonnellat continua a focalizzarsi sul modo di pensare di Einstein:

*Certes, Miller assure que toutes les précautions ont été prises pour éliminer un tel effet. Il n'en reste pas moins vrai qu'Einstein admet spontanément le résultats de l'expérience d'Eötvös, pourtant critiquable, et récuse ceux de l'expérience de Miller. Attitude partielle, sans doute, mais choix plein de sagesse qu'inspire une intuition sûre.*¹⁰⁵

L'autrice trova che sia saggio accordare più importanza alle prospettive aperte da una costruzione coerente, nata da numerosi risultati acquisiti, teorici e sperimentali, che a risultato di un singolo esperimento isolato il cui dato può essere dovuto ad altre cause.¹⁰⁶

*Bien loin d'être anti-expérimentaux [Galilée] et [Einstein] savaient distinguer la proie de l'ombre, les perspectives ouvertes à l'esprit d'une information hasardeuse ou d'une expérience isolée, souvent incertaine.*¹⁰⁷

Le ultime citazioni del nome Miller, Tonnellat le fa nell'appendice dedicata all'esperienza di Michelson. Tra gli esperimenti che ne hanno migliorato l'accuratezza, Tonnellat nomina le esperienze di Kennedy del 1926, quella di Illingworth del 1927, quelle di Piccard e Stahel

¹⁰³ Tonnellat (1971), *op. cit.*, p. 450.

¹⁰⁴ Holton, G. (1969) "Einstein, Michelson and the "crucial" experiment", *Isis*, 60, (1969): 133-97.

¹⁰⁵ Tonnellat (1971), *op. cit.*, p. 451.

¹⁰⁶ *Ibid.*, p. 451.

¹⁰⁷ *Ibid.*, p. 451.

del 1926 e del 1928, e, infine, quella di Joos del 1930, mentre non cita il lavoro di Michelson, Pease e Pearson. Quest'ultimo ebbe un ruolo non secondario nel processo storico che portò al definitivo disconoscimento dei risultati di Miller da parte della comunità accademica statunitense e il fatto che non venga nominato mostra le difficoltà di riscrivere in modo coerente la storia degli esperimenti del tipo Michelson-Morley compiuti negli anni '20.

Riassumendo, il problema dei risultati di Miller entra, soprattutto, come esempio dell'attitudine di Einstein verso gli esperimenti e, in tale tema storiografico, l'autrice sembra seguire le tesi di Holton. Per quanto riguarda la storia del problema fisico in sé, Tonnellat dice brevemente che l'effetto trovato da Miller non è stato confermato dagli esperimenti successivi, dando credito implicitamente alla spiegazione di Shankland, anche se l'articolo di questi non è espressamente citato come soluzione definitiva, ma solo come fonte storica.

Il rapporto di Einstein con gli esperimenti è uno dei filoni di ricerca storiografici che hanno attinto maggiormente al caso Miller. Tale ambito è stato indagato in modo particolare da due storici: il già citato Gerald Holton e Klaus Hentschel. I loro lavori si basano su interpretazioni quasi antitetiche dell'approccio di Einstein verso gli esperimenti. Il lavoro di Holton è antecedente e ha avuto una notevole influenza sia nelle ricostruzioni successive, sia nella creazione dell'immaginario comune rispetto allo scienziato Einstein.

Holton, in un noto articolo il cui obiettivo era confutare l'immagine di "*genetic connection*" fra l'esperimento Michelson-Morley e la teoria della relatività ristretta di Einstein, affronta anche il caso Miller.¹⁰⁸ Secondo Holton, l'esperimento di Michelson-Morley non fu, dal punto di vista storico, un *experimentum crucis* che aveva portato Einstein alla creazione della teoria della relatività ristretta. Il rapporto di Einstein verso gli esperimenti di Miller diventa, così, una parte della prospettiva generale della sua relazione con l'esperimento di Michelson-Morley.

L'articolo di Holton era di poco successivo alla tesi di Swenson e si basava, anch'esso, per la trattazione degli esperimenti del tipo Michelson-Morley, sui lavori storiografici di Shankland.¹⁰⁹ Ennesima dimostrazione, questa, del fatto che Shankland era la fonte di riferimento accettata dalla comunità scientifica internazionale.

¹⁰⁸ Holton (1969), *op. cit.*

¹⁰⁹ Swenson Jr., L. S. (1962) "The Ethereal Aether: A History of the Michelson-Morley Aether-Drift Experiments, 1880-1930" (Ph.D. thesis, Claremont Graduate School, 1962). Da questa tesi fu poi tratta il libro che divenne il resoconto storico più diffuso e completo sugli esperimenti del tipo Michelson-Morley fino al 1930.

La storia tracciata da Holton è la stessa descritta, successivamente, dalla Tonnellat e fa perno su un paio di lettere che dimostrano come Einstein avesse intuito, già nel 1925, la dipendenza del risultato di Miller dalle variazioni di temperatura.¹¹⁰

Holton accetta che Shankland abbia definitivamente dimostrato la validità di questa spiegazione; ritorna così evidente che il caso Miller si sia concluso con l'articolo di Shankland e la visione di Holton s'inserisce appieno nella storiografia standard. L'interpretazione di Holton dell'atteggiamento di Einstein verso gli esperimenti non chiarisce, però, l'episodio della visita di questi a Miller. Il resoconto dell'incontro fra i due scienziati, stilato da Miller, rende l'evento un caso di studio interessante: egli descrisse Einstein come una persona affabile e per nulla insistente in merito alla relatività.¹¹¹ Holton interpreta tale descrizione una conseguenza del fatto che Einstein non conoscesse una parola d'inglese e, a suo avviso, fra i due scienziati non ci sarebbe stata una reale comprensione.¹¹² Shankland ha, però, poi affermato che Miller conosceva bene il tedesco e che non vi fu alcun problema linguistico durante la loro discussione.¹¹³ La spiegazione di Holton, perciò, rimane troppo debole per lasciare il caso senza approfondimenti.

Hentschel affronta il caso Miller in modo più approfondito con un attento studio delle fonti primarie, in particolare delle numerose lettere presenti nell'archivio Einstein riguardanti tali esperimenti.¹¹⁴ La ricchezza di fonti primarie porta Hentschel a formulare una tesi in diretta contrapposizione a quella di Holton. Secondo Hentschel, infatti, Einstein dette un valore predominante agli esperimenti fino al 1927 e si comportò, rispetto ai risultati di Miller, come la maggior parte dei fisici sperimentali del periodo. Per dimostrare ciò, Hentschel evidenzia come Einstein fosse molto interessato alle prime ripetizioni dell'esperimento di Michelson-Morley successive agli annunci di Miller.

L'articolo di Hentschel ha un approccio metodologico ferreo. Ho deciso, però, di non partire da nessuna ipotesi storiografica predeterminata per quanto concerne il tema della reazione di Einstein agli annunci di Miller, pur riconoscendo che l'approccio di Hentschel è corretto e il

¹¹⁰ Holton cita le lettere Einstein a Besso, 25 dicembre 1925, *loc. cit.*; e Einstein a Piccard, 14 marzo 1926, in Albert Einstein Archives, presso la Hebrew University a Gerusalemme, *CPAE* 19 216.

¹¹¹ Miller descrive Einstein in questo modo nella lettera: Miller a Mendenhall, 2 giugno 1921, Thomas Corwin Mendenhall Papers, box 10, fol. 8, in Worcester Polytechnic Institute (WPI), University Archives and Special Collections, G. C. Gordon Library. Miller ripeté le stesse buone opinioni ricevute durante la visita di Einstein in Miller a Larmor, 9 giugno 1921, Joseph Larmor Papers, Royal Society Archives (vedi Cap. 5).

¹¹² Holton (1969), *op. cit.*, p. 186.

¹¹³ Shankland, R. S. (1973a) "Conversations with Einstein II", *American Journal of Physics*, 41 (1973): 895-901, p. 897.

¹¹⁴ Hentschel (1992), *op. cit.*

suo articolo costituisce una fondamentale fonte d'informazione. Ho, perciò, rivisto le stesse fonti di Hentschel mettendole in relazione con altre e discuterò le conclusioni di questi dopo aver analizzato il contesto delle diverse fonti primarie nel Cap. 5.

Concludendo, si può affermare che la storiografia esplicita concernente il caso Miller poco si discosta dalla storia implicita standard contenuta nei libri di testo. Shankland è spesso citato sia come fonte principale, sia come colui che ha dimostrato definitivamente che l'effetto trovato da Miller non ha nulla a che vedere con un *ether-drift*. Questo approccio è, a mio avviso, origine di molti problemi, in quanto il lavoro storiografico di Shankland s'inserisce in una ricerca che non ha obiettivi specificamente storiografici. Chi d'altronde, come Swenson, si rifà alle versioni date da Miller tende ad accettarle acriticamente fornendo una versione distorta e parziale delle reazioni della comunità accademica.

Quando l'esperimento di Miller viene inserito nel discorso globale dell'accettazione e sviluppo della relatività negli USA, come in Crelinsten e in Goldberg, il tema è affrontato nel giusto contesto, ma perde una parte della sua specificità.

Negli studi in cui si approfondisce il lato della reazione di Einstein agli esperimenti di Miller, il caso diventa esempio di una particolare tesi storiografica molto precisa sull'attitudine di Einstein e, soprattutto, non si ha un'analisi della relazione tra la reazione di Einstein e quella della comunità scientifica.

Il mio lavoro s'inserisce in questi dibattiti cercando di colmare l'assenza di una chiara descrizione storiografica della reazione della comunità scientifica statunitense agli annunci di Miller e comprendendo un'analisi del lavoro sia scientifico che storico di Shankland.

2.6.2. *L'effetto Sagnac nei resoconti storici*

L'effetto Sagnac ha un posto completamente diverso nella storia della fisica del Novecento rispetto al caso Miller. Si tratta, infatti, di un esperimento riuscito: il suo risultato, seppur poco noto, fa parte delle conoscenze acquisite dell'odierna comunità scientifica ed è comunemente usato nella navigazione aero-spaziale e nella sincronizzazione del GPS.

È, quindi, comprensibile che l'approccio storiografico verso questo effetto sia stato completamente differente rispetto a quello avuto verso il caso Miller. Esiste, perciò, una certa quantità di articoli storici che analizzano l'effetto in due contesti principali: il primo derivante dall'evoluzione applicativa e sperimentale, l'altro all'interno nel dibattito teorico.

La storia dell'effetto Sagnac è stata poco studiata fino agli anni '60, quando lo sviluppo

della tecnologia laser ne ha reso possibile l'utilizzo nella navigazione aerea. Prima di quel momento l'effetto è stato presente nella letteratura scientifica come presunto problema all'interno del programma di ricerca relativista oppure nelle poche ripetizioni sperimentali. Il primo articolo storiografico sull'effetto Sagnac fu, infatti, scritto nella convinzione che questo dimostrasse l'esistenza dell'etere e confutasse la teoria della relatività ristretta.¹¹⁵ L'obiettivo dell'autore di questo primo resoconto storico è di riportare alla luce l'esperimento ignorato sia dagli storici della scienza che dai fisici, ed egli lo fa discutendo i fondamenti della fisica e mostrando come l'esperimento fu ideato e realizzato con il chiaro proposito di dimostrare l'esistenza dell'etere. Tale articolo, anche se pubblicato in una rivista di storia della scienza, può considerarsi parte della storiografia anti-relativista e il suo approccio deriva piuttosto da un miscuglio di fondamenti di fisica, filosofia della scienza e storia.

Una metodologia storiografica più precisa si trova in articoli di storia scritti dopo l'invenzione del giroscopio laser. Il primo di questi, un articolo di E. J. Post del 1967, fu scritto in lingua inglese e divenne il punto di riferimento sulla storia dell'effetto.¹¹⁶ L'autore descrive la storia scientifica dell'effetto basandosi esclusivamente su articoli pubblicati.

Il primo di questi fu scritto da Michelson nel 1904 ed esponeva un metodo per sperimentare l'effetto di rotazione della Terra su due raggi di luce contro-rotanti percorrenti uno stesso circuito chiuso.¹¹⁷ L'esperimento era ideato nel quadro teorico dell'etere stazionario e il calcolo di Michelson, se si eccettua un errore numerico, conduceva all'effetto ora conosciuto col nome di Sagnac.

Post, in seguito, descrive tutti i passaggi storici accettati dalla comunità scientifica:

- la tesi sperimentale del tedesco Harress che verificò l'effetto nel 1911 senza accorgersene e la ripresa di tal esperimento da parte di Harzer nel 1914, e di Von Laue e Knopf nel 1919;¹¹⁸

¹¹⁵ Chappel Jr., J. E. (1965) "Georges Sagnac and the Discovery of the Ether", *Archives Internationales d'Histories des Sciences*, 18 (1965): 175-90.

¹¹⁶ Post, E. J. (1967) "Sagnac Effect", *Review of Modern Physics*, 39 (1967): 475-93.

¹¹⁷ Michelson, A. A. (1904) "Relative Motion of Earth and Ether", *Philosophical Magazine*, 8 (1904): 717-19.

¹¹⁸ Harress morì giovanissimo nel 1914 e non pubblicò i suoi risultati, perciò esiste solo la sua tesi di laurea su tale esperimento: Harress, F. (1911) "Die Geschwindigkeit des Lichtes in bewegten Körpern" (Ph. D. thesis: Jena, 1911). Il primo a capire, indipendentemente dal lavoro di Sagnac, che l'esperimento di Harres dimostrava l'esistenza di un effetto dovuto alla rotazione fu Harzer, P. (1914a) "Über die Mitführung des Lichtes in Glas und die Aberration", *Astronomische Nachrichten*, 198 (1914): 378-92. Harzer considerava questo effetto dovuto all'esistenza di un etere stazionario. In un contesto relativista appaiono, invece Knopf, O., (1920) "Die Versuch von F. Harress Die Geschwindigkeit des Lichtes in Bewegten Körpern", *Annalen der Physik*, 62 (1920): 389-447, e, soprattutto, Von Laue, M. (1920) "Zum versuch von F. Harress", *Annalen der Physik*, 62 (1920): 448-63.

- l'esperimento di Sagnac del 1913;¹¹⁹
- le interpretazioni relativistico-generaliste di Paul Langevin (1872-1946) del 1921 e del 1937;¹²⁰
- altri esperimenti che hanno dimostrato la veridicità dell'effetto, ne hanno ampliato le caratteristiche, e ne hanno aumentato la precisione.¹²¹

Il resoconto storico di Post termina con avvenimenti a lui quasi contemporanei, in particolare l'esperimento di Macek e Davis che, grazie alla tecnologia laser, aveva aumentato la precisione della misura dell'effetto rendendolo utilizzabile dal punto di vista applicativo.¹²²

L'articolo di Post può essere considerato il lavoro storiografico standard. L'autore si limita ad un'esposizione delle pubblicazioni concernenti l'effetto Sagnac, fornendo un chiaro svolgimento dei fatti dal punto di vista sperimentale ed interpretativo, e dando rilievo alle derivazioni di Langevin. Nel suo articolo, invece, non trovano spazio le problematiche storiografiche collegate all'accettazione della relatività negli anni '20, e agli obiettivi anti-relativisti di Sagnac e delle ripetizioni compiute negli anni '30 da Dufour e Prunier. L'articolo può, perciò, essere considerato una sorta di catalogo degli sviluppi scientifici accettati dalla comunità dei fisici, senza approfondimenti storiografici o epistemologici. Tale elenco può, quindi, essere accolto senza eccessive considerazioni e andrà, più che altro, ampliato, com'è avvenuto in successive rivisitazioni storiche dell'effetto Sagnac.

Prima di passare alla breve rassegna degli altri articoli che hanno operato un'analisi storica dell'effetto Sagnac, è interessante notare che Post accenna alla problematica storica dell'interpretazione data da Einstein dell'effetto Sagnac. Post cita due brevi articoli di Einstein dai quali sembrerebbe che questi non abbia mai considerato l'effetto Sagnac

¹¹⁹ Sagnac, G. M. M. (1913a) "L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme", *Comptes Rendus*, 157 (1913): 708-10; Sagnac, G. M. M. (1913b) "Sur la preuve de la réalité de l'éther lumineux par l'expérience de l'interféromètre tournant", *Comptes Rendus*, 157 (1913): 1410-13; Sagnac, G. M. M. (1914) "Effet tourbillonnaire Optique. La Circulation de l'éther lumineux dans un interféromètre tournant", *Journal De Physique*, 4 (1914): 177-95.

¹²⁰ Langevin, P. (1921) "Sur la théorie de relativité et l'expérience de M. Sagnac", *Comptes Rendus*, 205 (1921): 831-34 ; Langevin, P. (1937) "Sur l'expérience de Sagnac", *Comptes Rendus*, 205 (1937): 304-6.

¹²¹ Pogány, B. (1926) "Über die Wiederholung des Harress-Sagnacschen Versuches", *Annalen der Physik*, 80 (1926): 217-31; Pogány, B. (1928) "Über die Wiederholung des Harresschen Versuch", *Annalen der Physik*, 85, (1928): 244-56; e Dufour, A., e Prunier, F. (1952) "Sur un déplacement de franges enregistré sur une plate-forme en rotation uniforme", *Le Journal de Physique Et le Radium*, 3 (1952): 153-61.

¹²² Macek, W. M., e Davis Jr., D. T. M. (1963) "Rotation Rate Sensing with Travelling-Wave Ring Lasers", *Applied Physics Letters*, 2 (1963): 67-68.

problematico per le teorie della relatività.¹²³ Questo tema, anche per mancanza di fonti, non è mai stato approfondito, e sarebbe stato interessante svilupparlo in questa tesi, ma non mi è stato possibile trovare fonti che contraddicano o confermino l'interpretazione di Post. Dall'analisi generale dell'approccio di Einstein ai casi di *ether-drift* non si può che confermare l'analisi di Post.

Le possibilità applicative hanno prodotto altri articoli dedicati alla storia dell'effetto Sagnac dalla sua ideazione agli ultimi utilizzi. Il primo di questi articoli, scritto da C. V. Heer, riconosce la priorità di Lodge nella previsione dell'effetto.¹²⁴ Questa è l'unica aggiunta di Heer alla storia già esposta da Post, rispetto agli eventi antecedenti il 1959.

Più vicino al lavoro della presente tesi è un articolo dello storico della scienza Donald MacKenzie pubblicato nel 1993.¹²⁵ Sebbene l'autore sia interessato, soprattutto, alla storia dell'applicazione del giroscopio laser nella navigazione aerea, egli scrive una lunga prima parte dedicata alla ricerca dell'etere tramite gli esperimenti del tipo Sagnac. Questa parte inserisce il lavoro di Sagnac nell'ambito della ricerca dell'etere ed è ricca di informazioni storiche legate alla reazione della comunità accademica all'esistenza dell'effetto. La rappresentazione fornita è quella di un effetto compiuto nella speranza di trovare l'etere e che fu ben accolto in questo senso dalla comunità scientifica francese, la quale era "*predominantly hostile to relativity*". L'autore vede una differenza dell'accoglienza della relatività dipendente dalla cultura scientifica nazionale. Il mondo scientifico di lingua anglosassone, secondo MacKenzie, era, infatti, a favore delle teorie di Einstein, a parte Herbert E. Ives, il quale riprese l'effetto Sagnac nelle sue argomentazioni contro la teoria di Einstein. Sebbene lo faccia in modo molto breve, questo articolo disegna un'immagine del differente rapporto delle comunità scientifiche rispetto al significato dell'effetto Sagnac nei confronti della relatività.

Altri lavori risultano essere meno interessanti per la prospettiva storiografica qui scelta. Nel

¹²³ I due articoli nascono dalla pubblicazione dell'articolo di Harzer sull'esperimento di Harress e sono: Einstein, A. (1914a) "Bemerkungen zu P. Harzers Abhandlung 'Über die Mitführung des Lichtes in Glas und die Aberration'", *Astronomische Nachrichten*, 199 (1914): 7-10; e Einstein, A. (1914b) "Antwort auf eine Replik Paul Harzers (Nr.4753, S. 10 und 11)", *Astronomische Nachrichten*, 199 (1914): 47-48.

¹²⁴ Heer, C. V. (1984) "History of the Laser Gyro", *Proceedings of SPIE*, 487 (1984): 2-12. Heer cita Lodge, O. (1897) "Experiments on the absence of mechanical connexion between ether and matter", *Philosophical Transactions of Royal Society of London Series A*, 189, (1897): 149-65. Lodge aveva già dedotto l'effetto nel precedente e ben noto articolo Lodge, O. (1893) "Aberration problems – a discussion concerning the connection between ether and gross matter; with some new experiments", *Philosophical Transactions of Royal Society of London Series A*, 184, (1893): 727-807.

¹²⁵ MacKenzie, D. (1993) "From the Luminiferous Ether to the Boeing 757: A History of the laser Gyroscope", *Technology and Culture*, 34 (1993): 475-515.

1993 viene pubblicato un articolo in cui si approfondisce e si chiarifica la storia del calcolo di Lodge e il suo, possibile, ruolo nello sviluppo dell'idea di Michelson.¹²⁶ Recenti articoli, scritti nel contesto dell'interpretazione relativista dell'effetto per onde elettromagnetiche e onde di De Broglie, hanno riassunto tutte le interpretazioni e gli esperimenti legati all'effetto dal 1893, quando Lodge lo prevede per la prima volta, fino agli anni '90.¹²⁷ Tali articoli non hanno una finalità storiografica, ma interpretativa, per cui analizzano le varie interpretazioni e i diversi esperimenti come elenchi privi dell'analisi contestuale del periodo in cui questi vennero eseguiti.

Un lavoro completo sulla bibliografia sull'effetto Sagnac è stato, invece, compiuto nella tesi di dottorato di R. Martinez-Chavanz, il quale non ha pubblicato nessun articolo su queste ricerche.¹²⁸ Martinez-Chavanz inserisce nel quadro teorico della teoria della relatività generale tutti i lavori sperimentali e teorici compiuti sull'effetto Sagnac realizzando opera di critica teorica delle diverse interpretazioni. L'autore della tesi non sembra utilizzare una particolare metodologia storiografica e le domande che egli pone non sono storiche, ma teoriche. Nelle critiche teoriche che muove, però, l'autore fa alcune asserzioni di tipo storico. In particolare, egli afferma che la teoria di Sagnac era arretrata anche nel periodo in cui essa fu formulata e faceva utilizzo di un concetto, quello dell'etere, che era oramai sparito dalle teorie fisiche. Questa descrizione è diametralmente opposta a quella di MacKenzie e sarà importante vedere se una ricerca più approfondita delle fonti primarie potrà chiarire l'ambiguità rilevata.

L'effetto Sagnac è citato anche in alcuni studi sull'accoglienza della relatività presso la comunità scientifica francese, ambito centrale di una parte della mia ricerca (vedi Cap. 4).

Il filosofo e storico della scienza Michel Paty dedica un breve paragrafo a Sagnac nel suo articolo sulla "*scientific reception of relativity in France*".¹²⁹ Paty utilizza i *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* come fonte per potere descrivere il dibattito sulla relatività negli anni '20 in Francia. In questo modo mostra come una parte dei fisici francesi fosse

¹²⁶ Anderson, R., Bilger, H. R. e Stedman, G. E. (1994) "Sagnac Effect: A century of Earth-rotated interferometers", *American Journal of Physics*, 62 (1994): 975-85.

¹²⁷ Hasselbach, F., e Nicklaus, M. (1993) "Sagnac experiment with electrons: Observation of the rotational phase shift of electron waves in vacuum", *Physical Review A*, 48 (1993): 143-50; Malykin, G. B. (1997) "Earlier studies of the Sagnac effect", *Physics-Uspeski*, 40 (1997): 317-21; Malykin, G. B. (2000) "The Sagnac Effect: correct and incorrect explanations", *Physics-Uspeski*, 170 (200): 1229-52.

¹²⁸ Martinez-Chavanz, R. (1980) "L'Expérience de Sagnac et le Disque Tournant" (Ph.D. thesis, Université de Paris VI, 1980).

¹²⁹ Paty, M. (1987) "The Scientific Reception of Relativity in France", in Glick, T. F. (ed.), *The Comparative Reception of Relativity*, *Boston Studies in the Philosophies of Science* Vol. 103, (Dordrecht: Reidel, 1987): 113-67.

apertamente ostile alle teorie di Einstein, soprattutto per ciò che questa comportava per il concetto di etere. Paty afferma che la maggior parte degli scienziati dell'*Académie des Sciences (AdS)* non era favorevole ai fondamenti delle nuove teorie.

Per poter pubblicare articoli nei *Comptes Rendus* bisognava o essere membri dell'*AdS* o essere presentati da uno di questi. Daniel Berthelot (1865-1927) era uno dei sei appartenenti alla sezione di *Physique Générale* ed era, nella descrizione di Paty, particolarmente ostile alla relatività. Negli anni '20 Berthelot presenta numerosi articoli scritti da altri, tra i quali troviamo numerosi articoli di Sagnac. Paty descrive Sagnac come un convinto anti-relativista che continuò a lavorare nel contesto dell'etere, concetto profondamente radicato nella tradizione scientifica francese. Paty afferma, inoltre, che le osservazioni di Sagnac “*still dominated the experimental scene at the beginning of the 1920s*”.¹³⁰

Paty conferisce molta rilevanza all'esperimento di Sagnac all'interno del dibattito francese sulla relatività negli anni '20 e riassume anche la teoria dell'etere che il fisico francese sviluppa nello stesso periodo. Per quello che concerne uno dei principali interessi della presente tesi, ossia la reazione della comunità scientifica francese all'esperimento di Sagnac, lo storico afferma che “*Sagnac's experiment s on the rotating disk were used in France as a powerful counter-argument to the theory of relativity*”.¹³¹

Tale affermazione è poi contrastata nel proseguo del paragrafo, in cui l'autore prima afferma che Langevin ha dimostrato che non c'era nessuna reale contraddizione tra l'effetto Sagnac e le teorie della relatività, sia speciale sia generale, poi afferma:

*After Langevin's demonstration, only the most doctrinaire opponents would use Sagnac's experiments against relativity. Skeptical mathematicians such as Piccard and Painlevé considered the compatible with Einstein's theory.*¹³²

Mi sono soffermato a lungo sulla descrizione di Paty, perché il mio lavoro di ricerca affronta lo stesso tema, integrando l'analisi con fonti primarie non pubblicate e dedicando l'attenzione al solo caso Sagnac. Paty compie delle affermazioni forti e generali, in modo particolare nell'ultima frase citata, senza una chiara descrizione delle fonti a cui attinge e

¹³⁰ Ibid., p. 140.

¹³¹ Ibid., p. 141. Tale frase è legata ad una nota, da cui si deduce che la fonte sia la ripresa dell'esperimento di Sagnac da parte dei fisici francesi Dufour e Prunier negli anni '30 per contrastare le spiegazioni relativiste fornite da Langevin all'effetto. Vedere Dufour e Prunier (1952), *op. cit.*

¹³² Ibid., p. 141.

del modo in cui le interpreta. La parte di questa tesi dedicata alla relazione tra Sagnac e l'ambiente scientifico francese non potrà fare a meno di confrontarsi con il lavoro di Paty o per confermare le sue tesi o per criticarle in base ad altre fonti o a una diversa interpretazione delle stesse.

In un contesto simile, ma in modo affatto diverso, l'effetto Sagnac è commentato nella parte del libro di Goldberg, dedicata alla ricezione della relatività in Francia.¹³³ Goldberg dedica poche righe piene di imprecisioni alla figura di Sagnac e all'accoglienza della relatività in Francia. Una prima inesattezza si ha quando Goldberg afferma che Langevin cambiò il suo punto di vista sulla teoria di Einstein dopo la visita di questi in Francia nel 1910. La visita ebbe luogo, in realtà, molto tempo dopo, nel 1922, e i due fisici ebbero modo d'incontrarsi al primo congresso di Solvay nel 1911. Soffermandosi, poi, sulle poche righe che dedica a Sagnac, si scopre che l'autore offre una descrizione totalmente diversa da quella di Paty e basata su un'interpretazione errata delle fonti. Goldberg, infatti, sostiene:

*The only other important work in French physics on those questions [the relativity theories] between 1905 and 1911 is that of G. Sagnac, who devised ingenious techniques to detect the motion of the earth through the ether. The conclusion of his experiments was that the principle of relativity is a valid experimental generalization. It was the validity of the principle, according to Sagnac, that prevented the detection of the earth's motion through the ether.*¹³⁴

Ho trascritto tutte le affermazioni di Goldberg su Sagnac perché costituiscono un esempio del travisamento compiuto in alcuni ambiti, i quali forniscono solidi argomenti alle critiche storiografiche anti-relativiste.

Come vedremo meglio in seguito, la descrizione di Goldberg è del tutto errata sia dal punto di vista temporale (l'effetto fu compiuto solo nel 1913), sia come descrizione dell'interpretazione di Sagnac. Goldberg, inoltre, non cita le fonti, rendendo impossibile una revisione esatta del suo modo di descrivere l'argomento.

Per concludere, la storia esplicita dedicata a Sagnac è, contrariamente a quello che avviene nel caso di Miller, molto più sviluppata rispetto alla storia implicita. Ciò è una comprensibile conseguenza della profonda differenza che sussiste nel fatto che

¹³³ Goldberg, S. (1984), "As If It Never Happened: The French Response", in Goldberg (1984), *op. cit.*, pp. 205-20.

¹³⁴ *Ibid.*, p. 217.

l'esperimento di Miller è un risultato non accettato dalla comunità scientifica, mentre l'effetto Sagnac è parte integrante delle conoscenze scientifiche attuali.

Una volta che, però, si passi all'ambito della storiografia attinente l'accoglienza della relatività nelle comunità scientifiche nazionali negli anni '20-'30, questi esperimenti trovano un posto particolare e simile tra loro: essi risultano essere esperimenti utilizzati come uno dei principali argomenti contro le teorie della relatività. Per questo appare razionale la scelta di studiarne le reciproche storie e metterle in relazione per trovare differenze e similitudini.

2.7. Conclusioni

La storiografia sui casi di Miller e Sagnac, considerando solo il loro ruolo nel dibattito relativista contemporaneo, è contrastata e presenta notevoli differenze di approccio. Questa diversità è basata su ciò che questi casi rappresentano per la scienza ufficiale: gli esperimenti di Miller non corrispondono ad un effetto che ha importanza teorica, ossia il loro risultato dipese da cause locali sistematiche a cui Shankland, McCuskey, Leone e Kuerti hanno dato una spiegazione accettabile nel 1954, mentre l'effetto Sagnac è reale e ha una sua importanza sia nel mondo delle applicazioni, sia come problema teorico all'interno del programma di ricerca relativista.

Le storie ortodosse, sia esplicite che implicite, non mostrano delle problematiche storiografiche quali la reazione delle relative comunità scientifiche e il quadro teorico da cui partì Sagnac per la scoperta dell'effetto, offuscando l'opposizione del fisico francese verso le teorie della relatività. La totale mancanza d'interesse verso le teorie di Miller e Sagnac, in quanto non facenti parte del programma di ricerca attuale, ha fatto sì che l'interesse storiografico verso questi casi sia giunto, soprattutto, da scienziati "dissidenti", ai margini della comunità scientifica, i quali criticano decisamente l'impostazione ufficiale con cui i casi scelti vengono descritti. Questa situazione porta ad una contrapposizione teorica, priva di una reale comunicazione, che coinvolge anche la storiografia degli eventi, la quale diventa un'argomentazione all'interno del conflitto teorico nel caso degli anti-relativisti, mentre viene ignorata dalla scienza ufficiale.

Molte delle analisi storiche riportate in questo capitolo si basano, inoltre, su fonti pubblicate e, nel caso di Miller, si accettano acriticamente le descrizioni storiche compiute dagli stessi protagonisti. Appare, perciò, interessante cercare di colmare la lacuna riguardante la storiografia di questi casi con un'analisi storico-critica delle fonti primarie. Questo non è fatto con l'obiettivo di enfatizzare la loro importanza, come vorrebbero gli anti-relativisti, ma con l'obiettivo di mostrare l'evoluzione di un programma di ricerca in rapporto a coloro che non si convertirono. In particolare, sarà interessante costruire una parte della storia dell'anti-relativismo negli USA e in Francia mostrando quali furono le caratteristiche essenziali delle reazioni alla relatività e quali furono le dinamiche interne a queste due società accademiche rispetto ai casi scelti.

Ritengo che questo tema non sia mai stato affrontato in maniera completa e organica, ma solo tangenzialmente, da coloro che si sono occupati dell'accettazione della relatività nelle diverse comunità scientifiche nazionali.

Grazie all'analisi di fonti primarie concernenti i casi scelti, si potranno scorgere quegli atteggiamenti comportamentali ed epistemologici di una particolare comunità accademica che non sono sempre chiaramente visibili con la sola lettura dei documenti pubblicati nella letteratura scientifica.

Capitolo 3

Premessa storica: l'etere luminifero nel XIX secolo

3.1. Introduzione

La storia dello sviluppo del concetto di etere del XIX secolo è uno degli argomenti maggiormente trattati dalla storiografia contemporanea. La vastità e la rilevanza di tale soggetto, permettono una molteplicità di approcci dipendenti dalle particolari domande poste dallo storico. Molti studiosi hanno analizzato questa parte dello sviluppo della fisica, ma vi sono ancora possibilità di esplorazione e approfondimento, sia per la vastità delle fonti, sia per le diverse possibilità interpretative. Per questo è necessario indirizzare lo sguardo su alcuni temi precisi di questo argomento.

Nel caso della presente tesi è opportuno scegliere gli eventi in base alle ripercussioni che essi hanno avuto in due ambiti della fisica del XX secolo: quello attinente allo sviluppo degli esperimenti di *ether-drift* e quello vicino al contrasto interpretativo tra sostenitori dell'esistenza dell'etere e sostenitori della relatività. Come già espresso nel Cap. 1, questa dialettica, anche se riduttiva rispetto alla complessità dello sviluppo storico, è il punto di vista favorevole da cui leggere gli argomenti trattati.

In questo ci aiuta una prassi ben stabilita, nei libri di testo e in recenti studi storici, che collega la nascita della teoria della relatività speciale a un problema specifico della ricerca ottocentesca sull'etere. Come afferma Hirosgie:

Since the first systematic account by Max von Laue, it has been, and still is, the common practice to introduce the theory of relativity with a survey of the nineteenth century ether problem. By "ether problem" I mean the theoretical and experimental investigations of possible influences of the earth's motion relative to the ether on optical and electromagnetic phenomena.¹

¹ Hirosgie, T. (1976) "The Ether Problem, the mechanistic Worldview, and the Origins of the Theory of Relativity", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 7 (1976): 3-82, p. 3.

La moderna storiografia ha dibattuto vivacemente su quali siano stati i problemi fondamentali che abbiano portato alla teoria della relatività ristretta, così come formulata da Einstein nel 1905, ma in questa tesi la scelta è obbligata e la premessa storica s'inserirà nella tradizione così chiaramente espressa da H. Poincaré.

La sintesi più chiara di questo approccio storiografico alla nascita della teoria della relatività ristretta è stata compiuta, a mio avviso, in due articoli recenti di O. Darrigol e di M. Janssen e J. Stachel.² Gli autori collegano le origini della teoria della relatività ristretta al problema ottocentesco dell'ottica e dell'elettrodinamica dei corpi in moto rispetto all'etere. Procedimento questo che risulta ottimale rispetto ai temi trattati nella mia ricerca.

Tale lettura rivisita alcuni eventi storici concentrando l'attenzione sugli esperimenti ottici effettuati per rilevare il moto della Terra rispetto all'etere, sulle loro interpretazioni che portarono alla formazione di due teorie dell'etere luminifero contrastanti, sull'impossibilità di queste due teorie di dar conto di tutti i fenomeni ottici,³ sull'unione realizzata da Maxwell tra teoria elettromagnetica e fenomeni luminosi e, infine, sullo sviluppo delle teorie elettrodinamiche che cercarono di inglobare gli effetti ottici in un quadro generale soddisfacente, in particolare la teoria di Lorentz, la quale divenne, tra il 1895 e il 1905, una sorta di teoria paradigmatica nelle diverse comunità scientifiche nazionali.

Tra tutti i temi trattati in questa storia delle origini della teoria della relatività ristretta, ho scelto di approfondire quelli che sono più rilevanti per i casi scelti: l'esperienza di Fizeau, gli esperimenti del tipo Michelson-Morley, con attenzione particolare alla ricezione di tali esperimenti, e gli sviluppi della teoria elettrodinamica di Lorentz.

² Janssen, M., e Stachel, J. (2004) "The Optics and the Electrodynamics of Moving Bodies", *Max Planck Institut für Wissenschaftsgeschichte*, Preprint 265 (2004): 1-36, e Darrigol, O. (2005) "The Genesis of the Theory of Relativity", *Séminaire Poincaré*, 1 (2005): 57-78.

³ Gli esperimenti e osservazioni a cui ci si riferisce sono: la scoperta dell'angolo di aberrazione, esperimenti ottici al primo ordine della costante di aberrazione $\frac{v}{c}$, dove v è la velocità della terra rispetto all'etere e c la velocità della luce nell'etere, esperimento di Fizeau sul trascinarsi dell'etere da parte dell'acqua in movimento, e gli esperimenti al secondo ordine della costante d'aberrazione, ossia $\frac{v^2}{c^2}$.

3.2. Esperienza di Bradley. La scoperta dell'aberrazione stellare (1728)

Negli articoli contemporanei di storia della fisica che collegano la nascita della teoria della relatività con gli esperimenti ottici sul moto relativo tra Terra ed etere, il 1728 ricorre spesso come data d'inizio. Le osservazioni astronomiche di James Bradley (1692-1762), compiute nel contesto della teoria dell'emissione, la quale era basata sulla natura corpuscolare della luce, e svoltesi in vari anni, si conclusero con la comunicazione alla *Royal Society* dell'osservazione di uno spostamento periodico delle stelle fisse dipendente dalla velocità orbitale terrestre.⁴

La scoperta di Bradley potrebbe essere un esempio di quello che è chiamato, con un neologismo, serendipità. L'allora *Savillian Professor of Astronomy* di Oxford stava cercando uno spostamento di parallasse della posizione della stella γ , nella testa della costellazione del Dragone, in funzione dalla posizione della Terra attorno al Sole. Se tale spostamento fosse stato osservato sarebbe stata la prima dimostrazione astronomica del moto orbitale terrestre.

Bradley visionò sì uno spostamento con periodicità annuale, ma le direzioni e i versi di tale variazione erano dipendenti dal vettore velocità della Terra e non dalla sua posizione rispetto al Sole. Bradley riuscì a cogliere che c'era una relazione di proporzionalità tra la velocità orbitale terrestre e gli spostamenti della stella osservata: nel calcolo della posizione della stella bisognava inserire un termine dipendente dal rapporto tra velocità orbitale terrestre e la velocità della luce, considerata come costante.

Ricordando che Bradley ragionava nei termini, allora accettati, della teoria corpuscolare della luce, il fenomeno osservato era spiegabile in modo semplice dal teorema della composizione vettoriale delle velocità dei corpuscoli di luce e del moto dell'osservatore sulla Terra. Premessa fondamentale di questo calcolo era che la velocità della luce fosse una costante per tutti i corpuscoli e qualunque fosse la sorgente.

Quasi tutte le letture storiche della scoperta dell'angolo di aberrazione, corrispondente al rapporto $\frac{v}{c}$, offrono una medesima rappresentazione: un effetto del tutto prevedibile all'interno della teoria dell'emissione di Newton, dominante nel periodo in cui lavorò

⁴ Bradley, J. (1729) "Account of a new discovered motion of the Fix'd Stars", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 35 (1729): 637-61.

Bradley. Il fatto che tale spiegazione fosse in piena consonanza con la teoria dominante comportò che la scoperta fu accolta senza particolari dibattiti e divenne prassi quasi immediata l'utilizzare la costante d'aberrazione nei calcoli astronomici.

Confrontandosi con tale lettura semplificata dell'accoglienza della scoperta di Bradley, Janssen e Stachel sottolineano una problematica: pur essendo vero che il teorema della composizione delle velocità tra corpuscoli di luce e velocità della Terra rendeva conto del fenomeno dell'aberrazione, questa spiegazione doveva premettere che c'era qualcosa di definito chiamato "velocità della luce" che rimaneva costante nel vuoto. Questo fatto non era scontato all'interno di una teoria corpuscolare che poteva prevedere velocità diverse in base alle caratteristiche dei corpi emittenti e alle particolarità dei singoli corpuscoli.

In realtà, l'interpretazione corpuscolare dell'angolo d'aberrazione così come reso pubblico da Bradley nel 1729, ossia lo spostamento stellare in base al rapporto $\frac{v}{c}$, costituiva una dimostrazione dell'esistenza di una velocità della luce finita. Questa era la prima prova dopo quella ottenuta, nel 1676, dall'astronomo danese Olaf Römer (1644-1710) grazie ai ritardi delle eclissi del satellite Io di Giove.⁵ Andando nello specifico del calcolo di Bradley, lo storico Cohen afferma:

*[Bradley] deduced, from his value of the constant of aberration, that the time required for light to travel from sun to the earth should be 8m 12s, a figure much closer to NEWTON's and HALLEY's than ROEMER's.*⁶

Cohen sostiene, inoltre, che, all'interno della comunità scientifica britannica del periodo, la finitezza della velocità della luce era stata accettata, anche se il valore dato da Römer era disquisito in base sia alle tavole pubblicate dallo stesso Römer, sia in base a osservazioni compiute da altri astronomi. Come afferma Van Helden, la pubblicazione di Römer all'epoca ebbe importanza, soprattutto, come prima dimostrazione della finitezza della velocità della luce, sebbene adesso venga considerata la prima determinazione sperimentale

⁵ Per approfondimenti sulla storia della scoperta di Römer, la sua accoglienza presso gli scienziati del periodo e la determinazione della velocità della luce prima di Bradley vedere Cohen, I. B. (1940) "Roemer and the first determination of the velocity of light (1676)", *Isis*, 31 (1940): 327-90; e Van Helden, A. (1983) "Roemer's Determination of Light", *Journal for the History of Astronomy*, 14 (1983): 137-41.

⁶ Cohen (1940), *op. cit.*, p. 357.

del suo valore. All'epoca delle osservazioni di Römer, infatti, era molto diffusa in Francia la teoria di Descartes, che prevedeva una trasmissione immediata.

Possiamo, perciò, affermare che la scoperta di Bradley divenne nota sia come seconda dimostrazione indipendente della finitezza della velocità della luce, sia come secondo metodo sperimentale astronomico di calcolarne il valore. Il valore trovato da Bradley, inoltre, si avvicinava ai calcoli teorici successivi alle affermazioni di Römer in misura maggiore del valore trovato dall'astronomo olandese.

Un altro tema sottolineato da Janssen e Stachel è l'essere, quella di Bradley, la prima dimostrazione diretta del moto orbitale intorno al Sole, anche se questa era diversa dalle aspettative iniziali dell'astronomo britannico. Il fatto che si trovasse uno spostamento delle stelle dipendente dalla velocità terrestre intorno al Sole era una dimostrazione che questo moto esisteva, anche se dipendente dai cambi di direzione della velocità e non dalla posizioni orbitali.

Tutto questo compare esplicitamente nella lettera che Bradley mandò ad Edmond Halley (1656-1742) e che fu, poi, letta alla *Royal Society*, nel gennaio del 1729. Nella comunicazione di Bradley, la finitezza e la costanza della velocità della luce in uno stesso mezzo e il moto di rivoluzione terrestre con una data velocità sono i due postulati per la spiegazione del fenomeno dell'aberrazione. Postulati che Bradley ritiene comunemente accettati in quella che potremmo chiamare la comunità scientifica dell'epoca:

*[...] I do not apprehend, that either of these Postulates will be denied me by the Generality of the Astronomers and Philosophers of the present Age; so I shall not doubt of obtaining their Assent to the Consequences, which I have deduced from them;*⁷

Come fa notare Sarton, il nome aberrazione non compare nella comunicazione di Bradley, ma solo alcuni anni dopo in alcune comunicazioni tra scienziati e senza che sia possibile risalire a chi abbia nominato così tale fenomeno.⁸

Bradley, inoltre, aveva scoperto che il fenomeno della parallasse non era sperimentabile con il grado di precisione degli strumenti da lui utilizzati. Questo implicava che le distanze tra la Terra e le stelle erano molto maggiori di quelle ipotizzate all'epoca.

⁷ Bradley, J. (1729), *op. cit.*, p. 660.

⁸ Sarton, G. (1931) "Discovery of the Aberration of Light", *Isis*, 15 (1931): 233-65. In questo articolo, nelle pp. 240-65, è riprodotto integralmente l'articolo di Bradley (1729).

Ultimo elemento da notare è che Bradley, nell'articolo, parla di velocità della luce e dell'osservatore, coincidente con la velocità orbitale della Terra considerando un moto approssimato circolare, ma esplicita solo il valore del tempo impiegato dalla luce nel compiere il tragitto Sole-Terra. Riassumendo il ragionamento di Bradley: egli parte dal dato osservato della costante d'aberrazione di $20''$,², corrispondente alla metà del diametro del movimento circolare annuale apparente della stella; da questo l'astronomo deriva che il rapporto tra la velocità della luce e della velocità orbitale terrestre è di 10210 a uno, da cui ricava il tempo di 8m e 12s che impiega la luce per arrivare dal Sole alla Terra.

Per trovare il tempo di 8m e 12s Bradley utilizza implicitamente la formula:

$$t = \frac{v}{c} \frac{T}{2\pi} \quad (3.1);$$

dove t è il tempo che impiega la luce per arrivare dal Sole alla Terra, T il periodo orbitale terrestre, v la velocità tangenziale orbitale della Terra e c la velocità della luce nel vuoto secondo la notazione contemporanea.

Per cui, Bradley poté passare direttamente dalla costante d'aberrazione $\frac{v}{c}$ al calcolo dei tempi di percorso della luce senza definire ulteriormente i valori della velocità orbitale e della velocità della luce.

Come sottolineato da Boyer, il valore temporale trovato da Bradley era di poco differente da altri calcoli fatti sulle osservazioni dei satelliti di Giove, successivi alla valutazione di Römer, e, per essere convertito in velocità, dipendeva dal valore della distanza tra Terra e Sole, sul quale non esisteva consenso unanime.⁹ Per questo motivo ci furono, per molto tempo, versioni notevolmente diverse sul valore effettivo della velocità della luce, mentre l'esistenza di questa velocità finita fu comunemente accolta dalla comunità di scienziati.

⁹ Boyer, C. B. (1941) "Early Estimates of the Velocity of Light", *Isis*, 33 (1941): 24-40.

3.3. Teoria dell'etere luminifero stazionario

Una volta supposte l'esistenza della velocità della Terra intorno al Sole in un sistema eliocentrico e una velocità della luce finita e costante, il fenomeno dell'aberrazione fu considerato facilmente interpretabile all'interno della teoria corpuscolare.

I sostenitori della teoria ondulatoria della luce dovettero, perciò, cercare una spiegazione altrettanto soddisfacente. La maggior parte delle rivisitazioni storiche sono d'accordo nell'affermare che la teoria ondulatoria della luce trovò una prima, semplice, spiegazione del fenomeno ipotizzando un etere stazionario rispetto al moto della Terra. Tale teoria fu proposta da entrambi gli scienziati che riportarono in auge la teoria ondulatoria della luce all'inizio del XIX secolo, Thomas Young (1773-1829) e Augustin-Jean Fresnel (1788-1827).

Nel 1804 lo scienziato inglese per primo propose questa spiegazione del fenomeno dell'aberrazione stellare, nel quadro della teoria ondulatoria della luce, con la nota frase:

Upon considering the phenomena of the aberration of the stars I am disposed to believe, that the luminiferous ether pervades the substance of all the material bodies with little or no resistance, as freely perhaps as the wind passes through a grove of trees.¹⁰

Young aveva proposto l'analogia del fenomeno luminoso con quello del suono già nel 1799, basandola sull'esistenza di un fluido molto rarefatto ed elastico diffuso in tutto l'universo le cui vibrazioni propagassero la luce.¹¹ L'etere di Young, tra il 1799 e il 1807, subì dei cambiamenti rilevanti e venne utilizzato anche per rendere conto dei fenomeni del calore, dell'elettricità, del magnetismo e di alcune proprietà della materia, in particolare la coesione.¹²

¹⁰ Young, T. (1804) "Experiments and Calculations relative to physical Optics", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 94 (1804): 1-14, pp. 12-13. Questa frase è stata riportata numerose volte nella storiografia riguardante la storia dell'etere e della teoria ondulatoria della luce. Tra gli altri ricordiamo: Whittaker, E. (1951) *A History of the Theories of Aether and Electricity* (London: Thomas Nelson and Sons Ltd, 1951); Janssen e Stachel (2004), *op. cit.*; Swenson Jr., L. S. (1972) *The Ethereal Ether A History of the Michelson-Morley Aether-Drift Experiments, 1880-1930* (Austin/London: University of Texas Press, 1972).

¹¹ Young, T. (1800) "Outlines of experiments and Inquiries respecting Sound and Light", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 90 (1800): 106-50.

¹² Per uno studio accurato delle rappresentazioni di etere date da Young, vedere Cantor, G. N. (1970b) "The Changing Role of Young's Ether", *The British Journal of the History of Science*, 5 (1970): 44-62.

Le ricerche sul fluido etereo erano fondamentali per formulare una teoria ondulatoria della luce, e Young ipotizzò che l'etere dovesse avere caratteristiche conformi a tutti i fenomeni che lui riteneva ad esso collegati. Questo comportò che alcune caratteristiche dell'etere di Young non dipendevano dalla pura spiegazione dei fenomeni ottici, anche se in questo ambito ebbero molta più risonanza nell'ambiente scientifico. Lo storico G. Cantor sostiene che perfino l'idea della trasmissione ondulatoria della luce, in analogia con il suono, s'impresse in Young perché era certo di un sostegno etereo del calore e dell'elettricità.

Il netto collegamento tra fenomeno di aberrazione e l'ipotesi di etere immobile, per come appare nella frase di Young sopra riportata, viene ridimensionato da uno studio più preciso dell'opera di Young e della sua immagine di etere.

Dagli studi di Cantor sulle note di Young per le lezioni degli anni 1802-1803, quando ebbe la cattedra di Filosofia Naturale presso la *Royal Institution*, si può apprendere, infatti, che lo scienziato inglese li espose la stessa idea di etere, ma con una motivazione affatto diversa.

Would not an ethereal medium pervading the universe hinder the motion of the planets? In the notebooks Young had glibly dismissed the matter: "we must suppose the ethereal medium to permeate all bodies without resistance and to be always at rest with respect to the general mass of the sun and the fixed stars".¹³

Nel 1802, quindi, Young introduce un etere che passa liberamente attraverso i corpi materiali per superare il problema, che aveva già posto Newton, del perché questo etere non disturbi il moto dei pianeti; considerazioni del tutto diverse dai fenomeni ottici dell'aberrazione.

Per rispondere ad alcune obiezioni, Young afferma che era sufficiente considerare un etere luminifero indifferente al fenomeno della coesione. Tale affermazione era, però, in contraddizione con il programma di ricerca che potremmo chiamare olistico di Young e con le sue ipotesi concernenti la densità dell'etere all'interno dei corpi. Secondo Young, infatti, la densità dell'etere era proporzionale alla densità di materia e questa densità era propagata anche ad una certa distanza intorno ai corpi. Questa ipotesi poteva portare alla spiegazione causale di alcuni fenomeni eterei elettrici e magnetici.

¹³ Cantor (1970b), *op. cit.*, pp. 56-7. La citazione di Young è presa dai *Notebook* 16/20v del 1802.

Nel 1804 Young, nel momento in cui considera il fenomeno dell'aberrazione, è costretto ad abbandonare completamente quella che Cantor chiama “*the ether distribution hypothesis*” che implicava l'esistenza di un'atmosfera eterea circondante i corpi e un'interazione tra etere e materia. Come afferma lo storico britannico:

*It was necessary for him to isolate the luminiferous ether from other imponderable fluids and optics from other subjects so that his optical theory could progress.*¹⁴

La teoria ondulatoria della luce fu sviluppata, poi, in Francia grazie al lavoro di Fresnel e di François Jean Dominique Arago (1786-1853) che “*are typically credited with jointly establishing the wave theory of light in early nineteenth-century France*”.¹⁵

Fresnel inizia ad interessarsi ai fenomeni ottici dal 1814, proponendo una congiunzione tra teoria del calore e teoria della luce dipendente da un supposto mezzo etereo. Lo storico S. Brush ha mostrato che tale atteggiamento non era poco diffuso in quel periodo: una parte della comunità scientifica, tra cui Young, stava considerando la possibilità di una teoria ondulatoria del calore.¹⁶

Quale che fosse l'origine del suo interesse per una teoria ondulatoria del fenomeno luminoso, già il 6 luglio 1814, in una lettera al fratello Léonor, Fresnel affermava che una tale teoria poteva rendere conto dei fenomeni della riflessione, della rifrazione e dell'aberrazione delle stelle.¹⁷ Per spiegare il fenomeno dell'aberrazione, Fresnel riteneva estremamente probabile che un etere stazionario pervadesse tutto l'universo, come ci conferma una famosa lettera ad Arago del 1818, dove afferma

*Je n'ai pu jusqu'à présent du moins concevoir nettement ce phénomène qu'en supposant que l'éther passe librement au travers du globe, et que la vitesse communiquée à ce fluide subtil n'est qu'une petite partie de celle de la terre; n'en excède pas le centième, par exemple.*¹⁸

¹⁴ Cantor (1970b), *op. cit.*, p. 61.

¹⁵ Levitt, T. (2000) “Editing out Caloric: Fresnel, Arago and the Meaning of Light”, *The British Journal for the History of Science*, 33 (2000): 49-65, p. 49.

¹⁶ Brush, S. (1971) “The wave theory of heat: a forgotten stage in the transition from the caloric theory to thermodynamics”, *British Journal for the History of Science*, 5 (1971): 148-53.

¹⁷ Levitt (2000), *op. cit.* p. 52.

¹⁸ Fresnel, A. (1818) “Sur l'influence du mouvement terrestre dans quelques phénomènes d'optique”, *Annales de Chimie*, 9 (1818): 57-66, p. 58.

In Fresnel appare, così, netta la connessione tra fenomeno dell'aberrazione e l'ipotesi di etere immobile. Un tale etere, poi, rimarrà la base per i successivi approfondimenti di Fresnel della sua teoria ondulatoria della luce che rimarrà a lungo quella più diffusa presso la comunità scientifica, in particolare presso quella continentale.

3.4. Il coefficiente di trascinamento di Fresnel

I possibili effetti sui fenomeni ottici del moto relativo dell'osservatore terrestre rispetto al supposto etere immobile costituirono una parte del rinato programma di ricerca della teoria ondulatoria della luce. Il secondo dato sperimentale di questo ambito di ricerca è generalmente considerato quello costituito dalle osservazioni di Arago del 1810 sugli effetti del moto terrestre sui fenomeni di rifrazione.¹⁹

Arago ideò e realizzò tale esperimento nel contesto della teoria corpuscolare della luce, ancora predominante. L'autorevole fisico francese era interessato a mostrare, con un apparato di grande precisione, le differenze di velocità della luce proveniente da stelle di diversa dimensione. Dalla teoria corpuscolare, infatti, si poteva dedurre che la velocità dei corpuscoli dipendessero dalle caratteristiche del corpo emittente. Partendo da questi presupposti, Arago utilizzò un prisma per osservare le differenze dell'angolo di rifrazione tra stelle dirette verso la Terra e quelle dirette in senso opposto.

Al contrario delle sue aspettative, i risultati di Arago mostrarono che non era percepibile alcun cambiamento del fenomeno dovuto al moto terrestre; detto con le parole di Whittaker:

*The light coming from any star behaves in all cases of reflection and refraction as it would if the stars were situated in the place which it appears to occupy in consequence of aberration, and the earth in rest; so that the apparent refraction in a moving prism is equal to the absolute refraction in a fixed prism.*²⁰

Arago propose una giustificazione all'interno della teoria corpuscolare: stelle diverse emettevano corpuscoli luminosi di differente velocità, ma l'occhio umano poteva percepire solo quei raggi la cui velocità erano compresi in un determinato *range*.

Nel dicembre 1814 Arago venne a conoscenza degli studi di Fresnel e, dal 1815 al 1821, lavorò insieme a lui alla teoria ondulatoria della luce contro forti autorità scientifiche francesi che stavano sviluppando la teoria corpuscolare, tra cui spiccavano i nomi di Pierre

¹⁹ Tali ricerche furono pubblicate molti anni più tardi, nel 1853, in Arago, F. (1810) "Mémoire sur la vitesse de la lumière, lu à la première classe de l'Institut, le 10 décembre 1810", *Comptes Rendus*, 36 (1853): 38-49.

²⁰ Whittaker, Sir E. (1951) *A History of the Theories of Aether and Electricity: Volume I: The Classical Theories* (London: Thomas Nelson and Sons Ltd, 1951), edizione utilizzata: Dover edition (New York: Dover, 1989), p. 109.

Simon Laplace (1749-1827), Siméon-Denis Poisson (1781-1840) e Jean-Baptiste Biot (1774-1862).

Durante la loro collaborazione, Arago chiese a Fresnel se le vibrazioni di un fluido universale, ossia l'etere, potevano spiegare il risultato degli esperimenti da lui effettuati sull'influenza del moto terrestre sul fenomeno della rifrazione in un prisma.

Da questa richiesta nasce la nota lettera di Fresnel ad Arago del 1818, pubblicata lo stesso anno, in cui è proposta l'ipotesi di un trascinamento parziale dell'etere. Fresnel inizia tale lettera affermando che l'assenza di qualsiasi influenza del moto terrestre sulla rifrazioni dei raggi provenienti dalle stelle potrebbe essere facilmente spiegata nel caso la Terra imprimesse il suo movimento all'etere che lo circonda, ma che questo trascinamento totale non è riconciliabile con il fenomeno dell'aberrazione. Come già aveva dichiarato Young, questo fenomeno sembra conciliarsi con un etere immobile rispetto al moto dei corpi materiali, in modo tale che l'opacità della Terra non impedisca un vento d'etere tra le sue molecole. Fresnel ragiona in questo modo:

Les ondes lumineuses ne participant point sensiblement au mouvement de la lunette [...] l'image de cet astre se trouve en arrière du fil placé au foyer de l'oculaire d'une quantité égale à celle que parcourt la terre pendant que la lumière parcourt la lunette.²¹

Per cui Fresnel cercò un'ipotesi di etere che rendesse conto contemporaneamente sia del fenomeno dell'aberrazione, sia degli esperimenti di Arago. Fresnel propose, come aveva già fatto Young, che l'etere avesse, nei corpi materiali, una densità diversa da quella posseduta nel vuoto, ma, a differenza del medico inglese, pose questa densità proporzionale al quadrato dell'indice di rifrazione. Scrivendo l'ipotesi di Fresnel in notazione moderna si ha:

$$\rho_1 = n^2 \rho \quad (3.2);$$

dove ρ la densità dell'etere nell'universo, ρ_1 la densità dell'etere all'interno dei corpi, e n l'indice di rifrazione della materia di cui è costituito tale corpo.

Per dar conto delle osservazioni di Arago, Fresnel ipotizzò che solo il *surplus* di etere venisse trascinato dai corpi materiali con la stessa velocità di questi, per cui il centro di massa dell'etere di spostava alla velocità:

²¹ Fresnel (1818a), *op. cit.*, p. 59.

$$V = \frac{n^2 - 1}{n^2} w = \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) w \quad (3.3);$$

dove V è la velocità del centro di massa dell'etere, e w è la velocità dei corpi rispetto all'etere immobile e n l'indice di rifrazione.

Il valore $\alpha = \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$ è quello ora chiamato coefficiente di trascinamento di Fresnel.

L'ipotesi del trascinamento comportava che la luce viaggiasse all'interno dei corpi in movimento con una velocità pari a:

$$v = c_1 + \alpha w \quad (3.4);$$

dove $c_1 = \frac{c}{n}$ è la velocità della luce nei mezzi rifrangenti. La formula (3.4) sostituiva la formula $v = c_1$, valida nell'ipotesi di etere stazionario senza trascinamento parziale.

Nel caso delle osservazioni compiute da Arago, la velocità dei corpi rifrangenti era uguale a quella della terra nell'etere, per cui, approssimando i calcoli al primo ordine rispetto alla costante di aberrazione $\frac{v}{c}$, risultava che l'effetto di trascinamento e la correzione rispetto alla posizione della stella si controbilanciavano perfettamente. In altre parole, considerando solo i termini al primo ordine di $\frac{v}{c}$, tutto appariva come se la Terra fosse immobile e la stella nella posizione in cui appariva al telescopio. La formula (3.4) di Fresnel spiegava, quindi, le osservazioni di Arago al massimo della precisione sperimentale del periodo, dato che i termini al secondo ordine erano al di là della sensibilità degli strumenti.

Applicando questa formula di trascinamento ad altri fenomeni, Fresnel dedusse che nessun effetto ottico dipendente dal moto della Terra poteva essere osservato al primo ordine di approssimazione, perché completamente controbilanciato dal trascinamento parziale, sia nel caso di osservazioni astronomiche, sia nel caso di esperimenti terrestri, in cui osservatore, apparato e sorgente viaggiavano alla stessa velocità.

Fresnel considerò come esempio di osservazione astronomica un esperimento proposto da Rudjer Josep Boscovich (1711-1787) per studiare il fenomeno dell'aberrazione con un telescopio riempito d'acqua o di altro corpo rifrangente. Lo scienziato francese calcolò che nessun cambiamento nelle osservazioni poteva essere determinato dalla presenza di tali

corpi rifrangenti nel telescopio a causa del trascinamento parziale, affermazione poi verificata nel 1871 da George Biddel Airy (1801-1892).²²

Il 1818 fu un anno decisivo per quello che Kuhn ha poi definito come una rivoluzione scientifica, ossia il passaggio tra paradigma corpuscolare e quello ondulatorio nella spiegazione dei fenomeni luminosi.²³ L'*Académie des Sciences (AdS)* aveva proposto come argomento per il premio annuale del 1818 la spiegazione del fenomeno della diffrazione. Il successo della teoria di Laplace della doppia rifrazione faceva sperare i sostenitori della teoria corpuscolare di poter risolvere questo problema all'interno dello stesso quadro teorico e, così, riaffermare che tale teoria era superiore a quella ondulatoria, allora decisamente minoritaria. Il premio fu, però, vinto da Fresnel grazie agli sviluppi del suo lavoro cominciato nel 1816, nonostante la Commissione per il premio fosse composta, oltre che da Arago, da Laplace, Poisson e Biot, sostenitori del modello corpuscolare. Rispetto a questo importante evento storico, Whittaker afferma:

*The successful memoir afforded the first of a series of reverses by which, in the short space of seven years, the corpuscular theory was completely overthrown.*²⁴

Studi storici più approfonditi colgono alcune sfumature e approfondiscono diversi aspetti di questo passaggio tra teorie dominanti.²⁵ Senza addentrarci in tali discussioni è possibile affermare che l'etere luminifero divenne senza dubbio argomento di studio tra i più importanti sia durante che dopo il lavoro di Young, Fresnel ed Arago.

Sempre questi tre scienziati affrontarono, con successo, il problema della polarizzazione della luce. Il modello ondulatorio longitudinale, derivato dall'analogia con il fenomeno del

²² Airy, G. B. (1871) "On a supposed alteration in the amount of Astronomical Aberration of Light, produced by the passage of the Light through a considerable thickness of Refracting Medium", *Proceedings of the Royal Society of London*, (1871): 35-39.

²³ Kuhn, T. S. (1962) *The Structure of the Scientific Revolutions* (Chicago: University of Chicago Press, 1962), versione utilizzata: trad. ital. Kuhn, T. S. *La Struttura delle Rivoluzioni Scientifiche* (Torino: Einaudi, 1999). A p. 89 Kuhn cita questo passaggio come rivoluzione scientifica.

²⁴ Whittaker (1951), *op. cit.*, p. 107.

²⁵ Buchwald, J. Z. (1989a) *The Rise of the Wave Theory of Light: Optical Theory and Experiment in the Early Nineteenth Century* (Chicago: The University of Chicago Press, 1989). In Fox, R. (1974) "The rise and fall of Laplacian physics", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 4 (1974): 81-136, vengono presi in dettaglio i momenti del crollo della ortodossia laplaciana e la perdita delle posizioni accademiche di questa scuola; per approfondimenti sul ruolo della politica in questo passaggio vedere: Frankel, E. (1976) "Corpuscular Optics and the Wave Theory of Light: The Science and Politics of a Revolution in Physics", *Social Studies in Science*, 6 (1976): 141-84. Per il rapporto tra Arago e Fresnel vedere Levitt (2000), *op. cit.*; per i conflitti accademici e scientifici tra Arago e Biot, vedere Buchwald, J. Z. (1989b) "The battle between Arago and Biot over Fresnel", *Nouvelle Revue d'Optique*, 20 (1989): 109-17.

suono, non riusciva a rendere conto di tale fenomeno, il quale risultava uno dei più grandi ostacoli all'accoglienza definitiva della teoria ondulatoria della luce.

Fu Young che, in una lettera ad Arago del 1817, propose per primo la possibilità di componenti delle vibrazioni luminose trasversali alla direzione di propagazione e Fresnel, che, tra il 1818 e il 1821, sviluppò un modello di etere capace di propagare un tale tipo di vibrazioni: un mezzo con grande capacità di resistenza alla distorsione, come i solidi.

Gli studi teorici successivi, compresi quelli sullo studio dei fenomeni ottici nei corpi in moto, avevano perciò la necessità di partire da tale modello, chiamato spesso modello solido elastico, che risultò predominante nella sempre più accettata teoria ottica ondulatoria del XIX secolo dagli anni '20 in poi.²⁶

²⁶ Lo studio più accurato su tutti i modelli di etere proposti nel XIX secolo rimane ancora Whittaker (1951), *op. cit.*

3.5. La teoria dell'etere trascinato di Stokes

C'è comune accordo tra gli storici sul fatto che, dopo il lavoro di Fresnel, la proposta dell'etere con vibrazioni ortogonali alla direzione di propagazione divenne uno dei principali programmi di ricerca della fisica del XIX per le diverse comunità scientifiche nazionali.

Gli studi riguardanti il rapporto tra moto degli oggetti ed etere luminifero era solo una minima parte di questo programma di ricerca che aveva l'obiettivo principale di trovare un modello meccanico che spiegasse tutti i fenomeni ottici. Il principale ostacolo per raggiungere tale obiettivo era la combinazione tra la necessità di vibrazioni trasversali, che richiedevano come mezzo di trasporto un solido molto elastico, e l'inesistenza di qualsiasi effetto rispetto al moto dei corpi opachi, in particolar modo rispetto al moto dei pianeti.

In tale complesso e vasto programma di ricerca, il problema del coefficiente di trascinamento ipotizzato da Fresnel ricoprì solo una parte minima della discussione. Il primo esperimento diretto fu compiuto, infatti, solo nel 1851 da Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896).²⁷

Secondo Hirosige, la teoria dell'aberrazione della luce e l'esperimento di Arago continuarono ad essere dibattuti e, finché l'*experimentum crucis* a favore della teoria ondulatoria non fu compiuto, nel 1850, questa non aveva ancora avuto completo successo sulla teoria corpuscolare.²⁸

L'immagine storica più diffusa è, però, che la comunità scientifica abbia presto visto la teoria ondulatoria come un programma di ricerca molto promettente e che i massimi sforzi siano stati diretti per risolvere i suoi problemi piuttosto che sviluppare la teoria corpuscolare. Anche Fresnel sperava di sviluppare una teoria meccanica dell'etere luminifero, ma Whittaker fa notare che:

Fresnel's investigations can scarcely be called a dynamical theory in the strict sense, as the qualities of the medium are not defined. His method was to work backwards from the known properties of light, in the hope of arriving at a mechanism to which they could be attributed;

²⁷ Fizeau, A. H. L. (1851) "Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur", *Comptes Rendus*, 33 (1851): 349-55.

²⁸ Hirosige (1976), *op. cit.*, Hirosige si riferisce agli esperimenti di Fresnel e Fizeau per osservare se la velocità della luce fosse maggiore nel vuoto o nei mezzi rifrangenti (vedi par. 3.6).

*he succeeded in accounting for the phenomena in terms of a few simple principles, but was not able to specify an ether which would in turn account for these principles.*²⁹

Questo giudizio generale trova eco nelle parole di altri storici riferite specificatamente alla formula del coefficiente di Fresnel e l'ipotesi del trascinamento parziale dell'etere utilizzato come spiegazione fisica:

*It is not clear how seriously Fresnel himself took this particular mechanism, for him and for many subsequent researchers, the primary justification for introducing the Fresnel coefficient was undoubtedly that it explained a wide range of phenomena.*³⁰

Il lavoro dai successori di Fresnel sembra essere rivolto a fornire un'immagine fisica e un comportamento meccanico all'etere sostegno delle onde luminose durante la quasi totalità del XIX secolo. Fra i molti scienziati che cercarono di sviluppare il programma di ricerca avviato da Young e Fresnel, solo alcuni di essi si dedicarono al problema dell'aberrazione, del moto relativo tra etere e Terra e del coefficiente di trascinamento parziale.

Hirosige mette in evidenza che Johann Christian Andreas Doppler (1803-1853) fu il primo a sottolineare la grave contraddizione tra la spiegazione dell'aberrazione compiuta da Fresnel, basata su una Terra che attraversa l'etere senza trovare alcuna resistenza, e l'opacità di questa rispetto alla luce. Come sottolineato dallo storico giapponese, Doppler agisce in polemica con l'ipotesi di onde trasversali e non in opposizione alla teoria ondulatoria *tout court*. Il lavoro di Doppler, però, non ebbe un eccessivo risalto presso la comunità scientifica dell'epoca.³¹

Il primo, invece, ad aver proposto un modello di etere alternativo a quello di Fresnel che rendesse conto del fenomeno dell'aberrazione fu il matematico e fisico irlandese George Gabriel Stokes (1819-1903) nel 1845.³² Partendo dalle sue ricerche in idrodinamica, Stokes ipotizzò un etere che unisse alcune caratteristiche dei fluidi alla capacità dei solidi di propagare onde trasversali. L'etere di Stokes, che lo storico Schaffner descrive come modello "*Silly Putty*", prendeva spunto da sostanze gelatinose come la pece o la gelatina.³³

²⁹ Whittaker (1951), *op. cit.*, p. 125.

³⁰ Janssen e Stachel (2004), *op. cit.*, p. 14.

³¹ Hirosige (1976), *op. cit.*, La discussione su Doppler è affrontata nelle pp. 9-10.

³² Stokes, G. G. (1945) "On the Aberration of Light", *Philosophical Magazine*, 27 (1945): 9-15.

³³ Schaffner, K. F. (1972) *Nineteenth Century Aether Theories* (Oxford/New York: Pergamon Press, 1972).

Tali sostanze, infatti, pur essendo solide ed elastiche permettono il movimento lento di solidi al suo interno e da questo moto sono deformate.

Un etere di tal fatta avrebbe potuto rendere conto delle trasmissioni trasversali propagate ad alta velocità, come quelle della luce, e permesso il movimento lento dei pianeti. Tale etere era totalmente trascinato dai corpi opachi, per cui non vi era nessun vento d'etere all'interno e nelle vicinanze della Terra. L'ipotesi di Stokes spiegava in modo semplice la mancanza di effetti ottici dovuti alla velocità relativa di Terra ed etere luminifero, senza condizioni aggiuntive quali il coefficiente di trascinamento di Fresnel. Essa richiedeva, però, un'analisi approfondita del fenomeno dell'aberrazione, apparentemente inspiegabile secondo un tale modello. Tale analisi fu uno dei maggiori sforzi di Stokes e trovò una considerevole accoglienza, soprattutto presso la comunità scientifica britannica.

Sviluppando il concetto di viscosità dei fluidi e di frizione nei contorni di un corpo solido che si muove in un fluido, Stokes ipotizzò che l'etere totalmente trascinato avesse, nei dintorni della Terra, la stessa velocità di questa rispetto all'etere stazionario. Stokes stava definendo, così, una prima condizione al contorno. Per la seconda condizione al contorno, Stokes suppose anche che a una certa distanza dalla Terra il movimento di questo non disturbasse affatto l'etere, il quale risultava, perciò, avere velocità nulla.

Quello che spinse Stokes a formulare la propria teoria era un'incredulità verso un etere che si comportasse come quello previsto da Fresnel, infatti denominò *“startling”* la *“supposition that the earth in its motion round the sun offers no resistance to the aether”*.³⁴

Nel suo primo articolo sull'aberrazione, Stokes mostrò che la teoria dell'etere stazionario non era l'unica possibile interpretazione di quel fenomeno, ma che esso era spiegabile altrettanto semplicemente considerando le ipotesi al contorno sopra espresse, con l'unica condizione che $u_x dx + u_y dy + u_z dz$ fosse un differenziale esatto, dove u_x , u_y e u_z erano rispettivamente le componenti della velocità dell'etere lungo tre assi cartesiani x , y e z . Quello di Stokes era, quindi, un etere irrotazionale in cui non potevano esserci turbolenze o vortici quando tale mezzo fosse trasportato nei dintorni dei corpi.

Una volta posta questa condizione, Stokes mostrò che il fronte d'onda di luce proveniente da un oggetto celeste si spostava, in un etere trascinato dalla terra, di un angolo uguale all'angolo di aberrazione. Un osservatore sulla superficie terrestre, perciò, vedeva l'oggetto

³⁴ Stokes, G. G. (1946b) “On the Constitution of the Luminiferous Aether, viewed with reference to the phenomenon of the Aberration of Light”, *Philosophical Magazine*, 29 (1945): 6-10, p.6.

luminoso spostato di un angolo $\theta = \frac{v}{c}$, dove v è la velocità della Terra intorno al Sole e c è la velocità della luce nell'etere stazionario, ossia lontano dai corpi in moto. Nello stesso articolo Stokes rendeva evidente anche che, nella sua teoria, il moto del sistema solare rispetto all'etere e l'eventuale moto dell'oggetto stellare non avevano alcuna influenza sul fenomeno dell'aberrazione. L'angolo d'aberrazione era, cioè, identico per tutti gli oggetti celesti e dipendente solo dalla velocità della Terra intorno al Sole e dalla velocità della luce nell'etere, così come osservato nelle precedenti esperienze astronomiche.

Nel rispondere ad alcune obiezioni poste da James Challis (1803-1882), *Plumian Professor* e direttore dell'Osservatorio di Cambridge, Stokes diede ragione a costui, constatando che l'unica condizione necessaria per rendere conto del fenomeno aberrazione era quella d'irrotazionalità. Stokes stava ammettendo, quindi, che la condizione di uguaglianza tra le velocità di Terra ed etere sulla superficie terrestre era una condizione superflua rispetto al solo fenomeno dell'aberrazione.

Le motivazioni di Stokes sono state ben riassunte da Wilson nelle frasi qui riportate:

Stokes's reasons for supposing the ether to be at rest relative to the earth are not difficult to identify. First, he surmised that the earth's atmosphere might be able to ensnare ether intermingled with it. Extremely tentative, this 'conjecture' at least supplied one feasible factor in determining the ether's status. More significantly, he appears to have been quite impressed with South's 'remarkable experiment', and to have readily accepted the experiment's implications, including those pertaining to the interaction of the earth and the ether. Finally, results of experiments such as Arago's performed at the surface of the earth did, after all, 'follow immediately from the theory of aberration which I proposed in the July number of this Magazine.' Therefore, permitted by the phenomenon of aberration to assume any value for the ether's velocity with respect to the earth's surface, Stokes was convinced by other crucial considerations that the velocity was zero.³⁵

Wilson ha ragione ad evidenziare in questo modo le ragioni di Stokes nel considerare un etere totalmente trascinato dalla Terra con velocità relativa nulla sulla sua superficie.

³⁵ Wilson, D. B. (1972) "George Gabriel Stokes on Stellar Aberration and the Luminiferous Ether", *The British Journal for the History of Science*, 6 (1972): 57-72, p. 69. Vedere questo articolo per tutti gli approfondimenti sul modello di Stokes, le premesse alla sua proposta e la polemica con Challis. La frase tra virgolette è tratta da Stokes, G. G. (1946a) "On Fresnel's Theory of the Aberration of Light", *Philosophical Magazine*, 28 (1946): 76-81.

Per quello che concerne la mia ricerca, è da evidenziare come Stokes stia considerando il risultato dell'esperimento di Arago nella formulazione del suo etere. Sebbene fosse nato dalla necessità di rendere conto sia del fenomeno dell'aberrazione, sia della caratteristica di solidità per permettere la propagazione di onde trasversali, l'etere di Stokes, infatti, spiegava altrettanto bene gli esperimenti ottici che avevano mostrato un risultato nullo al primo ordine della costante d'aberrazione.

Stokes continuò negli anni successivi a sviluppare un tale modello di etere che si comportasse come un solido elastico per le piccole vibrazioni costituenti la luce e come un fluido per i movimenti lenti dei pianeti.³⁶ Lo scienziato irlandese dichiarò sempre che non c'erano stati esperimenti conclusivi che potessero dar ragione al suo modello piuttosto che a quello di Fresnel, ma che la maggior parte degli scienziati avrebbe preferito il suo *“inasmuch as we would not be disposed to believe, without good evidence, that the aether moved quite freely through the solid mass of the earth”*.³⁷

³⁶ Oltre agli articoli citati nelle note precedenti Stokes sviluppa il suo modello in Stokes, G. G. (1848) “On the Constitution of the Luminiferous Ether”, *Philosophical Magazine*, 32 (1848): 343-49.

³⁷ Stokes (1846a), *op. cit.*, p. 81.

3.6. L'esperimento di Fizeau

Come fa notare Hirosige, i problemi inerenti all'aberrazione e alla propagazione della luce nei corpi in movimento non produssero un grande dibattito negli anni tra il 1850 e il 1870.³⁸

La ricerca sulle caratteristiche dell'etere aveva, infatti, come principale scopo la formulazione di un modello meccanico di etere elastico solido che rendesse conto dei vari fenomeni luminosi. In questo ventennio un unico evento risultò di considerevole importanza all'interno della ricerca delle caratteristiche del comportamento della luce nei corpi in movimento: l'esperimento di Fizeau, i cui risultati furono pubblicati nel 1851. Tale esperimento aveva il fine di testare in maniera diretta il coefficiente di trascinamento dell'etere nei corpi rifrangenti, ipotizzato da Fresnel nel 1818.³⁹

Fizeau nel 1849, aveva calcolato la velocità della luce utilizzando, per la prima volta, un metodo puramente terrestre. Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868), l'anno successivo, lo sorpassò in precisione, con quello che è a volte definito l'*experimentum crucis* a favore della teoria ondulatoria, rispetto alla teoria corpuscolare.⁴⁰ Le due teorie prevedevano un comportamento opposto della velocità della luce nei mezzi rifrangenti. Secondo la teoria corpuscolare, la velocità dovrebbe essere più alta nei mezzi a più alto indice di rifrazione. Arago aveva, invece, calcolato un comportamento opposto nel caso la luce fosse costituita da vibrazioni di etere.

Grazie ai metodi sviluppati da Fizeau e Foucault a cavallo degli anni '40 e '50, fu possibile paragonare le velocità della luce nell'aria e in un mezzo rifrangente. Questo portò entrambi gli sperimentatori, nel 1850, a pronunciarsi a favore della teoria ondulatoria, visto che i loro esperimenti confermavano le previsioni di Arago di una minor velocità della luce all'interno di un mezzo rifrangente.

Subito dopo queste importanti ricerche sulla determinazione della velocità della luce con metodi terrestri e sul raffronto tra le velocità della luce nell'aria e nell'acqua, Fizeau s'interessò all'esperimento sul trascinamento dell'etere nei corpi trasparenti. Obiettivo

³⁸ Hirosige (1976), *op. cit.*, pp. 12-13.

³⁹ Fizeau, (1851), *op. cit.*

⁴⁰ Foucault, L. (1850) "Méthode générale pour mesurer la vitesse de la lumière dans l'air et les milieux transparents. Vitesses relatives de la lumière dans l'air et dans l'eau. Project d'expérience sur la vitesse de propagation du calorique rayonnant", *Comptes Rendus*, 30 (1850): 551-60; pochi mesi dopo, la conclusione di Foucault a favore della teoria ondulatoria fu confermata dallo stesso Fizeau in Fizeau, A. H. L., e Breguet, L. (1850) "Note sur l'expérience relative à la vitesse comparative de la lumière dans l'air et dans l'eau", *Comptes Rendus*, 30 (1850): 562-63.

dichiarato di Fizeau era il raffronto dei modelli di etere nati dalla spiegazione dell'aberrazione. La maggior parte delle esposizioni storiche legge tal esperimento come una prova del modello di Fresnel contro l'etere di Stokes, ma Fizeau cita ben 4 modelli principali: i due già citati più quelli di Doppler e di Challis.

Fizeau, in realtà, parla di tre sole possibilità di rapporto tra etere e corpi trasparenti all'interno di questi modelli d'etere:

- 1) l'etere è totalmente aderente alle molecole dei corpi, in modo che queste trasmettano la loro velocità all'etere che risulta, così, trascinato alla stessa velocità. Ipotesi di trascinamento totale (modello di Stokes);
- 2) l'etere è libero ed indipendente; esso rimane totalmente inalterato e immobile all'interno dei corpi, come nel resto dello spazio, ovunque stazionario;
- 3) solo una porzione dell'etere è libero, mentre un'altra è fissata alle molecole del corpo e da queste trasportato. Ipotesi di trascinamento parziale (modello di Fresnel).

L'esperimento di Fizeau è descritto ampiamente nella letteratura scientifica e storica e non mi dilungherò sui calcoli dell'esperimento. Basterà qui dire che Fizeau utilizzò il metodo dell'interferenza tra due fasci di luce con stessa sorgente e passante attraverso due tubi pieni d'acqua che si muoveva in questi con una stessa velocità, ma in direzioni opposte.

Fizeau sperimentò le variazioni della figura d'interferenza cambiando i versi nei due tubi e trovò risultati che confermavano le predizioni dell'ipotesi del trascinamento parziale dell'etere nell'acqua. La precisione della strumentazione permetteva di confermare pienamente le previsioni per quanto riguardava il verso degli spostamenti, come se la luce andasse più veloce di una certa quantità in una direzione e meno veloce della stessa quantità nell'altra. Per quanto concerneva il valore numerico, esso sembrava conforme in maniera approssimata al valore del trascinamento parziale di Fresnel.

Fizeau fece poi lo stesso esperimento riempiendo i tubi di aria e non verificò alcuno spostamento della figura d'interferenza, ulteriore conferma dell'ipotesi di Fresnel che prevedeva la proporzionalità tra quantità del trascinamento ed indice di rifrazione. Fizeau conclude il suo articolo in questo modo:

*Le succès de cette expérience me semble devoir entraîner l'adoption de l'Hypothèse de Fresnel, ou du moins de la loi qu'il a trouvée pour exprimer le changement de la vitesse de la lumière par l'effet du mouvement des corps.*⁴¹

Fizeau verificò la legge, ma ammise, subito dopo, che l'ipotesi di Fresnel poteva apparire straordinaria e difficile da accettare, e richiedeva uno studio più approfondito da parte dei matematici. Il comportamento dell'etere di Fresnel era, quindi, di difficile comprensione, ma, in seguito all'esperienza di Fizeau, rimaneva l'unico a rendere conto di tutti i fenomeni osservati. Stachel, punta l'attenzione su un commento storico di Ketteler del 1873:

*[S]uddenly (1850) Fizeau's famous experiment, by means of which the "entrainment" of the ether by a moving transparent medium was actually proved, brought light into this chaos, and now Fresnel's viewpoint gained a firmer foundation and with it new adherents.*⁴²

Stachel e Janssen affermano più volte che il successo sperimentale della formula di trascinamento costituì un problema agli occhi dei fisici della seconda metà del XIX secolo, i quali non erano soddisfatti delle ipotesi fisiche alla base dell'esistenza di questa formula. Ragione questa che portò i fisici dell'epoca a considerare diverse possibilità per la spiegazione delle formula di Fresnel. Tra queste le più citate sono:⁴³

- a) Ipotesi di Fresnel.
- b) Ipotesi di Stokes, che propose un etere totalmente trascinato ma con velocità inferiore a quella del corpo in moto.⁴⁴
- c) Ipotesi di Beer che, nel 1855, propose, invece, un etere le cui varie porzioni si muovevano a tutte le velocità tra 0 e la velocità del corpo. La media di queste velocità doveva corrispondere alla formula di Fresnel-Fizeau.⁴⁵

⁴¹ Fizeau (1851), *op. cit.*, p. 355. [enfasi mia]

⁴² Ketteler, E. (1873) *Astronomische Undulationstheorie oder die Lehre von der Aberration des Lichtes* (Bonn: P. Neusser, 1873); cit. in Stachel, J. (2005) "Fresnel's (Dragging) Coefficient as a Challenge to 19th Century Optics of Moving Bodies", in Kox, A. J., e Eisenstaedt, J. (eds.) *The Universe of General Relativity, Einstein Studies Vol 11* (Boston: Birkhäuser, 2005): 1-13, p. 6.

⁴³ Stachel (2005), *op. cit.*, p. 4.

⁴⁴ Stokes (1846a), *op. cit.*

⁴⁵ Beer, A. (1855). "Über die Vorstellungen vom Verhalten des Aethers in bewegten Mitteln", *Annalen der Physik*, 4 (1855): 428-34.

Secondo gli storici su citati, la difficoltà di trovare un modello fisico per il coefficiente di trascinamento di Fresnel e le consecutive difficoltà nelle teorie sull'ottica dei corpi in movimento costituirono il principale problema che portò alla creazione della teoria della relatività ristretta. A favore di questa visione esistono anche alcune affermazioni di Einstein, tra le quali ha una certa notorietà una frase scritta a R. S. Shankland:

[...] the experimental results which had influenced him most were the observations on stellar aberration and Fizeau's measurements on the speed of light in moving water.⁴⁶

Stokes aveva affrontato il problema di una spiegazione del coefficiente di Fresnel nel 1846, prima della sua conferma sperimentale da parte di Fizeau, affermando:

The result would be the same if we supposed the whole of the ether within the earth to move together, the ether entering the earth in front, and being immediately condensed, and issuing from it behind, where it is immediately rarefied, undergoing likewise sudden condensation and rarefaction in passing from one refracting medium to another.⁴⁷

L'esperimento di Fizeau sembrava favorire la teoria di Fresnel, ma il fatto che Stokes avesse inserito il coefficiente nella sua teoria prima dell'esperimento, non lo rese conclusivo.

Alcuni storici ritengono che il modello di Stokes si complicasse molto per rendere conto del coefficiente di Fresnel-Fizeau e che l'unica necessità di considerare questo coefficiente era dato dall'esperimento di Fizeau. Tutti gli altri fenomeni al primo ordine rispetto alla costante di aberrazione erano spiegati in modo molto semplice nella teoria di Stokes, per cui la modifica a questa viene ritenuta, metodologicamente, una complicazione *ad hoc*.

Queste considerazioni sono fatte *a posteriori*, ma sembra che l'impatto dell'esperimento fu diverso nelle differenti comunità nazionali e si decise di seguire un modello piuttosto che un altro per motivi diversi. Darrigol, infatti, afferma:

Stokes's theory could be modified to include this result, but at the price of becoming more complex than Fresnel's. Maxwell himself admitted that Fizeau's result, if it were true, favoured Fresnel's theory of ether. However, the confidence in this delicate experiment was

⁴⁶ Shankland, R. S. (1963) "Conversations with Albert Einstein", *American Journal of Physics*, 31 (1963): 47-57, p. 48.

⁴⁷ Fresnel (1846a), *op. cit.*, p. 76

*not so high beyond the Channel [...] On the continent, the Fresnel drag was usually regarded as an established fact.*⁴⁸

Non si è trovato, nella letteratura secondaria, uno studio storiografico approfondito sull'impatto dell'esperimento di Fizeau e sulle reazioni dei sostenitori del modello di Stokes e vedo in questo una mancanza storiografica. In attesa di studi più approfonditi mi affiderò alle affermazioni di Darrigol, che sono condivise da un'ampia parte della storiografia contemporanea.

La difficoltà del problema era sentito anche da Maxwell che, ancora nel 1867, scriveva:

*This experiment [of Fizeau] seems rather to verify Fresnel's theory of the ether; but the whole question of the state of luminiferous medium near the earth, and of its connexion with gross matter, is very far as yet from being settled by experiment.*⁴⁹

L'esperimento venne pubblicato in un articolo più approfondito solo nel 1859, con traduzione inglese nell'anno successivo, e nella letteratura britannica ci si riferì spesso a questi articoli.⁵⁰ Negli anni '60, però, Maxwell stava già sviluppando la sua teoria elettromagnetica, e dal 1962 i problemi ottici furono inseriti in tale cornice teorica.

Nella seconda metà del secolo XIX esistevano, quindi, tre ambiti di ricerca che avevano molti punti di contatto:

- le problematiche dell'etere luminifero e della sua relazione con i corpi in moto, compresa l'impossibilità di sperimentare effetti al primo ordine di $\frac{v}{c}$;
- lo sviluppo della teoria elettromagnetica di Maxwell, in particolare dell'elettrodinamica;
- gli studi sul modello meccanico di etere.

⁴⁸ Darrigol, O. (2000) *Electrodynamics from Ampère to Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 2000), p. 315-16.

⁴⁹ Lettera di James Clerk Maxwell a Huggins, 10 giugno 1867 in Harman, P. (ed.) (1995) *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell*, Volume II: 1863-1873 (Cambridge: Cambridge University Press, 1995), p. 311.

⁵⁰ Fizeau, A. H. L. (1859) "Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur", *Annales de chimie et de physique*, 57 (1859): 385-404. Pubblicato poi in inglese in Fizeau, A. H. L. (1860b) "On the effect of the Motion of a Body upon the Velocity with which it is traversed by Light", *Philosophical Magazine*, 19 (1860): 245-60.

Questi rami di ricerca, però, hanno avuto numerosi sviluppi specialistici, per cui non è semplice riassumerli in uno sviluppo organico e lineare, possibile solo illuminando i fatti del passato con le conoscenze attuali. Nel caso della mia ricerca, perciò, richiamerò solo gli sviluppi dell'etere luminifero senza addentrarmi nelle problematiche concernenti i modelli di solido elastico e le ricerche all'interno della teoria elettromagnetica che non si occuparono del problema dell'ottica dei corpi in moto.⁵¹

⁵¹ Per uno studio completo della storia dell'elettrodinamica nel XIX secolo vedere: Darrigol (2000), *op. cit.*

3.7. Teorie sull'impossibilità di osservare effetti ottici al primo ordine di $\frac{v}{c}$: Mascart, Veltmann e Potier.

Nel 1860, Fizeau pubblicò i risultati di un altro esperimento di *ether-drift* che diede, invece, un risultato positivo: lo spostamento dell'azimut di polarizzazione del vetro dovuto, secondo lo sperimentatore, al moto terrestre attraverso l'etere.⁵² Le difficoltà dell'esperimento non permisero che il suo risultato fosse ritenuto conclusivo, ma ci fu un certo dibattito su di esso sia nel continente che in Gran Bretagna. Secondo Fizeau, l'effetto cercato derivava direttamente dal coefficiente di trascinamento di Fresnel ed era uno dei pochi effetti ottici che potevano mostrare il moto della Terra rispetto all'etere. A questo esperimento rispose poco dopo l'astronomo francese Hervé Auguste Faye (1814-1902) chiedendo come mai un effetto capace di far osservare il moto della Terra rispetto all'etere non dipendesse anche dal moto traslatorio del sistema solare.⁵³

Dalle ricerche sperimentali della seconda metà del XIX per scoprire eventuali effetti del moto relativo tra Terra ed etere si svilupparono il lavoro sperimentale di Éleuthère Elie Nicolas Mascart (1837-1908), e quelli teorici di Wilhelm Veltmann e Alfred Potier (1840-1905) che mostrarono come il coefficiente di trascinamento di Fresnel impedisse l'esistenza di qualsiasi effetto al primo ordine della costante d'aberrazione.⁵⁴

Prima degli articoli di Mascart del 1872 e 1874, nei quali il fisico francese riassunse lo stato dell'arte delle ricerche ottiche sui corpi in movimento rispetto all'etere, ci furono altre due esperienze del genere, entrambe conclusesi con un risultato nullo.⁵⁵ Hoek, nel 1868, studiò l'interferenza di due raggi di luce, uno passante nell'aria, un altro nel vetro e non trovò

⁵² Fizeau, A. H. L. (1860a) "Sur une Méthode propre a Rechercher si l'Azimut de Polarisation du Rayon Réfracté est Influencé par le Mouvement du Corps Réfringent – Essai de cette Méthode", *Annales de chimie et de physique*, 58 (1860): 129-63.

⁵³ Faye, H. A. (1859) "Sur les expériences de M. Fizeau considérées au point de vue du mouvement de translation su système solaire", *Comptes Rendus*, 49 (1859): 870-75. L'articolo di Faye è molto interessante, perché è il primo che riporta il problema dell'esistenza di un moto nell'etere che non sia solo quello orbitale, ma che comprenda il moto dell'intero sistema solare. Questo punto sarà molto importante negli sviluppi degli esperimenti di D. C. Miller. Faye afferma che, secondo misure astronomiche, il sistema solare viaggia nella direzione della costellazione Hercules alla velocità di 7894 m/s e che questa velocità dovrebbe sommarsi a quella orbitale nel prevedere effetti di *ether-drift*. È da notare che anche Maxwell cita Faye nella lettera Maxwell a Stokes, 6 maggio 1864, in Harman (ed.) (1995), *op. cit.*, p. 155.

⁵⁴ Approfondimenti storici su questi sviluppi si trovano in Newburg, R. (1974) "Fresnel Drag and the Principle of Relativity", *Isis*, 65 (1974): 379-86 e Stachel (2005), *op. cit.*

⁵⁵ Mascart. É. (1872) "Sur les modifications qu'éprouve la lumière (1re partie)", *Annales Scientifiques de l'École Normale Supérieure*, 1 (1872): 157-214. Mascart, É. (1874) "Sur les modifications qu'éprouve la lumière (2eme partie)", *Annales Scientifiques de l'École Normale Supérieure*, 3 (1874): 363-420.

alcuno spostamento di frangia e Airy, nel 1871, mostrò che il riempimento con acqua di un telescopio non influisce sull'angolo di aberrazione, così come previsto da Fresnel grazie al coefficiente di trascinamento.⁵⁶

Il lavoro che Mascart compie nei due articoli sopra citati ha un'enorme valenza: in essi, per la prima volta, vengono raggruppati tutti i dati sperimentali sul moto della Terra rispetto all'etere. Mascart non solo riassume tutti i risultati ottenuti dagli altri fisici, ma presenta anche le conclusioni delle proprie osservazioni. Mascart aveva ripetuto, migliorandone la resa, l'esperimento di Hoek, confermandone il risultato nullo, e l'esperimento sulla rotazione del piano di polarizzazione di Fizeau, trovando risultato nullo, in disaccordo con le affermazioni del connazionale.

Dopo aver richiamato alla mente la totalità degli esperimenti eseguiti dal 1810 (esperimento di Arago) al 1874 (i propri esperimenti), Mascart afferma che tutti, tranne quello di Fizeau del 1860, avevano dato risultato nullo e conclude:

*[...] the translatory motion of the earth has no appreciable effect at all on the optical phenomena produced with a terrestrial source or with solar light. These phenomena are incapable of demonstrating the absolute motion of a body. Relative motions are the only ones we can make evident.*⁵⁷

Tale frase venne vista, in Francia, come una prima formulazione del principio di relatività basata sull'induzione sperimentale.

Un altro lavoro di Mascart ebbe un ruolo ancora più decisivo nell'evoluzione dell'ottica dei corpi in moto. Si trattava dell'esperimento sulla propagazione della luce in un materiale birifrangente, nel quale non apparvero cambiamenti in dipendenza del moto dell'oggetto nell'etere. Per dar conto di questo risultato, Mascart dovette ipotizzare che il coefficiente di Fresnel fosse valido sia per il raggio ordinario, sia per quello straordinario. Fu proprio questo risultato sperimentale quello che permise a Mascart di ottenere il *Grand prix des sciences mathématique* dato dall'AdS di Parigi nel 1872.⁵⁸

⁵⁶ Hoek, M. "Détermination de la vitesse avec laquelle est entraînée une onde lumineuse traversant un milieu en mouvement", *Archives néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles*, 3 (1868): 180-85 ; e Airy (1871), *op. cit.*

⁵⁷ Mascart (1874), *op. cit.* p. 420, citato e tradotto in inglese in Newburg (1974), *op. cit.*, p. 383.

⁵⁸ "Prix décerné. Année 1872. –Prix extraordinaires. Grand prix des sciences mathématique. Rapport lue t adopté dans la séance du 14 juillet 1873", *Comptes Rendus*, 79 (1874): 1531-34.

Il premio era dato in base all'argomento di ricerca: "*Rechercher expérimentalement les modifications qu'éprouve la lumière, dans son mode de propagation et ses propriétés, par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur*", il che rende palese come, per una parte della comunità accademica francese, la ricerca sull'ottica dei corpi in movimento fosse di vitale importanza negli anni '70.

Nelle motivazioni del premio si riconosce l'importanza del grande lavoro sperimentale di Mascart: i suoi nuovi esperimenti e i suoi miglioramenti su altri eseguiti in precedenza sono tutti risultati nulli, in accordo con il principio di Fresnel, e hanno anche dimostrato la validità di questo principio per entrambi i raggi nel caso della doppia rifrazione. Quest'ultima dimostrazione era particolarmente problematica perché, come evidenziano Janssen e Stachel, "*the index of refraction is different for the two rays, it follows that in Fresnel's model different amounts of ether have to be carried along for each of the two rays*".⁵⁹ Lo stesso Mascart sottolineò che l'interpretazione fisica di Fresnel del coefficiente omonimo non poteva rendere conto di questo risultato sperimentale.

Nello stesso periodo, il tedesco Veltmann formulò la prima spiegazione generale del fenomeno dell'aberrazione e degli esperimenti ottici al primo ordine d'approssimazione.⁶⁰ Nella seconda metà del XIX secolo, i fisici continentali consideravano l'esperimento di Fizeau decisamente a favore dell'ipotesi di Fresnel contro quella di Stokes. Rimanendo all'interno della tradizione continentale, Veltmann sviluppò la sua teoria nell'ambito dell'etere di Fresnel con coefficiente di trascinamento. Veltmann dimostrò che il coefficiente di trascinamento di Fresnel rendeva le leggi dell'ottica identiche, al primo ordine di approssimazione, per i corpi stazionari e quelli in moto traslatorio.⁶¹

Veltmann asserì, inoltre, in maniera netta che il principio di Fresnel non è nient'altro che la condizione necessaria e sufficiente per il moto relativo, perché le leggi dell'ottica ondulatoria siano le stesse, al primo ordine d'approssimazione, per corpi in quiete e corpi in moto traslatorio uniforme. Il rilievo del lavoro di Veltmann è sottolineata dallo storico Buchwald che afferma:

⁵⁹ Janssen e Stachel (2004), *op. cit.*, p. 14.

⁶⁰ Veltmann, W. (1870a) "Fresnel's Hypothese zur Erklärung der Aberrations-Erscheinungen", *Astronomische Nachrichten*, 75 (1870): 145-60; Veltmann, W. (1870b) "Über die Fortpflanzung des Lichts in bewegten Medien", *Astronomische Nachrichten*, 76 (1870): 129-44; Veltmann, W. (1873) "Über die Fortpflanzung des Lichts in bewegten Medien", *Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie*, 150 (1873): 497-535.

⁶¹ Per un approfondimento della dimostrazione di Veltmann vedere Hirose (1976), *op. cit.*, pp. 17-19.

*In 1851 Armand Fizeau was able to measure the Fresnel “drag” coefficient, and in 1873 Wilhelm Velmann demonstrated that no optical experiment with a terrestrial source of light can, to first order, detect motion through the ether if the drag coefficient obtains. Consequently, to this degree of accuracy, Fresnel’s original theory which requires a very slight transport of the ether by transparent bodies was quite satisfactory.*⁶²

Questa visione della storia dell’etere del XIX secolo è contestata da Stachel che pone l’accento sulla difficoltà, riconosciuta da molti, di dare un significato fisico credibile al successo della formula. Il lavoro teorico di Velmann, infatti, oltre a stabilire il primo collegamento teorico generale tra coefficiente di Fresnel e impossibilità di osservare con esperimenti ottici il moto relativo tra corpi ponderabili ed etere, creò un altro problema all’interpretazione fisica del coefficiente di Fresnel perché dimostrò che “*the coefficient must be applied to each frequency of light individually*”.⁶³

Ogni colore ha un indice di rifrazione diverso, per cui l’ipotesi di Fresnel implicava che porzioni diverse di etere fossero trascinate per ogni colore, rendendo oltremodo improbabile la spiegazione dello scienziato francese. Il problema del significato fisico del coefficiente di Fresnel, dato l’enorme successo sperimentale, diventò uno dei maggiori problemi alla fine del XIX e, secondo alcuni, alla base della necessità di una nuova cinematica.

Poco dopo le pubblicazioni di Velmann, Potier fornì una più elegante dimostrazione del fatto che gli esperimenti ottici erano destinati, al primo ordine d’approssimazione, a fornire risultato nullo partendo dal principio di Fermat e dal coefficiente di Fresnel.⁶⁴ Potier viene accreditato per essere stato il primo ad esprimere chiaramente che l’impossibilità di sperimentare il moto relativo tra Terra ed etere con esperimenti ottici valeva solo al primo ordine e non nel caso di esperimenti in grado di mostrare effetti di ordine superiore. Non molti storici riconoscono a Potier questa generalizzazione, per esempio l’influente Whittaker non lo cita, ma altri riconoscono giustamente che:

⁶² Buchwald, J. Z. (1988). “The Michelson Experiment in the Light of Electromagnetic Theory Before 1900”, in Goldberg, S. e Stuewer, R. H. (eds.) *The Michelson Era in American Science 1870–1930, Cleveland, OH 1987* (New York: American Institute of Physics, 1988): 55–70, p. 57, cit. in Stachel (2005), *op. cit.*, p. 1.

⁶³ Janssen e Stachel (2004), *op. cit.*, p. 14.

⁶⁴ Potier, A. (1874) “Conséquences de la formule de Fresnel relative a l’entraînement de l’ether par les mielleux transparents”, *Journal de Physique*, 3 (1874): 201-4. Per una discussione della dimostrazione di Potier vedere Newburg (1974), *op. cit.*, pp. 383-85.

*C'est seulement en 1874, que Mascart, Veltmann, puis Potier mirent en évidence la généralité de cette conclusion, c'est-à-dire l'échec certain et préétabli de toute recherche, par des méthodes optiques, de déceler un mouvement par rapport à l'éther.*⁶⁵

I lavori teorici di Veltmann e Potier ebbero l'effetto d'interrompere le ricerche sperimentali del tipo compiuto da Mascart che, come abbiamo visto, erano ancora al centro dell'interesse di molti fisici, in particolare francesi.

Nel frattempo il panorama scientifico internazionale stava mutando in maniera considerevole, grazie al lavoro di Maxwell che, proprio nel 1873, pubblicava il *Treatise on Electricity and Magnetism*. In questo trattato Maxwell riformulò in maniera compiuta la sua teoria elettromagnetica, nella quale le leggi ottiche erano da considerarsi all'interno di un programma di ricerca più vasto.⁶⁶

⁶⁵ Tonnellat, M. A. (1971) *Histoire du Principe de Relativité* (Paris: Flammarion éditeur, 1971), p. 91, [corsivo dell'autrice].

⁶⁶ Maxwell, J. C. (1873) *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 2 Vols. (Oxford: Oxford University Press, 1873).

3.8. Etere elettromagnetico

La parte della storia degli sviluppi dell'etere elettromagnetico che qui richiamerò brevemente è quella legata alle immagini di etere e alla sua relazione con i corpi ponderabili in moto, ossia l'elettrodinamica sviluppata da Maxwell e dai suoi successori.⁶⁷ La complessità del pensiero di Maxwell e lo sviluppo delle sue teorie, portano gli storici ad offrire a volte immagini non del tutto concordi, per cui attingerò a quei lavori che si basano sostanzialmente sulle fonti primarie.⁶⁸

Negli anni '50, Maxwell era coinvolto in esperimenti di ottica e già nel 1857 aveva chiesto a Stokes informazioni sull'esperimento di Fizeau sui corpi in moto, da cui è evidente che ne aveva solo una conoscenza indiretta.⁶⁹ Nel 1862 Maxwell affermò per la prima volta che la luce è costituita da onde trasversali dello stesso mezzo che propaga le onde elettromagnetiche e nel 1864 affrontò il problema degli effetti ottici nei corpi in moto all'interno di una teoria elettromagnetica. Il 1864 è anche l'anno in cui completa il suo influente articolo "*A Dynamical Theory of Electromagnetic Field*", nel quale scrive le equazioni del campo elettromagnetico e le considera identiche a quelle del fenomeno luminoso.⁷⁰ Questa fase della ricerca lo porta ad ideare ed eseguire un esperimento del tutto simile all'esperimento di Arago del 1810, di cui non era a conoscenza.⁷¹

Il grande scienziato britannico compì l'esperimento per scoprire le proprietà dell'etere elettromagnetico all'interno dei corpi e prevede che la formula di Fresnel, così come verificata da Fizeau, avrebbe dovuto implicare un cambio dell'angolo di aberrazione se la luce fosse passata attraverso un prisma. Maxwell, però, osservò un risultato nullo, al primo ordine d'approssimazione, e mandò il suo risultato a Stokes per ricevere dei commenti. Costui fece notare che Maxwell aveva compiuto un errore teorico non considerando il cambio di densità nella formula di Fresnel, la quale rendeva conto del risultato nullo, e che

⁶⁷ Per approfondimenti sugli sviluppi dell'etere elettromagnetico vedere: Whittaker (1910), *op. cit.*; Schaffner (1972), *op. cit.*; Darrigol (2000), *op. cit.*; Hiosige (1976), *op. cit.*; Swenson. (1972), *op. cit.*

⁶⁸ La descrizione più completa ed attinente alle fonti primarie dell'opera di Maxwell si trova nell'Introduzione di Peter Harman a Harman, P. (ed.) (1995) *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell* Vol. 2 1862-1873 (Cambridge: Cambridge University Press, 1995), pp. 9-12. A questa descrizione si affida anche Darrigol in Darrigol (2000), *op. cit.*, pp. 315-6 e in Darrigol (2005), *op. cit.*, p. 61.

⁶⁹ Lettera di Maxwell a Stokes, 8 maggio 1857 in Larmor, Sir J. (ed.) (1907) *Memoir and Scientific Correspondence of the Late Sir George Gabriel Stokes*, vol. 2(Cambridge: Cambridge University Press, 1907), pp. 5-7.

⁷⁰ Maxwell, J. C. (1865) "A Dynamical Theory of Electromagnetic Field", *Philosophical Transaction of the Royal Society of London*, 155 (1865): 459-512.

⁷¹ Maxwell, J. C. (1864) "Paper on the Motion of the Earth Through the Ether", in Harman (ed.) (1995), *op. cit.*, pp. 148-53.

l'esperimento era identico, anche se più accurato, a quello già compiuto da Arago del 1810.⁷²

In seguito, Maxwell non tornò molto spesso sul problema dell'etere e parve rinunciare al tentativo di dare un sostegno meccanico alle sue equazioni. Il suo lavoro fu, ad ogni modo, fondamentale e le sue affermazioni hanno influito molto sul futuro delle ricerche di *ether-drift* e sulle immagini di etere.

Dopo la risposta di Stokes al suo articolo, Maxwell comprese che, al primo ordine della costante d'aberrazione, non esistevano esperimenti sulla rifrazione che potessero verificare il moto relativo tra Terra ed etere sia nella teoria di Stokes, sia in quella di Fresnel. Maxwell, inoltre, esplicitò che l'esperimento di Fizeau favoriva il modello del francese, ma che la questione era ancora aperta. Maxwell citò, in una lettera, anche l'esperimento di Fizeau sull'angolo di polarizzazione, affermando che il risultato non era stato ancora riconfermato da altri.⁷³

L'articolo più noto e più influente di Maxwell sull'argomento è senza dubbio la voce "Ether" scritto per l'*Encyclopaedia Britannica* e pubblicato nel 1879, l'anno della morte del grande scienziato britannico.⁷⁴ Maxwell ripeté quello che aveva già espresso alcuni anni prima nella lettera ad Huggins, ma formulò in modo più chiaro un concetto che sarà d'ispirazione per i futuri esperimenti di Michelson sull'*ether-drift*:

*All methods [...] by which it is practicable to determine the velocity of light from terrestrial experiments depend on the measurement of the time required for the double journey from one station to the other and back, again, and the increase of this time on account of a relative velocity of the aether equal to that of the earth in its orbit would be only about one hundred millionth part of the whole time of transmission, and would therefore be quite insensible.*⁷⁵

⁷² Lo stesso Stokes, come abbiamo visto, aveva discusso la teoria di Fresnel in Stokes (1846a), e aveva dimostrato che il moto relativo tra mezzo ed etere non cambia le leggi di riflessione e rifrazione e di questo informa Maxwell. Purtroppo la lettera di risposta di Stokes è andata persa, ma noi abbiamo la lettera in risposta di Maxwell a Stokes: Maxwell a Stokes, 6 maggio 1864 in Harman (ed.) (1995), *op. cit.*, pp. 154-56, e una riconsiderazione dell'intero problema in una lettera a William Huggins (1824-1910) del 1867, in Maxwell a Huggins, 10 giugno 1867 in Harman (ed.) (1995), *op. cit.*, 306-11. Lo stesso Huggins pubblica la lettera nel suo articolo Huggins, W. (1868) "Further Observations on the Spectra of Some Stars and Nebulae, with an Attempt to Determine therefrom whether these Bodies are Moving Towards or From the Earth, also Observations of the Spectra of the Sun and of Comet II, 1868", *Philosophical Transaction of the Royal Society of London*, 158 (1868): 529-64, pp. 532-5.

⁷³ Maxwell a Huggins, 10 giugno 1867 in Harman (ed.) (1995), *op. cit.*, pp. 306-11

⁷⁴ Maxwell, J. C. (1878) "Ether", *Encyclopaedia Britannica* (9a Ed.), 8 (Edinburgh: 1879): 568-72 e in Niven, W. D. (ed.) (1890) *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell* (Cambridge: Cambridge University Press, 1890).

⁷⁵ Maxwell (1878), *op. cit.*, in Niven ed. (1890), *op. cit.*, p. 769, [enfasi mia].

Maxwell, così, stava affermando che i metodi terrestri, richiedendo un doppio percorso della luce, producono effetti visibili solo al secondo ordine della costante d'aberrazione, ossia $\frac{v^2}{c^2}$, ed erano, perciò, troppo piccoli per essere visibili. Maxwell, quindi, propose la ricerca di un metodo astronomico per poter osservare un effetto dipendente dal moto relativo tra Terra ed etere al primo ordine.

Maxwell ripeté che il modo di visionare il moto relativo tra Terra ed etere poteva avvenire solo grazie a misure astronomiche in una lettera all'astronomo statunitense David Peck Todd (1855-1939), poi pubblicata su *Nature* nel 1880.⁷⁶ Proprio questa pubblicazione portò Albert Abraham Michelson (1852-1931) a ragionare su un metodo per poter osservare effetti del secondo ordine.

Prima di considerare gli esperimenti ottici di *ether-drift* degli anni '80 compiuti da Michelson, sia da solo, sia con l'aiuto del chimico Edward William Morley (1838-1923), è necessario richiamare brevemente lo sviluppo dell'elettrodinamica dei corpi in moto successivo all'opera di Maxwell. Dalla prima pubblicazione delle equazioni di Maxwell, numerosi fisici cominciarono a lavorare all'interno di quel programma di ricerca, approfondendo il tema che poi sarà alla base dello sviluppo della teoria della relatività ristretta: l'elettrodinamica dei corpi in moto.⁷⁷ L'argomento fu trattato in vario modo da Maxwell e da quelli che vengono definiti i *Maxwellians*, i successori di Maxwell britannici e continentali che interpretarono e svilupparono in vari modi la teoria elettromagnetica.

I principali *Maxwellians* furono il tedesco Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), a cui si devono anche gli esperimenti sulle onde elettromagnetiche del 1887-1888 che influirono in maniera decisiva sull'accettazione della teoria di Maxwell, e i britannici Oliver Heaviside (1850-1925), George Francis Fitzgerald (1851-1901) e Sir Oliver Joseph Lodge (1851-1940). L'elettrodinamica dei corpi in moto e il corrispondente comportamento dell'etere costituivano un problema sia per Heaviside, sia per Hertz, i quali avevano sviluppato la teoria di Maxwell affermando che le equazioni dell'etere elettromagnetico implicavano che questo fosse trascinato completamente all'interno dei corpi in moto.

⁷⁶ Maxwell a Todd, 19 marzo 1879, in Harman, P. (ed.) (2002) *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell*, Vol. 3 1874-1879 (Cambridge: Cambridge University Press, 2002): 767-69, La lettera, dopo la morte di Maxwell, fu inviata da Todd a Stokes, che la rese pubblica in Maxwell, J. C. e Stokes, G. G. (1880) "On a possible Mode of Detecting a Motion of the Solar System through the Luminiferous Ether", *Nature*, 21 (1880): 314-15.

⁷⁷ Per una trattazione approfondita dell'argomento vedere, in particolare, Darrigol, O. (1993) "The electrodynamics of Moving Bodies from Faraday to Hertz", *Centaurus* 36 (1993): 245-360; l'argomento è affrontato, inoltre, in Buchwald, J. Z. (1985) *From Maxwell to Microphysics* (Chicago: Chicago University Press, 1985); e Darrigol (2000), *op. cit.*

Nel 1890 Hertz, infatti, assunse in maniera esplicita che esisteva un solo mezzo di trasporto delle onde elettromagnetiche, ossia che l'etere era completamente trascinato con i corpi in moto e che la polarizzazione elettrica e magnetica erano i flussi di questo mezzo.⁷⁸ Lo stesso Hertz riconosceva che tale assunzione non era compatibile con l'esperimento di Fizeau nell'ambito dell'ottica, ma, rimanendo ai soli fenomeni elettromagnetici, non vi erano esperimenti contrastanti con l'ipotesi di un etere completamente trascinato. Nel 1891 anche Heaviside, seguendo la teoria di Hertz, assunse esplicitamente un etere la cui velocità corrispondeva a quella dei corpi elettrificati in moto. È da ricordare che l'immagine dell'etere elettromagnetico sviluppata dalla maggior parte dei *Maxwellians* era diversa dalla visione meccanicistica di un etere sostegno meccanico delle onde e che ogni scienziato sviluppò una propria interpretazione della teoria elettromagnetica di Maxwell e del significato di tale sostegno etereo. Ad ogni modo, quasi tutti gli scienziati continuarono a parlare di etere e, una volta che questo era diventato etere elettromagnetico piuttosto che ottico, il problema principale divenne la relazione tra questo etere e la materia.⁷⁹

Il tema del comportamento delle equazioni di Maxwell rispetto al principio di relatività galileiano, quale fosse il comportamento dei corpi in moto rispetto all'etere, come interagissero etere e materia erano considerati problemi irrisolti. Uno dei dilemmi principali era il fatto che le equazioni elettromagnetiche di Maxwell, Hertz e Heaviside implicavano un mezzo in moto con i corpi anche se gli stessi Hertz e Heaviside si rendevano conto che alcuni fenomeni ottici e, in particolare, l'esperimento di Fizeau del 1851 sul trascinamento parziale dell'etere nell'acqua contraddicevano questa visione. Nel 1889, infatti, Heaviside scrisse a Hertz:

*A point to which I should like to direct your attention is Aberration! Or the influence of motion through ether of a transparent dielectric carrying a wave on the motion of the wave itself.*⁸⁰

⁷⁸ Hertz, H. R. (1890b) "Über die Grundgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper", *Annalen der Physik*, 41 (1890): 369-99.

⁷⁹ Per approfondimenti su questo tema vedere Hirosige (1976), *op. cit.*

⁸⁰ Da O'Hara, J. G. and Pricha, W. (1987) *Hertz and the Maxwellians: A Study and Documentation of the Discovery of electromagnetic Wave Radiation, 1873-1894* (London: Peter Peregrinus Ltd. And Science Museum of London, 1987), cit. in Darrigol (1993), *op. cit.*, p. 337.

Hertz concordò, nella risposta, che “*the motion of the ether relatively to matter – this is indeed a great mystery*”.⁸¹ Furono questi problemi di coerenza e di simmetria della teoria elettrodinamica e, in particolare, dell’induzione elettromagnetica che dipendeva dal moto relativo tra circuito e magnete, a portare alla teoria della relatività ristretta. I fenomeni ottici dell’aberrazione stellare e del trascinamento di Fresnel nell’acqua in moto erano già abbastanza problematici da richiedere uno sviluppo della teoria che rendesse conto di questi, indipendentemente dall’esperimento di Michelson. Questo breve sommario della situazione non può che renderci concordi con quanto già affermato dallo stesso Einstein sull’importanza di altri eventi, sperimentali e teorici, differenti dagli esperimenti interferometrici al secondo ordine compiuti poi dai Michelson. Come afferma Darrigol:

*Even in the eyes of the founders, the Maxwellian electrodynamics of moving bodies appeared to be stillborn. This theory could only have a limited range of application, within the traditional field of electrodynamics, but would necessarily fail when applied to optical phenomena.*⁸²

Nello stesso periodo in cui la teoria di Maxwell trovava accoglienza e sviluppo all’interno della comunità scientifica europea, Michelson svolse le esperienze ottiche che spesso, in seguito, furono considerate, in modo impreciso, un *experimentum crucis* in favore della teoria della relatività ristretta.

⁸¹ Darrigol (1993), *op. cit.*, p. 337.

⁸² Darrigol (1993), *op. cit.*, pp. 336-7.

3.9. Esperimenti di Michelson e Morley

Con i lavori sperimentali di Michelson si entra nell'ambito di congiunzione tra la premessa storica e uno degli argomenti specifici di questa tesi, dato che gli esperimenti di Miller furono una loro ripetizione. L'esperimento interferometrico ideato da Michelson nel 1880 è noto per essere uno degli eventi più rilevanti nel passaggio tra la fisica classica e fisica relativista, e il suo funzionamento teorico è riproposto in tutti i testi che discutono la teoria della relatività ristretta.

La storia degli esperimenti in sé, poi, è stata affrontata minuziosamente nel libro di Swenson (1972), che discute anche gli esperimenti di Miller-Morley del 1902-06 e di Miller degli anni '20, e in numerose ricerche storiche furono compiute anche da R. S. Shankland (vedi Cap. 6).⁸³

È tradizione storica molto diffusa il fatto che Michelson trasse spunto dalle affermazioni di Maxwell sulla difficoltà di utilizzare un metodo terrestre per osservare effetti ottici dovuti al moto relativo tra Terra ed etere, poiché questi sarebbero dipesi solo da termini di $\frac{v^2}{c^2}$. Non vi è altrettanta consonanza sul modo in cui Michelson potesse essere venuto a conoscenza di questa opinione di Maxwell. Questo, infatti, poteva essere avvenuto in diversi modi (vedi nota 76), ma la fonte più probabile rimane quella da lui stesso citata, ossia la pubblicazione su *Nature* della lettera del fisico britannico all'astronomo Todd.⁸⁴

Michelson compì il primo esperimento che ora porta il suo nome non lontano dalla terra natale. Nel settembre 1880, infatti, Michelson andò in Europa per studi post-dottorato, dopo aver raggiunto una certa notorietà grazie allo sviluppo di metodi per migliorare la misurazione della velocità della luce con procedure terrestri.⁸⁵

Michelson, grazie agli sviluppi tecnologici e alla sua ingegnosità come sperimentatore nel campo dell'ottica, raccolse la sfida di Maxwell ed ideò un apparato che potesse mostrare gli effetti dovuti al moto relativo tra Terra ed etere grazie agli spostamenti di frangia della figura d'interferenza di due raggi luminosi che compiono percorsi uguali. Durante i suoi

⁸³ Swenson Jr., L. S. (1972) *The Ethereal Ether* (Austin & London: University of Texas Press, 1972), pp. 54-73.

⁸⁴ Michelson, A. A., (1881) "The Relative Motion of the earth and the Luminiferous Ether", *American Journal of Science*, 22 (1881): 120-29. L'articolo di Maxwell è Maxwell e Stokes (1880), *op. cit.*

⁸⁵ Michelson A. A., (1878) "On a Method of measuring the Velocity of Light", *American Journal of Science*, 15 (1878): 394-95. Michelson aveva svolto questo lavoro insieme ad uno dei più influenti astronomi e matematici statunitensi: Simon Newcomb (1835-1909), il quale svolse un ruolo importante per permettere a Michelson di effettuare la successiva ricerca in Europa.

studi in Francia, nell'autunno del 1880, Michelson sviluppò l'idea teorica dello strumento, che verrà poi chiamato interferometro, e a Berlino, nel 1881, iniziò a compiere l'esperimento sotto la guida di Hermann von Helmholtz (1821-1894). Helmholtz rispose alla proposta di Michelson dicendo che lui non aveva nessuna obiezione, tranne per il fatto che gli effetti dovuti alla variazione di temperatura avrebbero potuto inficiare i risultati dell'esperimento.⁸⁶

Michelson si adoperò per schermare gli effetti di temperatura e, fiducioso di possibili risultati positivi, iniziò ad eseguire delle misure nell'*Istituto di Fisica* di Berlino. La sensibilità dello strumento rendeva, però, impossibile riuscire ad eseguire delle misure nella popolosa capitale tedesca e lo strumento venne, perciò, portato in uno scantinato dello *Astrophysicalisches Observatorium* di Potsdam, dove l'esperimento poté essere compiuto senza impedimenti.

La conclusione che trasse Michelson dai dati del suo esperimento nel 1881 fu:

*The interpretation of these results is that there is no displacement. The result of the hypothesis of a stationary ether is thus shown to be incorrect, and the necessary conclusion follows that the hypothesis is erroneous.*⁸⁷

Vista l'enorme importanza che hanno, nella presente tesi, tale esperimento e la sua interpretazione, mi addentrerò nell'idea di Michelson. Michelson partiva dall'ipotesi che l'etere fosse stazionario e che la Terra si muovesse con velocità v rispetto ad essa. Considerando un raggio di luce che viaggiasse nella stessa direzione del moto terrestre, Michelson chiamò:

V = velocità della luce nell'etere, che io chiamerò in notazione moderna c ;

D = la distanza tra due punti A e B del sistema ottico;

d = la distanza percorsa dalla Terra mentre la luce percorre D ;

d_1 = la distanza percorsa dalla Terra nel tempo in cui la luce percorre D in direzione inversa;

T = il tempo in cui la luce va da A a B nella stessa direzione del moto terrestre;

⁸⁶ Swenson afferma: "Long afterward Dayton C. Miller was to have his slight positive results for aether drift invalidated on the same grounds" in Swenson (1972), *op. cit.*, p. 68. La risposta di Helmholtz ritornò ad essere significativa dopo la pubblicazione delle conclusioni di Miller nel 1925-26. Il fatto che Einstein e, prima di lui, Helmholtz avessero previsto un effetto dipendente dalla temperatura e che questa fosse stata, alla fine, dimostrata, fu presa come esempio della capacità intuitiva da parte dei geni in Holton, G. (1969) "Einstein, Michelson and the 'crucial' experiment", *Isis*, 60 (1969): 133-97, p. 186.

⁸⁷ Michelson (1881), *op. cit.*, p. 128.

T_1 = il tempo in cui la luce va da B ad A;

T_0 = il tempo richiesto dalla luce per viaggiare tra gli stessi punti nel caso di Terra immobile nell'etere. In questo caso, i moti della luce rispetto alla Terra e all'etere coincidono, d e d_1 sono nulli.

Michelson a questo punto considera il doppio percorso, ossia l'andata e ritorno di un raggio di luce nella stessa direzione di moto della Terra, trovando il tempo totale impiegato:

$$T + T_1 = 2D \frac{c}{c^2 - v^2} \quad (3.5).$$

Michelson, poi, prende in considerazioni il raggio ottico percorrente uno stesso cammino ottico, ma perpendicolare alla direzione di moto terrestre. Michelson dedusse, erroneamente, che il moto terrestre, in questo caso, non avesse alcuna influenza sui tempi di percorrenza della luce. Il tempo totale scritto da Michelson risultò essere:

$$2T_0 = 2 \frac{D}{c} \quad (3.6).$$

Michelson calcolò le differenze tra questi due tempi:

$$\tau = (T + T_1) - 2T_0 = 2Dc \left(\frac{1}{c^2 - v^2} - \frac{1}{c^2} \right) \approx 2T_0 \frac{v^2}{c^2} \quad (3.7).$$

Questa differenza temporale τ implicava che la luce avesse percorso, nella direzione parallela al moto terrestre, una distanza maggiore della quantità:

$$2D \frac{v^2}{c^2} \quad (3.8).$$

Michelson iniziò l'esperimento con lo scopo dichiarato di misurare l'eventuale velocità della Terra attraverso l'etere. Compì, perciò, le osservazioni ad aprile, nel periodo in cui il moto orbitale terrestre era nella stessa direzione del moto, allora accettato, del sistema solare verso la costellazione Ercole. Secondo tale assunzione, la velocità della Terra nell'etere doveva essere, come minimo, uguale alla velocità orbitale.

Sostituendo, perciò, con v la velocità orbitale terrestre, Michelson, trova per $\frac{v^2}{c^2}$ il valore di $\frac{1}{10^8}$ circa, valore effettivamente minuscolo, ma osservabile con il suo interferometro.

Michelson prese la lunghezza d'onda della luce gialla e considerò un percorso ottico D di 1.200 mm, corrispondente a circa 2.000.000 di lunghezze d'onda delle luce gialla. La

distanza temporale data dalla formula (3.7) risultò, così, corrispondente a 4/100 di spessore di frangia.

Michelson poi ruotò l'apparato di 90°, in modo da poter visionare uno spostamento doppio durante la rotazione. Tale spostamento doppio era dovuto all'alternanza dei raggi che si trovava nella direzione del moto terrestre grazie al moto dell'interferometro. La quantità cercata era perciò di 8/100 di spessore di frangia, che secondo Michelson era "*easily measurable*".⁸⁸

Il risultato negativo dell'esperimento portò Michelson a propendere in maniera esplicita, nella conclusioni dell'articolo, per un etere totalmente trascinato dalla Terra, ossia per l'etere di Stokes. Il risultato negativo verrà ribadito pochi anni dopo nel più famoso esperimento di Michelson-Morley del 1887, ma è importante soffermarsi qui su due questioni storiografiche di un certo interesse: qual era il motivo che portò Michelson ad intraprendere l'esperimento e quali furono le reazioni da parte della comunità scientifica?

La prima domanda trova differenti risposte sia nelle possibili interpretazioni delle fonti primarie sia nella letteratura secondaria. Swenson fa notare una certa confusione nell'obiettivo dell'esperimento, che avranno una notevole importanza nella ripresa dell'esperimento da parte di Miller. Michelson affermò di voler ricavare la velocità della Terra nell'etere, ma poi utilizzò la sola velocità orbitale, per arrivare alla conclusione dell'impossibilità di misurare questa velocità. Assumendo l'esistenza di un etere, l'unica spiegazione per questo risultato era l'etere di Stokes.

Questo modo di considerare la velocità nell'etere una velocità assoluta e poi considerare per questo calcolo solo la conosciuta velocità orbitale, saranno questioni fondamentali nel lavoro di Miller e verranno sviluppati ampiamente nei capitoli a lui dedicati. In questa sede basterà dire che Michelson, probabilmente, non si aspettava un risultato nullo, era soprattutto un abile sperimentatore e il suo principale problema era trovare un metodo per risolvere la richiesta di Maxwell, ossia creare uno strumento in grado di misurare con metodi terrestri la velocità tra Terra ed etere, in grado, cioè, di rendere visibili effetti infinitesimali com'erano quelli del secondo ordine rispetto alla costante d'aberrazione.

Il suo principale problema era, perciò, sperimentale e il rapporto con le teorie vigenti era al di là delle sue principali competenze e interessi. È importante ricordare, inoltre, che

⁸⁸ Michelson (1881), *op. cit.*, p. 122.

Michelson utilizzò modalità ampiamente condivise all'epoca nei confronti del problema della velocità della Terra nell'etere. Tutti gli esperimenti che abbiamo visto finora considerarono la velocità orbitale, e Michelson compì le sue osservazioni in un periodo in cui il moto solare, allora accettato, non poteva influire eccessivamente sui risultati attesi.

Visto in quest'ottica, l'esperimento fu perfettamente riuscito, anche se il risultato nullo avrebbe potuto far dubitare anche della funzionalità dell'apparato. Michelson, per giustificare il risultato dell'esperimento e la sua validità, si appoggiò a un'ipotesi che aveva, in ogni caso, un certo seguito, soprattutto nel mondo britannico e nella teoria elettromagnetica, anche se presentava alcuni problemi.

Per comprendere bene la valenza storica di quest'esperimento è, però, ancora più significativo considerare la reazione dei teorici interessati al rapporto tra etere e materia. Secondo Swenson le reazioni all'esperimento del 1881 “*were slight*”⁸⁹ a causa della confusione sulla sua interpretazione e l'unico evento successivo che ebbe notevole risonanza fu un articolo di Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), del 1886, il quale riassunse tutto il lavoro teorico e sperimentale sul moto relativo tra Terra ed etere.⁹⁰

Prima di affrontare il fondamentale lavoro di Lorentz richiamerò qui altri avvenimenti concernenti il primo esperimento di Michelson. Costui rese pubblici i suoi risultati al suo ritorno in Francia e Potier gli fece notare l'errore compiuto nel non considerare, nei suoi calcoli, che anche il raggio perpendicolare al moto terrestre era soggetto ad un allungamento di percorso dovuto al moto. Il tempo in cui la luce viaggiava lungo il braccio perpendicolare di lunghezza D in un percorso di andata e ritorno era nei calcoli, corretti, del francese:

$$\frac{2D}{\sqrt{c^2 - v^2}} \approx \frac{2D}{c} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right) \quad (3.9).$$

La formula (3.9) portava ad una differenza temporale tra i due raggi che era la metà del risultato calcolato da Michelson in (3.7) e, quindi, ad una differenza di percorsi di:

$$2D \left(\frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right) = D \frac{v^2}{c^2} \quad (3.10).$$

⁸⁹ Swenson (1972), *op. cit.*, p. 73.

⁹⁰ Lorentz, H. A. (1886) “Over den invloed, dien de beweging der Aarde op de lichtverschijnselen uitoefent”, *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen*, 2 (1886), 297-372. Trad. Francese : Lorentz, H. A. “De l'influence du mouvement de la terre sur les phénomènes lumineux”, *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 21 (1887) 103-76.

Questo evento è interessante, soprattutto perché indicativo dell'attenzione rivolta all'esperimento di Potsdam: tale interesse fu così esiguo che questa correzione non venne pubblicata, fino a che Lorentz non risolse lo stesso calcolo nel 1886.⁹¹

Michelson, scontento dalla scarsa considerazione verso il suo esperimento, si dedicò ad altre ricerche ottiche che accrebbero la sua fama come ricercatore e i suoi rapporti con altri scienziati, in particolare John William Strutt - Lord Rayleigh (1842-1919), con il quale intrinse una fitta corrispondenza.

Evento fondamentale nella ricomparsa dell'interesse di Michelson verso l'esperimento del 1881 fu la serie di lezioni che William Thomson (1824-1907), poi Lord Kelvin dal 1892, tenne alla *Johns Hopkins University* in Baltimora nel 1884. A quelle lezioni parteciparono sia Michelson che Morley, i quali avevano avuto modo di conoscersi nei loro impieghi accademici in Cleveland. Michelson, infatti, era diventato il primo professore di fisica alla *Case School of Applied Science* a Cleveland fin dal ritorno negli USA nel luglio del 1882, quando Morley già insegnava chimica nell'attiguo *Western Reserve College*.

Lord Rayleigh, che aveva già conosciuto Michelson in Inghilterra nel 1881, seguì anch'egli alcune delle lezioni di Thomson. Proprio durante tale occasione, come apprendiamo dallo stesso Michelson, Thomson e Lord Rayleigh gli chiesero espressamente di rifare l'esperimento da lui inventato sul moto relativo tra Terra ed etere, ma di considerare anche la ripetizione dell'esperimento di Fizeau del 1851. Dal punto di vista teorico, l'esperimento di Michelson del 1881, una volta accettato il risultato, comportava una confutazione dell'etere di Fresnel, mentre l'esperimento di Fizeau era considerato la dimostrazione più riuscita della teoria dell'etere del francese. Nonostante l'esperimento di Fizeau fosse noto e, spesso, accettato nel suo risultato, Michelson fece notare che l'accordo tra l'esperimento di Fizeau e della teoria di Fresnel non era ottimale e poteva dirsi solo qualitativo.

La presenza di Morley alle lezioni di Baltimora, fece sì che, da quel momento, iniziasse una duratura collaborazione che avrebbe portato a importanti successi sperimentali. Così come da richiesta degli influenti fisici britannici, Michelson e Morley intrapresero la preparazione della ripetizione dell'esperimento di Fizeau sull'acqua in moto, che fu compiuta nel 1886 con un apparato molto più preciso di quello del francese. Il primo esperimento sul moto dell'etere della coppia Michelson-Morley fu, quindi, tale ripetizione.

⁹¹ Un'affermazione del genere viene fatta dallo stesso Michelson in una lettera del 6 marzo 1887 a John William Strutt, cit. in Shankland, R. S. (1964) "Michelson-Morley Experiment", *American Journal of Physics*, 32 (1964): 16-35, p. 29.

Come espresso dagli stessi autori, l'esperimento confermò le conclusioni di Fizeau con un margine d'errore sperimentale molto inferiore della precedente esperienza francese. L'esperimento risultò, così, una conferma della teoria dell'etere di Fresnel, basata su un etere totalmente immobile, in cui il coefficiente di trascinamento era legato solo al *surplus* dell'etere connesso alle molecole dei corpi trasparenti in moto. Considerando questo *surplus* di etere un tutt'uno con il mezzo in moto, il sostrato di etere a densità costante rimaneva immobile. Michelson e Morley, infatti, conclusero il loro articolo sull'esperimento affermando che:

*The result of this work is therefore that the result announced by Fizeau is essentially correct; and that the luminiferous ether is entirely unaffected by the motion of the matter which it permeates.*⁹²

L'asserzione sopra riportata era in netta contraddizione con le conclusioni del precedente articolo di Michelson.

L'esperimento del 1886 è meno noto del successivo esperimento del 1887 e si ritiene implicitamente che abbia avuto una rilevanza inferiore. In realtà, l'esperienza del 1886 ebbe un notevole rilievo che solo a posteriori può ritenersi inferiore a quella dell'anno successivo. L'esperimento di Michelson e Morley, che riprendeva il metodo di Fizeau aumentandone di molto la precisione, diede ai due scienziati la fama di essere sperimentatori accurati.

Il risultato preciso di questo esperimento portò Lorentz a riesumare anche l'esperimento del 1881 in un articolo che rivisitava tutto il tema degli effetti ottici legati al moto relativo tra Terra ed etere, sia dal punto di vista teorico che sperimentale.⁹³ Lorentz non si riteneva soddisfatto di nessuna teoria sul comportamento dell'etere ed evidenziò l'incongruenza della spiegazione di Stokes del fenomeno dell'aberrazione. Le due assunzioni di irrotazionalità dell'etere e di velocità nulla sulla superficie terrestre, secondo Lorentz, si contraddicevano a vicenda.

Lorentz propose una terza via che unisse elementi della teoria di Fresnel con quella di Stokes. Nel proporre la sua teoria, Lorentz richiamò alla mente il risultato, dubbio, dell'esperimento di Michelson del 1881 come l'unico che contrastava nettamente con

⁹² Michelson, A. A. e Morley, E. W. (1886) "Influence of Motion of the Medium on the Velocity of Light", *American Journal of Science*, 31 (1886): 377-86, p. 386 [corsivo degli autori].

⁹³ Lorentz (1886), *op. cit.*

l'ipotesi di Fresnel. Lorentz, quindi, considerò la possibilità di un etere che fosse trascinato solo parzialmente intorno ai corpi materiali, della stessa quantità prevista dal trascinamento parziale di Fresnel all'interno dei corpi. Questa ipotesi comportava un effetto dimezzato in un esperimento interferometrico del tipo inventato da Michelson del 1881.

Lorentz si soffermò lungamente sull'esperimento dello statunitense e riconsiderò anche l'errore dello sperimentatore già evidenziato da Potier, ossia l'influenza del moto della Terra sul braccio ortogonale alla direzione della velocità terrestre. Considerati l'errore di calcolo e l'effetto previsto dalla propria teoria, Lorentz affermò che l'esperimento di Michelson non era risolutivo, poiché l'effetto visibile era al di sotto dei limiti di misura dello strumento. Questo articolo, importante anche per la chiarezza esplicativa data al problema e per la critica teorica all'etere di Stokes, costituì anche un'ulteriore impulso per la ripetizione dell'esperimento da parte di Michelson e Morley. Secondo Hirosige, l'interesse di Lorentz era la relazione tra etere e materia ponderabile e visto che, pochi anni dopo, avrebbe basato la sua teoria elettrodinamica sulla relazione tra un etere completamente stazionario e corpuscoli carichi in moto rispetto ad esso, per lo storico "*there is little doubt that he was inclined to the hypothesis of a stationary ether*" già nel 1886.⁹⁴

Lorentz ritenne importante lasciare agli esperimenti su effetti del secondo ordine l'ultima parola sul comportamento dell'etere nei pressi della superficie terrestre. Il fisico olandese, infatti, aveva già dimostrato teoricamente che l'ipotesi dell'esistenza di un potenziale di velocità (etere irrotazionale) comportava lo stesso risultato sperimentale dell'etere stazionario al primo ordine della costante d'aberrazione.

L'esperimento di cui Lorentz aspettava il risultato fu compiuto solo l'anno successivo da Michelson e Morley. L'apparato costruito dai due scienziati a Cleveland aveva una precisione molto maggiore del precedente grazie alla maggior lunghezza del cammino ottico (1100 cm invece di 120 cm) e una stabilità molto buona, dovuta all'uso del mercurio su cui ruotava una lastra di arenaria, base del percorso ottico. I due ricercatori erano enormemente fiduciosi del loro risultato e, data l'alta precisione dell'esperimento del 1886, la comunità scientifica mostrava un notevole rispetto per il metodo interferometrico sviluppato da Michelson. Considerando la teoria di Fresnel e una velocità della Terra uguale alla velocità di rivoluzione intorno al Sole, una rotazione di 90° dell'interferometro avrebbe dovuto

⁹⁴ Hirosige (1976), *op. cit.*, p. 28.

mostrare uno spostamento di 4/10 di frangia, una quantità che era senza dubbio visibile nel loro strumento.

Nella letteratura novecentesca, il risultato dell'esperimento viene comunemente definito nullo. Molti dei critici della relatività, compreso Dayton C. Miller, attaccano tale affermazione come non corrispondente al vero. Un altro elemento che viene, spesso, sottolineato da chi non accetta l'interpretazione standard, è che questo esperimento sarebbe dovuto essere ripetuto a distanza di 6 mesi per eliminare ogni causa di compensazioni inattese tra moto terrestre e moto del sistema solare nell'etere, mentre in realtà non fu mai ripetuto.

La letteratura anti-relativista si sofferma su questi elementi per descrivere una sorta di mistero che sarebbe collegato all'accettazione del dogma relativista. Vista la presenza di questi temi nel dibattito contemporaneo da cui la presente tesi prende spunto, mi è sembrato opportuno prenderli in considerazione e fornire una rilettura dei fatti, sebbene ci siano già numerosi e validi commenti agli stessi. Un dato che qui anticipo, ma su cui tornerò nel proseguo della tesi, è che su questi argomenti una delle maggiori fonti secondarie utilizzate è l'articolo di Miller del 1933.⁹⁵ Miller, prima di affrontare i suoi esperimenti, riconsidera la storia degli esperimenti di Michelson-Morley, avendo anche a disposizione notizie non ricavabili da fonti scritte, e inserendo la propria ricerca scientifica nella narrazione storica. Considerando la completa adesione alle informazioni scritte da Miller un problema dal punto di vista della metodologia storiografica, ho cercato di raffrontare le sue informazioni con altri dati.

L'esperimento del 1887, nel report che di esso fecero gli stessi autori, viene descritto come incompatibile con l'etere di Fresnel: se c'era uno spostamento di frange questo non poteva essere molto maggiore di un centesimo della distanza tra le frange, risultato decisamente inferiore ai 4/10 previsti dalla teoria di Fresnel. Agli autori non restava che concludere:

The relative velocity of the earth and the ether is probably less than one-sixth the earth's orbital velocity, and certainly less than one-fourth [...] if there is any relative motion between

⁹⁵ Miller, D. C. (1933) "The Ether-Drift Experiment and the determination of the Absolute Motion of the Earth", *Reviews of Modern Physics*, 5 (1933): 203-42.

*the earth and the luminiferous ether, it must be small; quite small enough entirely to refute Fresnel's explanation of aberration.*⁹⁶

È evidente con la frase “*if there is any relative motion*” che il risultato nullo era una delle possibili spiegazioni dei loro dati. Esso, però, non era supportato da nessuna teoria visto che il loro precedente esperimento aveva confermato il valore del coefficiente di trascinamento parziale dell'etere, difficilmente coniugabile con la teoria di Stokes. Gli autori citano, inoltre, le critiche di Lorentz alla teoria di Stokes, e riportano il risultato sperimentale alla proposta fatta dallo stesso fisico olandese di un etere parzialmente trascinato sulla superficie della Terra:

*If now it were legitimate to conclude from the present work that the ether is at rest with regard to the earth's surface, according to Lorentz there could not be a velocity potential, and his own theory also fails.*⁹⁷

Semberebbe che gli autori dell'esperimento non affermino direttamente un risultato nullo semplicemente perché non possono basarsi su nessuna teoria dell'etere fino ad allora formulata. Non avendo alcuna teoria che il loro esperimento, unito con il precedente, potesse confermare, gli autori furono molto più cauti rispetto alle affermazioni conclusive, molto nette, dei due articoli precedenti Michelson (1881) e Michelson-Morley (1886).

La difficoltà di inquadrare questo risultato in una teoria dell'etere che spiegasse tutti gli effetti sull'ottica in movimento sembra aver creato una disaffezione verso questo esperimento da parte degli stessi suoi autori, nonostante ora lo si ritenga uno degli esperimenti più importanti della fine del secolo XIX. Un mese dopo, infatti, Michelson e Morley si dedicarono alla creazione di un nuovo metodo di definizione dell'unità di lunghezza basato sul numero di una lunghezza d'onda. Questa nuova definizione del metro ebbe subito una grande risonanza presso la comunità scientifica internazionale, favorevole a definire il metro nei termini di lunghezza d'onda della luce.

⁹⁶ Michelson, A. A. e Morley, E. W. (1887) “On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether”, *American Journal of Science*, 34 (1887): 333-45, p. 340-1.

⁹⁷ *Ibid.*, p. 341.

Oltre a ciò, Michelson e Morley furono molto impegnati nel preparare il congresso dell'*American Association for the Advancement of Science (AAAS)* che si tenne nel 1889 a Cleveland.

Swenson cita questi avvenimenti come le motivazioni che impedirono una ripetizione dell'esperimento di Michelson-Morley del 1887 in altre stagioni, come era nei propositi degli autori. In linea di principio, infatti, era possibile una combinazione tra la velocità orbitale terrestre con la velocità del Sole che avrebbe potuto portare, nel loro esperimento, ad un risultato molto inferiore alle aspettative. Le affermazioni di Swenson vanno ampliate con il fatto che i due scienziati si sentirono relativamente sicuri del risultato, anche se affermarono la necessità di ripetere l'esperimento ogni tre mesi per togliere qualsiasi incertezza.

La difficoltà degli autori dipese solo dall'impossibilità di trovare una teoria che sostenesse il loro risultato e che non presentasse problemi già evidenziati a livello teorico o sperimentale. Difficoltà che impedì un proseguo dell'opera sperimentale nell'attesa di nuovi sviluppi teorici.

Michelson, infatti, non citò i risultati dell'esperimento sul moto relativo né durante il discorso al congresso dell'*AAAS* del 1888 né durante il discorso per il premio Nobel del 1907.⁹⁸ Entrambi questi discorsi riguardavano il suo lavoro sperimentale nel campo dell'ottica, ma proprio l'esperimento a cui ora è maggiormente legato il suo nome, era da lui considerato non fondamentale tra il 1887 e il 1907.

È evidente che, non avendo alcuna teoria di sostegno e non avendo una propensione teorica, i dati del 1887 non lo portarono a credere che, in altre stagioni, il risultato sarebbe stato diverso. Ci sono altri due eventi che possono aggiungersi nelle possibili motivazioni che impedirono una ripetizione dell'esperimento nell'immediato: Michelson, nel 1887, fu al centro di una vicenda giudiziaria e nel 1889 si trasferì alla *Clark University* in Massachusetts, interrompendo, così, la sua collaborazione con Morley.⁹⁹

Tra i numerosi motivi che possono aver impedito il rifacimento degli esperimenti, sono da considerarsi centrali lo sconforto dei due sperimentatori e un successivo *shift* d'interesse

⁹⁸ Pais, A. (1982), '*Subtle is the Lord...*' *The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 1982). Versione utilizzata trad. ital. Pais, A. '*Sottile è il Signore*'... *La Scienza e la Vita di Albert Einstein* (Torino: Bollati Boringhieri, 1991), p. 127.

⁹⁹ Moyer, A. E. (1987) "Michelson in 1887", *Physics Today*, (1987), pp. 50-56.

verso ricerche più gratificanti, come la nuova unità di misura delle lunghezze. Gli stessi autori, infatti, affermano chiaramente:

*It is obvious from what has gone before that it would be hopeless to attempt to solve the question of the motion of the solar system by observations of optical phenomena at the surface of the earth.*¹⁰⁰

Propongono, poi, la ripetizione di un esperimento simile, non schermato da muri pesanti, come se l'etere non potesse passare attraverso i muri degli edifici.¹⁰¹ Quanto loro credessero in una spiegazione del genere non è chiaro, visto che, in effetti, bisognerà aspettare alcuni anni per nuove versioni di esperimenti simili. È anche possibile che ci fosse una differenza tra Morley e Michelson rispetto a queste possibili interpretazioni del comportamento dell'etere. Michelson, infatti, quando riprese il problema la prima volta nel 1897, propose un tipo di esperimento diverso.¹⁰²

Analizzando la quantità di dati da loro registrati, questa fu decisamente esigua se confrontata con le intenzioni degli autori e i successivi esperimenti di Miller. L'esperimento fu, infatti, eseguito un'ora a mezzogiorno l'8, il 9 e l'11 luglio, e un'ora nei pomeriggi dell'8, 9 e 12 dello stesso mese, per un totale di 36 giri dell'interferometro.

L'informazione che l'esperimento non venne ripetuto al di là di questi momenti, dichiarati nell'articolo del 1887, viene, soprattutto, da Miller. Possiamo, però, ritenerla attendibile perché derivano da Morley, con cui Miller lavorò alla ripetizione dello stesso esperimento dal 1902. Un non credere a tale affermazione porterebbe a dover ipotizzare la malafede di Miller come unica possibilità di spiegazione, la quale non viene tenuta un considerazione in quest'analisi storica. Un conto è l'enfasi mostrata verso alcuni fatti ed una re-interpretazione *a posteriori* di dati sperimentali non chiari, altra cosa è mentire su eventi di cui si è a conoscenza. Tutte le informazioni raccolte concordano nel far apparire Miller uno scienziato assolutamente onesto, e questo si riterrà stabilito nel proseguo dell'analisi storica compiuta in questa tesi.

¹⁰⁰ Michelson e Morley (1887), *op. cit.*, p. 341 [enfasi mia].

¹⁰¹ Che Michelson desse credito anche alla possibilità di una spiegazione del genere è confermato dalla lettera a Lord Rayleigh del 6 marzo 1887, cit. in Shankland (1964), *op. cit.*, p. 29. Da notare, però, che anche nella comunicazione a Lord Rayleigh dei risultati dell'esperimento, nella stringata lettera del 17 agosto 1887, Michelson afferma che il suo risultato implica una velocità relativa tra Terra ed etere massimo un sesto della velocità orbitale.

¹⁰² Michelson, A. A. (1897) "The Relative Motion of Earth and Ether", *American Journal of Science*, 3 (1897): 475-78. Per una descrizione dell'esperimento vedere par. 3.11.

Le confuse conclusioni dell'articolo di Michelson e Morley del 1887, e la difficoltà di trovare una teoria dell'etere che ne spiegasse il risultato congiuntamente con gli altri fenomeni ottici passarono in secondo piano anche grazie ad un altro evento sperimentale che segnò i successivi sviluppi della teoria dell'elettricità e del magnetismo alla fine del XIX secolo. Nello stesso periodo, infatti, Hertz compì gli esperimenti che vennero interpretati come prova dell'esistenza delle onde elettromagnetiche. Da quel momento la teoria di Maxwell ebbe un credito molto maggiore e la formulazione di una coerente teoria elettromagnetica della luce diventò il principale obiettivo dei maggiori fisici teorici. La teoria di Maxwell, in particolare nella rilettura di Hertz e Heaviside, era compatibile con l'esistenza di un etere elettromagnetico totalmente trascinato all'interno dei dielettrici. Questo comportamento non aveva, però, ancora trovato una spiegazione del coefficiente di Fresnel-Fizeau per l'ottica nei corpi trasparenti in movimento. Questo porterà Lorentz a sviluppare la propria teoria elettromagnetica, in cui terrà conto anche del risultato dell'esperimento di Michelson-Morley del 1887.

3.10. La teoria dell'etere di Lorentz e la contrazione di Lorentz-Fitzgerald

La teoria elettromagnetica della luce e i problemi legati agli esperimenti ottici trovarono nell'opera di Lorentz una sintesi a cui la comunità scientifica a lui contemporanea diede un immediato credito. Mentre sviluppava la sua teoria, Lorentz affrontava anche, all'interno di un unico programma di ricerca, tutti gli esperimenti ottici sul moto della Terra rispetto all'etere fino ad allora compiuti.

La sua teoria si basava su una separazione netta tra l'etere stazionario e i corpuscoli elettrici che interagivano con esso senza intaccarlo. La teoria di un etere totalmente immobile, non modificato né dai corpi trasparenti né da quelli opachi aveva, come scogli principali, la spiegazione del coefficiente di trascinamento di Fresnel-Fizeau per i corpi trasparenti e l'esperimento di Michelson-Morley del 1887. Lorentz aveva già affrontato i problemi ottici nel 1886, ma riprese l'argomento nel 1892 avendo sviluppato una teoria dell'etere elettromagnetico alla quale fare riferimento e che applicò ai corpi in movimento.¹⁰³

Lorentz propose che il coefficiente di trascinamento di Fresnel-Fizeau fosse dovuto alla sovrapposizione delle onde incidenti della luce e delle onde secondarie dovute alle vibrazioni degli ioni, come Lorentz chiamava le particelle cariche dei corpi materiali che si muovevano liberamente nell'etere. Lorentz calcolò che l'onda risultante dalla sovrapposizione dell'onda incidente e delle onde secondarie viaggiasse proprio alla velocità predetta da Fresnel.

Lorentz riuscì ad avere, così, un primo importante successo integrando il coefficiente di Fresnel all'interno di una teoria elettromagnetica basata sulle equazioni del campo di Maxwell in un etere perfettamente stazionario. Pochi mesi dopo trovò anche le trasformazioni che rendevano invarianti le equazioni di Maxwell al primo ordine d'approssimazione in v/c , dove v è la velocità di un qualunque sistema inerziale.¹⁰⁴ Il 1892 si rivelò un anno cruciale per Lorentz anche per un terzo articolo in cui propose una

¹⁰³ Nel 1892 Lorentz propose, per la prima volta, la sua teoria dell'etere nel classico Lorentz, H. A. (1892a) "La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants", *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 25 (1892): 363-552. Ripubblicato in Zeeman P., e Fokker, A. D. (eds.) *Collected Papers*, vol. 4 ('s-Gravenhage: Nijhoff, 1935-1939): 164-321.

¹⁰⁴ Lorentz, H. A. (1892b) "On the reflection of light in moving bodies", *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen*, ripubblicato in Zeeman P., e Fokker, A. D. (eds.) *Collected Papers*, vol. 4 ('s-Gravenhage: Nijhoff, 1935-1939): 215-18.

possibile spiegazione del risultato nullo dell'esperimento di Michelson-Morley.¹⁰⁵ Un etere immobile, come quello ipotizzato da Lorentz, avrebbe dovuto portare ad osservare lo spostamento di frange calcolato da Michelson e Morley. Lorentz propose, allora, una contrazione delle lunghezze dei corpi, nella direzione del moto della Terra attraverso l'etere, di una quantità tale da bilanciare esattamente l'effetto che non fu verificato.

Il termine di contrazione delle lunghezze calcolato da Lorentz è chiamato contrazione di Lorentz-Fitzgerald, perché questo era stato proposto anche da Fitzgerald. L'origine di questo fattore e le teorie dei due fisici sono al centro di diverse interpretazioni storiografiche. Mentre è pacifico che Fitzgerald fu il primo a proporre una deformazione dei corpi in un etere immobile per spiegare il risultato dell'esperimento di Michelson-Morley, in una lettera pubblicata su *Science* nel 1889, e che Lorentz venne a sapere di tale idea solo dopo la pubblicazione del suo articolo, esiste un dibattito acceso sull'interpretazione delle teorie degli autori.¹⁰⁶

Non è chiaro, infatti, se Fitzgerald intendesse una contrazione del corpo o una deformazione di diverso tipo. Il fisico irlandese, inoltre, non fornì nessuna formula matematica. Quello di Lorentz fu, perciò, il lavoro fondamentale per lo sviluppo dell'idea nella sua formulazione matematica, ancora oggi utilizzata, in particolare rispetto al successivo sviluppo del programma di ricerca relativista.

Un altro tema fortemente dibattuto concernente la formulazione di Lorentz del termine di contrazione è quanto esso fosse *ad hoc*. Dal 1892, quando il termine fu proposto per la

¹⁰⁵ Lorentz, H. A. (1892c) "De Relative Beweging van der Aarde en den Aether", *Verlagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen*, trad. inglese "The Relative Motion of the Earth and the Ether", in Zeeman P, e Fokker, A. D. (eds.) *Collected Papers*, vol. 4 ('s-Gravenhage: Nijhoff, 1935-1939): 220-23.

¹⁰⁶ La prima pubblicazione con l'idea di deformazione del corpo in moto nell'etere si trova in Fitzgerald, G. F. (1889) "The Ether and the Earth's Atmosphere", *Science*, 13 (1889): 390. Nessun contemporaneo di Fitzgerald pare sapesse che la lettera era stata pubblicata su *Science*. Il primo a scoprire tale pubblicazione è stato lo storico Stephen Brush, in Brush, S. G. (1967) "Note on the History of the Fitzgerald-Lorentz Contraction", *Isis*, 58 (1967): 230-32; scritto in risposta all'articolo Bork, A. M. (1966) "The "Fitzgerald Contraction", *Isis*, 57 (1966): 199-207, che poneva dei dubbi sulla priorità di Fitzgerald. Fino all'articolo di Brush, il primo articolo noto contenente l'idea di Fitzgerald fu Lodge, O. J. (1892) "On the Present State of Our Knowledge of the Connection between Ether and Matter", *Nature*, 46 (1892): 164-65, e ripetuta nel ben più influente Lodge, O. J. (1893) "Aberration problems – a discussion concerning the connection between ether and gross matter; with some new experiments", *Philosophical Transactions of Royal Society of London Series A*, 184 (1893): 727-807, pp. 749-50. Lodge la descrive come un'idea formulata a voce dal fisico irlandese. Secondo Bork, Fitzgerald avrebbe potuto prendere l'idea dalla lettura dell'articolo di Lorentz (1892c). Bork afferma questo in pieno contrasto con una storiografia di origine britannica derivante da Whittaker (1910) che descrive, invece, un utilizzo di Lorentz dell'idea di Fitzgerald, di cui potrebbe essere venuta a conoscenza con l'articolo su *Nature* Lodge (1892). La moderna storiografia è piuttosto concorde nel ritenere che entrambi svilupparono la loro idea indipendentemente. Per alcuni dei termini della polemica storiografica vedere Hunt, B. J. (1988) "The Origins of the Fitzgerald Contraction", *British Journal for the History of Science*, 21 (1988): 67-76; e Brown, H. R. (2001) "The origins of length contraction: I. The Fitzgerald-Lorentz deformation hypothesis", *American Journal of Physics*, 69 (2001): 1044-54.

prima volta, al 1895, anno in cui la teoria di Lorentz assunse una prima forma compatta in un unico trattato, lo stesso Lorentz pare non fosse del tutto soddisfatto di questo termine di contrazione così come non era convinto anche di altre questioni all'interno della propria teoria.¹⁰⁷

Il *Versuch* del 1895 è la *summa* del lavoro di Lorentz sull'elettrodinamica dei corpi in moto. In esso, il fisico olandese riunì la sua teoria dell'etere e le sue derivazioni per i fenomeni ottici. Le posizioni teoriche contenute nel *Versuch* sono le stesse degli articoli del 1892. In particolare, Lorentz ripropose la formula di contrazione dei corpi in moto nell'etere riconoscendo che l'idea era stata formulata indipendentemente anche da Fitzgerald. La legge di contrazione nasceva da un'ipotesi fisica ben precisa: l'eguaglianza tra forze intermolecolari e forze elettrostatiche. Nel caso dell'elettrostatica, le equazioni del campo legate al corpo in moto di traslazione nell'etere potevano essere ricondotte a quelle in un sistema in quiete grazie alla trasformazione $x' = \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. Nel caso che le forze

intermolecolari si comportassero come quelle elettrostatiche il corpo avrebbe subito una contrazione del corpo a causa della dipendenza di queste forze dal moto nell'etere.

Lorentz riteneva che il risultato nullo dell'esperimento di Michelson-Morley potesse essere spiegato da una contrazione del corpo nella direzione del moto della Terra della quantità $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, esattamente come sarebbe avvenuto nel caso le forze fossero state tutte elettrostatiche.

È tale assunzione di eguaglianza tra forze elettrostatiche e intermolecolari che viene vista come una forzatura da numerosi studiosi ed è per questo che l'ipotesi di contrazione è da alcuni ritenuta *ad hoc*. Whittaker, però, nel 1910 afferma che questa ipotesi “*won favour in a gradually widening circle, until eventually it came to be generally taken as the basis of all theoretical investigations on the motion of ponderable bodies through the aether*”.¹⁰⁸

Rispetto agli articoli del 1892, il *Versuch* contiene anche la correzione della formula di Fresnel per i mezzi dispersivi, che diventa:

¹⁰⁷ Lorentz, H. A. (1895) *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern* (Leiden: E. J. Brill, 1895); anche in *Collected Papers* vol. 5, pp. 1-139.

¹⁰⁸ Whittaker (1910), ristampato in Whittaker (1951), *op. cit.*, p. 405.

$$v = \frac{c}{n} + \left(1 + \frac{1}{n^2} + \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda}\right)w \quad (3.11);$$

dove v è la velocità della luce nel mezzo, λ la lunghezza d'onda, e w la velocità del mezzo nell'etere. La formula (3.11) fu poi verificata da Pieter Zeeman (1865-1943) nel 1914.¹⁰⁹

Nel 1895 la teoria di Lorentz presentava ancora numerosi problemi irrisolti, ma era la più generale dell'epoca e quella che spiegava il maggior numero di fenomeni, tanto che ebbe una diffusione notevole. Diffusione aiutata da altri avvenimenti di tipo sperimentale, in modo particolare la scoperta dell'elettrone da parte di Joseph John Thomson (1865-1940) nel 1897.¹¹⁰

La teoria di Lorentz nel 1895 si basava sul *teorema degli stati corrispondenti*, il quale si riferiva alle trasformate delle coordinate legate ai corpi in moto con velocità costante nell'etere che rendevano equivalenti, al primo ordine di v/c , le equazioni di Maxwell rispetto al sistema stazionario nell'etere.

La più importante di queste trasformate era quella temporale:

$$t' = t - (v/c^2)x \quad (3.12);$$

dove t' era chiamato *tempo locale* per differenziarlo dal tempo reale t e x era la coordinata nella direzione del moto del sistema legato al corpo. Il nome *tempo locale* derivava dal fatto che questo dipendeva dalla variabile x . Al primo ordine in v/c , una configurazione del campo soluzione delle equazioni di Maxwell nel sistema in quiete, con il tempo reale, corrispondeva ad una configurazione del campo soluzione delle equazioni trasformate nelle coordinate del sistema in moto e nel *tempo locale*. Così era possibile passare, per comodità, dal campo reale nell'etere, ad uno in quiete rispetto al sistema in moto, senza perdita di semplicità, una volta che non si considerassero termini più piccoli di v/c .

¹⁰⁹ Zeeman, P. (1914) "Fresnel's coefficient for light of different colours (First part)", *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen*, 17 (1914): 445-51, e Zeeman, P. (1915) "Fresnel's coefficient for light of different colours (Second part)", *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen*, 18 (1915): 398-408.

¹¹⁰ Si tratta del noto esperimento di Thomson pubblicato in Thomson, J. J. (1897) "Cathode Rays", *Philosophical Magazine*, 44 (1897): 293-316. Il nome elettrone per la fondamentale particella carica era stato dato la prima volta da George Johnstone Stoney (1826-1911) in Stoney, G. J. (1894) "Of the "Electron", or Atom of Electricity", *Philosophical Magazine*, 38 (1894): 418-20 e diventò quello utilizzato da Sir Joseph Larmor all'interno della sua teoria dell'etere e materia, la quale aveva molti punti in comune con la teoria di Lorentz (vedi par. 3.13). Il nome elettrone fu poi preferito al nome ione dato da Lorentz all'entità di particella carica.

Il *teorema degli stati corrispondenti* concordava con l'assenza di fenomeni ottici dipendenti dal moto tra Terra ed etere al primo ordine della costante d'aberrazione. Sia il campo reale sia il corrispondente, infatti, “*produce identical patterns of brightness and darkness*”.¹¹¹

L'uso del *teorema degli stati corrispondenti* semplificava anche i calcoli per il coefficiente di Fresnel, rispetto alla derivazione precedente, ma, come numerosi studiosi fanno notare, il *tempo locale* costituiva per Lorentz una quantità ausiliaria senza significato fisico. Essa serviva solo a semplificare i calcoli per il sistema in moto.

Nella teoria di Lorentz il sistema di riferimento solidale con l'etere veniva, così, ad assumere il significato di spazio assoluto, nel quale il campo elettromagnetico ed il tempo erano reali, anche se lo storico Hirosige ha posto in dubbio il fatto che questa identificazione tra sistema dell'etere e spazio assoluto fosse realmente fondamentale all'interno della visione teorica del fisico olandese.¹¹²

¹¹¹ Janssen e Stachel (2004), *op. cit.*, p. 24.

¹¹² Hirosige (1976), *op. cit.*

3.11. Altri esperimenti ottici di *ether-drift*

Prima di addentrarci negli sviluppi della teoria di Lorentz, la cui enorme importanza è stata espressa da Whittaker con il conferimento del titolo *The Age of Lorentz* all'ultimo capitolo della prima parte della sua *History* (1910), sono da considerare altri due esperimenti ottici sul moto della Terra rispetto all'etere compiuti, rispettivamente, da Lodge e da Michelson nell'ultima decade del XIX secolo.¹¹³

Questi esperimenti sono contemporanei all'elaborazione della teoria di Lorentz e gli storici che si sono occupati di storia della teoria della relatività ristretta raramente li citano, mentre risultano importanti nel quadro storiografico delle ricerche sul vento d'etere. Per questo motivo sia Swenson che Whittaker si soffermano su questi esperimenti.¹¹⁴

Per i fisici interessati al comportamento meccanico dell'etere, i due esperimenti compiuti da Michelson e Morley nel biennio 1886-87 implicavano una difficoltà esplicativa enorme. Questa fase della storia della fisica è complessa perché le visioni dell'etere si stavano diversificando e prendevano forme particolari legate alle teorie dei singoli autori. Vi erano tanti eteri quasi quanti erano gli scienziati interessati al problema. In seguito, il programma di ricerca legato all'etere elettromagnetico, in particolare nella forma che questo assunse con la teoria di Lorentz, ebbe una risonanza maggiore presso la comunità scientifica e portò a successivi sviluppi culminati con la creazione della teoria della relatività ristretta, mentre la ricerca del comportamento meccanico dell'etere fu in breve abbandonata. Durante gli anni '90 del secolo XIX siamo, però, ancora nel momento di crisi e di differenziazione teorica, che secondo Kuhn è una delle caratteristiche del periodo della *scienza straordinaria* che precede la rivoluzione scientifica.

Per quanto riguarda il concetto di etere, questa espressione trova riscontro nel comportamento di numerosi autorevoli scienziati: mentre il programma di ricerca elettromagnetico presentava questioni teoretiche profonde sulla relazione tra etere e materia, alcuni fisici rimasero legati alla ricerca dell'etere luminifero. Lodge e Michelson furono, appunto, tra coloro i quali non modificarono l'immagine fisica di etere come necessario sostegno delle vibrazioni luminose.

¹¹³ Whittaker (1910), *op. cit.*

¹¹⁴ Swenson (1972), *op. cit.*, pp. 98-120.

Lodge compì un esperimento che, a posteriori, viene svalutato perché non in linea con gli sviluppi dell'elettrodinamica, ma che, nel periodo in questione, costituì ulteriore fonte di dilemma. Nel 1892, il fisico britannico ideò uno strumento per calcolare la viscosità dell'etere utilizzando il metodo interferometrico su percorsi di luce intorno a masse ruotanti.¹¹⁵

Lodge era a conoscenza dell'esperimento di Michelson-Morley e voleva provare la possibilità che la materia trascinasse con sé l'etere circostante come predetto dalla teoria di Stokes. Questa ipotesi avrebbe spiegato l'esperimento di Michelson-Morley senza ulteriori assunzioni sul comportamento della materia. Il fisico britannico si aspettava di verificare uno sfasamento di frange derivante dal moto dell'etere intorno al corpo in rotazione, ma trovò un risultato nullo. Nel citare il risultato dell'esperimento di Michelson-Morley, Lodge riportò anche una possibile spiegazione fornita in una conversazione da Fitzgerald, la deformazione del corpo in moto ora nota con il nome di contrazione di Lorentz-Fitzgerald (vedi par. 3.10).

Nel 1897, lo stesso Michelson ritornò, per la prima volta dopo il 1887, a lavorare su un esperimento di *ether-drift*.¹¹⁶ Lo sperimentatore statunitense, con la stessa tecnica interferometrica da lui sviluppata, cercò un effetto derivante da una possibile dipendenza dall'altitudine della velocità della luce.

L'esperimento di Michelson-Morley era spiegabile, infatti, ipotizzando un etere totalmente trascinato nelle vicinanze della Terra. Era possibile, quindi, che la percentuale di etere trascinato diminuisse con la distanza dalla superficie terrestre. Questo modo di ragionare viene ora considerato lontano dalle ricerche fondamentali dell'epoca. Hirosige, infatti, afferma:

*With the exception of Michelson's futile experiment to detect differences in the relative velocities of the ether and the earth at different altitudes, most of the experiments on the ether problem made in the 1890's [...] focused on the connection between the ether and matter.*¹¹⁷

¹¹⁵ Lodge (1893), *op. cit.*

¹¹⁶ Michelson, A. A. (1897) "The Relative Motion of Earth and Ether", *American Journal of Science*, 3 (1897): 475-78.

¹¹⁷ Hirosige (1976), *op. cit.*, p. 31.

Sagnac e Miller s'inseriscono nella tradizione del gruppo di scienziati che cercava, tramite esperimenti di *ether-drift*, di delineare il comportamento dell'etere luminifero e uno degli obiettivi di questa tesi è appunto vedere quanto questo gruppo fosse effettivamente minoritario.

L'esperimento del 1897 diede un altro risultato considerato nullo: uno spostamento, se c'era, doveva essere inferiore al ventesimo di frangia, il che implicava che l'etere, nel caso fosse trascinato, doveva essere trascinato per una distanza dalla terra uguale almeno al diametro terrestre, fatto questo ritenuto implausibile.

Michelson utilizzò uno strumento alto ca. 15m e considerò una legge di decrescita esponenziale. La deduzione teorica sul comportamento dell'etere derivava proprio da questa scelta che Michelson ammise essere totalmente ipotetica. Per raggiungere una certezza sul comportamento dell'etere ad una certa distanza dalla superficie terrestre, il fisico statunitense affermò che sarebbe stato necessario ripetere l'esperimento con una più grande differenza di livello tra i due lati dell'interferometro.

Michelson riassunse le seguenti tre possibilità per il comportamento dell'etere:

- a) l'etere attraversava la massa della Terra senza nessuna influenza tra di essi (Fresnel);
- b) la lunghezza dei corpi è alterata dal loro moto attraverso l'etere (ipotesi di deformazione di Fitzgerald e Lorentz);
- c) l'etere è trascinato dal moto terrestre anche a migliaia di chilometri dalla superficie terrestre (Stokes con l'aggiunta del risultato sperimentale del 1897).

La conclusione dell'articolo, però, fu che la scelta migliore sarebbe stata ritornare all'etere di Fresnel e spiegare con la deformazione proposta da Lorentz il precedente risultato dell'esperimento del 1887.

Michelson, quindi, propendeva per l'ipotesi di Lorentz e lo faceva solo in base a riflessioni concernenti l'ottica, senza considerare, cioè, gli sviluppi della teoria elettromagnetica *tout court*, la quale costituiva il principale fattore dell'importanza della teoria del fisico olandese presso i contemporanei. L'atteggiamento di Michelson costituiva, da un lato, un'ulteriore conferma dell'autorevolezza raggiunta dalla teoria di Lorentz alla fine del XIX secolo; dall'altro, la dimostrazione che, a volte, tale teoria fu accolta in base a considerazioni puramente ottiche, più che a una comprensione degli sviluppi dell'elettrodinamica

3.12. Lorentz e Poincaré¹¹⁸

Dopo il 1895, i tre principali attori del passaggio dall'elettrodinamica classica alla teoria della relatività ristretta furono Lorentz, Poincaré e Einstein.

La teoria di Lorentz era una delle diverse teorie elettrodinamiche che si stavano sviluppando alla fine del XIX secolo, ma ebbe una consacrazione ufficiale al meeting, tenutosi nel 1898 a Düsseldorf, della *Naturforscherversammlung*, dove molti fisici tedeschi, tra cui Max Planck, apprezzarono le argomentazioni del fisico teorico olandese.¹¹⁹ Tale consacrazione della comunità scientifica tedesca si unì alle opinioni di Poincaré, che riteneva la teoria elettromagnetica di Lorentz la più vicina ai fatti conosciuti e si può, così, desumere che essa fosse la più seguita intorno al 1900, almeno dai fisici teorici continentali.

La teoria di Lorentz contenuta nel *Versuch* spiegava, come si è visto, l'esperienza di Michelson-Morley grazie ad una contrazione delle lunghezze. Tale ipotesi era ritenuta *ad hoc* da alcuni scienziati, tra cui Poincaré, ma non fu questo il motivo che portò Lorentz alle modifiche successive, mentre furono fondamentali altre critiche espresse dal fisico e matematico francese nel 1900.

Prima di affrontare i temi al centro delle critiche di Poincaré che riteneva, ad ogni modo, la teoria di Lorentz la più vicina a tutti i fatti empirici fino ad allora conosciuti, riassumerò di seguito come Lorentz avesse già sviluppato la sua teoria nel 1899.¹²⁰ Lorentz ripropose la stessa teoria del 1895, cercando di dimostrare in modo più elegante il *teorema degli stati corrispondenti* e di trovare un meccanismo fisico più plausibile per l'ipotesi della contrazione. L'articolo è un'evoluzione del precedente ed è evidente, già dal titolo, che

¹¹⁸ Per semplicità riduco la discussione a questi due autori in quanto è accettata la loro importanza nel passaggio tra l'elettrodinamica classica e la teoria della relatività ristretta, ben consapevole che anche Sir Joseph Larmor stava sviluppando una teoria equivalente per molti aspetti a quella di Lorentz tanto da dedurre le trasformate nella loro forma definitiva prima dello stesso Lorentz. Tratterò il lavoro di Larmor in modo breve alla fine di questo paragrafo. Larmor espone in maniera compiute le sue idee in Larmor, J. (1900) *Aether and Matter* (Cambridge: Cambridge University Press, 1900). La teoria di Larmor si sviluppò, però, attraverso diverse pubblicazioni: Larmor, J. (1894) "A Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium", *Philosophical Transaction of the Royal Society*, 185 (1894): 719-822; Larmor, J. (1895) "A Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium – Part II. Theory of Electrons", *Philosophical Transaction of the Royal Society*, 186 (1895): 695-743; Larmor, J. (1897) "A Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium – Part III. Relation with Material media. Theory of Electrons", *Philosophical Transaction of the Royal Society*, 190 (1897): 202-300. A parte Larmor, molti altri fisici stavano sviluppando teorie elettromagnetiche alternative. Per un'analisi approfondita delle diverse teorie elettrodinamiche alla fine del secolo XIX, vedere Miller, A. I. (1981) *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and early interpretation (1905-1911)* (Reading: Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1981); Buchwald, J. Z. (1985) *From Maxwell to Microphysics* (Chicago: Chicago University Press, 1985); e Darrigol (2000), *op. cit.*

¹¹⁹ Darrigol (2000), *op. cit.*, p. 331.

¹²⁰ Lorentz, H. A. (1899) "Simplified Theory of Electrical and Optical Phenomena in Moving System", *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen* (1898-1899): 427-42.

l'obiettivo principale è la semplificazione del trattamento matematico dei fenomeni ottici ed elettromagnetici. Il percorso che Lorentz ha compiuto dal 1892 al 1899 appare, così, lineare. In tale percorso la teoria, già pronta nelle sue linee fondamentali, venne di volta in volta migliorata dal punto di vista formale.

Dal punto di vista fisico, però, Lorentz continuava ad affermare che “*some artificies served to shorten the mathematical treatment*”.¹²¹ Lorentz aveva la necessità di chiarire così il senso del *tempo locale*, il che fornisce una chiara indicazione della profonda distanza tra la sua teoria e quella che sarà formulata da Einstein. La trattazione di Lorentz del 1899 rendeva, però, ulteriormente evidente che il *teorema degli stati corrispondenti* valeva solo per le equazioni elettromagnetiche al primo ordine di approssimazione e che i fenomeni elettromagnetici dipendenti dal secondo ordine non erano inclusi nella sua teoria.

Per gli esperimenti ottici al secondo ordine, invece, Lorentz fu costretto ad introdurre ulteriori assunzioni, ribadendo la contrazione fisica dei corpi in moto attraverso l'etere. Per poter giustificare tale ipotesi matematica, Lorentz espresse la necessità che le forze molecolari dovessero propagarsi allo stesso modo delle forze elettromagnetiche, ossia non a distanza, ma tramite l'azione dell'etere. Un'assunzione che, nella sua visione del mondo, non poteva considerarsi *ad hoc*, come una parte della letteratura storica e scientifica giudica l'ipotesi di contrazione.

Lorentz trovò un'espressione generale per le forze molecolari in grado di rendere nullo in maniera esatta qualsiasi esperimento ottico su effetti del secondo ordine. Tale espressione generale aveva, come caso particolare, la contrazione, ma comprendeva qualsiasi modifica delle dimensioni del corpo dipendenti da due parametri. Nel caso di un moto del corpo con velocità v sull'asse x nell'etere, Lorentz propose i due parametri ε , un coefficiente indeterminato, dipendente da v , differente dall'unità al massimo di una quantità v^2/c^2 e

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Le trasformazioni dovute alle forze molecolari, perciò, erano:

$$x = \frac{\varepsilon}{k} x''; \quad y = \varepsilon y''; \quad z = \varepsilon z''; \quad t = k \varepsilon t'', \quad (3.13);$$

¹²¹ Ibid., p. 427.

dove t era il tempo locale modificato e le coordinate spaziali con gli apici erano riferiti al sistema in moto. Tutte queste trasformazioni rendevano conto dell'esperimento di Michelson-Morley e, così, Lorentz poteva lasciare ε indeterminato, anche se in una trasformazione reale, questo fattore doveva avere un valore definito.

Possiamo considerare la teoria espressa nel 1899 la più compiuta tra quelle formulate prima di una revisione generale compiuta nel 1904, a seguito delle critiche di Poincaré e di nuove esperienze di *ether-drift* elettromagnetico. Alcuni studiosi hanno fatto notare come, già in questa versione della teoria di Lorentz, l'espressione *ad hoc* riferita al termine di contrazione mal rende conto degli sforzi che lo scienziato stava compiendo per spiegare, in modo organico, tutta una serie di fenomeni e che la sua teoria era la più vicina ai fatti allora conosciuti.¹²² Le critiche di Poincaré e la necessità di una teoria più generale furono i motori delle revisioni successive, ma lo stesso Lorentz affermò più tardi:

*However, my approach was not so terribly unsatisfactory. Lacking a general theory, one can derive some pleasure for explanation of an isolated fact, as long as the explanation is not artificial. And the interpretation given by me and Fitzgerald was not artificial. It was more so that it was the only possible one, and I added the comment that one arrives at the contraction hypothesis if one extends to other forces. Had I emphasized this more, the hypothesis would have created less an impression of being invented ad hoc.*¹²³

Fondamentale per i successivi sviluppi della teoria di Lorentz fu, quindi, il lavoro di Poincaré nell'evidenziarne le falle. Il matematico e fisico francese, negli anni '90 del XIX secolo, tenne delle lezioni sull'elettromagnetismo alla *Sorbonne* di Parigi dove espresse le sue preferenze verso la teoria del fisico olandese rispetto a quelle di Hertz, Larmor, Helmholtz e Thomson. La visione scientifica ed epistemologica di Poincaré gli impediva, però, di considerarla ancora compiuta per diverse ragioni che riassunse in un articolo pubblicato per il giubileo dello stesso Lorentz nel 1900.¹²⁴

¹²² Per un'accurata discussione di questa problematica vedere Zahar, E. (1973) "Why did Einstein's Programme Supersede Lorentz's?", *The British Journal for the Philosophy of Science*, 24 (1973): 95-123, 223-62.

¹²³ Lettera di Lorentz ad Einstein, gennaio 1915 citata in Nersessian, N. J. (1986) "Why wasn't Lorentz Einstein? An examination of the scientific method of H. A. Lorentz", *Centaurus*, 29 (1986): 205-42, pp. 232-3 [enfasi nell'originale].

¹²⁴ Nel percorso teorico di Poincaré, molte sono le tracce relative alla sua formulazione di una teoria elettrodinamica che alcuni vedono come un'anticipazione della teoria della relatività ristretta di Einstein, ma le critiche più dirette e significative alla teoria di Lorentz si trovano in Poincaré, H. (1900) "La théorie de Lorentz et le principe de la réaction", *Archive néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 5 (1900): 252-78 e nelle lezioni alla *Sorbonne* degli anni 1888,

La prima critica, manifestata già nelle lezioni alla *Sorbonne* del 1899, si basava sul fatto che ci fossero due spiegazioni diverse per la mancanza di effetti ottici al primo e al secondo ordine della costante d'aberrazione, rispettivamente il *teorema degli stati corrispondenti* e la contrazione delle lunghezze. Il *teorema degli stati corrispondenti* non era, infatti, generalizzabile agli effetti di ordine maggiore, tanto che Lorentz dovette introdurre la trasformazione reale dei corpi per rendere conto degli effetti del secondo ordine.

Tale spiegazione, però, era valida solo per gli esperimenti ottici e Lorentz non escludeva che si potessero osservare effetti elettrici o magnetici al secondo ordine di v/c o altri effetti ottici dipendenti da ordini superiori al secondo. Poincaré scrisse che l'ipotesi di contrazione era “*un véritable «coupe de pouce» donné par la nature pour éviter que le mouvement de la terre puisse être révélé par les phénomènes optiques*”.¹²⁵

Il matematico e fisico francese era convinto che i fenomeni ottici dovessero dipendere solo dal moto relativo dei corpi ponderabili e non solo per il primo o il secondo ordine della costante d'aberrazione, ma in modo esatto. Molti studiosi hanno evidenziato che tale affermazione era un'enunciazione del principio di relatività.¹²⁶

Poincaré stava attendendo, intorno al 1900, l'avvento di una nuova meccanica che rendesse conto di questo principio. La teoria di Lorentz soddisfaceva questo principio di relatività solo approssimativamente, mentre, per Poincaré, una buona teoria doveva essere in grado di rendere conto del principio di relatività in maniera rigorosa e senza condizioni aggiuntive per i vari ordini della costante di aberrazione. Poincaré si stava riferendo ai fenomeni ottici, ma è stato riconosciuto che si trattava di una ricerca all'interno dell'elettromagnetismo, di cui i fenomeni ottici erano solo una parte, quella più soggetta a possibilità sperimentali.

Poincaré, inoltre, criticò la teoria di Lorentz per la sua rinuncia al principio di azione e reazione. Che la forza di Lorentz violasse il principio di azione e reazione era stato evidenziato dallo stesso Lorentz nel *Versuch* (1895), senza, però, valutare come grave tale mancanza. Poincaré, la cui epistemologia lo portava a cercare una fisica basata sui principi, vedeva, invece, nella violazione del principio di azione e reazione un problema

1890 e 1899 pubblicate in Poincaré, H. (1901) *Électricité et optique. La lumière et les théories électrodynamiques. Leçon professées à la Sorbonne en 1888, 1890 et 1899* (Paris: Carré et Naud, 1901).

¹²⁵ Poincaré (1901), *op. cit.*, p. 536.

¹²⁶ Tale tradizione storiografica è cominciata con il già citato Whittaker (1953), *op. cit.*; per la bibliografia concernente le discussioni sulla priorità della teoria della relatività ristretta vedere nota 14 del Cap. 1 della presente tesi.

fondamentale di cui bisognava tener conto per cercare di migliorare la teoria stessa, così come era fondamentale un accordo rigoroso col principio di relatività.

Il fisico francese considerò il sistema costituito dalle particelle cariche e dal fluido di energia elettromagnetica su tutto lo spazio e trovò che il centro di massa di questo sistema, con opportune condizioni, si muoveva di moto rettilineo ed uniforme, ossia verificava il principio di azione e reazione. Questa spiegazione, però, non lo convinse perché era certo che il principio di azione e reazione dovesse valere per i soli corpi ponderabili, gli unici di cui si potesse fare chiara esperienza.

Il principio di azione e reazione che considerasse anche l'etere elettromagnetico in congiunzione con il principio del moto relativo avrebbe portato, poi, alla possibilità del moto perpetuo. Come il principio di moto relativo valeva se applicato ai soli corpi ponderabili, Poincaré si aspettava che anche il principio di azione e reazione dovesse valere solo per questi, visto lo stretto legame che esisteva tra i due principi.

Partendo da queste critiche, Poincaré sviluppò un'interpretazione del *teorema degli stati corrispondenti* e, in particolare, del *tempo locale* che si avvicina molto alla futura teoria della relatività ristretta. Gli stati corrispondenti divennero, nella visione di Poincaré, gli stati del sistema così come misurati da un osservatore in moto insieme al corpo in movimento, in tal modo si potevano impiegare le trasformazioni di Lorentz per dedurre le osservazioni compiute da un osservatore solidale con il sistema in moto.

Un siffatto approccio diventò ancora più fondamentale nel momento in cui Poincaré considerò il significato del *tempo locale*. In un passaggio notevolmente citato, lo scienziato francese affermò che esso altro non era che il tempo misurato dall'osservatore in moto allorché avesse adottato una particolare procedura di sincronizzazione, identica alla futura sincronizzazione di Einstein. Una procedura di sincronizzazione, cioè, di orologi posti in differenti punti dello spazio grazie a segnali luminosi e ignorando l'eventuale moto traslatorio. Così facendo gli orologi erano regolati come se la velocità della luce fosse identica nei due sensi, indipendentemente da qualsiasi moto inerziale degli orologi. In questo modo, Poincaré diede, e fu il primo a farlo, un'interpretazione fisica del *tempo locale*, che nella teoria di Lorentz ricopriva solo il significato di una semplificazione

matematica, ma, come scrive Darrigol, “*Poincaré only made this remark en passant, gave no proof, and did as if it had already been on Lorentz’s mind*”.¹²⁷

Poincaré aveva, inoltre, già esplicitato che la datazione di eventi astronomici si basava sul postulato implicito che la luce avesse una velocità costante e che essa fosse identica in ogni direzione.¹²⁸ L’isotropia rispetto all’etere comportava che un osservatore ignaro del suo stato di moto potesse considerarla isotropa nel proprio sistema di riferimento sincronizzando così i propri orologi compiendo un errore che portava alla trasformata del *tempo locale*. Le equazioni elettromagnetiche di Maxwell-Lorentz risultavano invarianti al primo ordine una volta che fossero scritte in funzione del *tempo locale* e, quindi, era come se le onde elettromagnetiche si propagassero a velocità c rispetto all’osservatore in moto. L’invarianza di c per i sistemi di riferimento inerziali diventò, così, fondamentale per le future ricerche di Poincaré e Lorentz.

Non è secondario, quindi, notare che, indipendentemente dalle possibili discussioni sulle differenze tra le teorie di Poincaré ed Einstein, l’isotropia della velocità della luce e il principio di relatività erano già state formulate da Poincaré nel 1900. Che per Poincaré si trattasse della velocità della luce misurata e che la velocità della luce costante rimanesse solo nell’etere è elemento di dibattito contemporaneo, ma dal punto di vista fenomenologico, la differenza era inesistente.

Per concludere questo paragrafo vorrei evidenziare che, nel 1900, Poincaré aveva proposto molti dei temi che furono ripresi da Einstein, ma non rinunciò esplicitamente al concetto di etere, rimase legato alle trasformate di Lorentz al primo ordine in v/c , dove v è la velocità di un qualunque sistema di riferimento, e non approfondì il concetto di sincronizzazione. La maggior parte degli storici ritiene che Poincaré non ridefinisca qui, come in seguito, i concetti di tempo e spazio, vedendo in questo una differenza sostanziale con la futura teoria di Einstein.

Mi pare interessante riportare in questa sede che un altro accostamento è stato fatto tra Poincaré ed Einstein riguardo al loro essere inseriti in un contesto in cui la sincronizzazione degli orologi mediante propagazione elettromagnetica era un problema concreto. Questo potrebbe aver favorito la formulazione di una teoria in cui fossero centrali il ruolo della

¹²⁷ Darrigol (2005), *op. cit.*, p. 66.

¹²⁸ Poincaré, H. (1898) “La mesure du temps”, *Revue de métaphysique et de la morale*, 6 (1898): 371-84.

sincronizzazione tramite segnali elettromagnetici e il senso della velocità della luce misurata da diversi osservatori.¹²⁹

Altro avvenimento importante del 1900, che spesso passa in secondo piano nelle trattazioni storiche sull'origine della relatività ristretta, fu la pubblicazione del libro *Aether and Matter*, nel quale Larmor formulò le trasformate di Lorentz capaci di rendere invarianti le equazioni del campo elettromagnetico in modo esatto per qualunque ordine. Questo libro ebbe una certa influenza nel mondo britannico, dove tali trasformate presero il nome di Larmor-Lorentz, e favorì la diffusione della successiva teoria della relatività ristretta.¹³⁰

Larmor era arrivato alla formulazione esatta delle trasformate di Lorentz già nel 1897 all'interno del suo sviluppo di una teoria dinamica dell'elettromagnetismo basata sull'etere rotazionale, proposto la prima volta dal matematico irlandese James MacCullagh (1809-1847) nel 1839, e sull'elettrone, che però ricopriva lo status ontologico di singolarità dell'etere.¹³¹

L'etere dinamico di Larmor meglio s'inserì nella tradizione di ricerca della comunità scientifica britannica. Per i fisici matematici continentali (in particolare per Poincaré) essa, però, presentava difetti che la teoria di Lorentz non aveva, in quanto questa era più rigorosa dal punto di vista dimostrativo.

Tornando alle trasformate di Lorentz, Larmor, già nel 1897, le scrisse nella forma:

$$x' = \gamma x, \quad y' = y, \quad z' = z \quad t' = \gamma^{-1} t - \gamma u x / c^2 \quad (3.14);$$

dove $\gamma = \left(1 - u^2/c^2\right)^{-\frac{1}{2}}$.

Larmor, poi, scrisse le equazioni del campo in base a queste nuove trasformazioni nel caso di un sistema che viaggiasse lungo l'asse x con velocità \mathbf{u} .

Una volta che si considerassero anche le trasformate delle coordinate spaziali di Galileo quelle di Larmor corrispondevano alle odierne trasformate di Lorentz. Larmor, cioè, eliminò

¹²⁹ Per un'approfondita analisi di questo tema vedere Galison, P. (2003) *Einstein's Clocks, Poincaré's Maps, Empires of Time* (New York/London: Norton Company, 2003)

¹³⁰ Larmor (1900), *op.cit.*

¹³¹ Larmor (1897), *op.cit.* L'etere di MacCullagh trova la sua formulazione in MacCullagh, J. (1848) "An Essay Towards a Dynamical Theory of Crystalline Reflection and Refraction", *Transactions of the Royal Irish Academy* (presentato nel 1839) 21 (1848): 17-50. Per approfondimenti sulla teoria di Larmor vedere Schaffner (1972), *op. cit.*; e Buchwald (1985), *op. cit.*

il fattore ε che Lorentz aveva lasciato indeterminato nel 1899, ma, come afferma Darrigol, lo fece “*without proof*”.¹³²

Larmor, come Lorentz, non si rese conto che il *teorema degli stati corrispondenti*, con le trasformate espresse in (3.14), rendeva le equazioni elettromagnetiche invarianti in maniera esatta e non solo fino al secondo ordine in u/c . Anche Larmor utilizzò il teorema solo come uno strumento di semplificazione dei calcoli, senza considerare le equazioni come i campi misurati nel sistema in moto e senza interpretazioni fisiche per la trasformata temporale. Come Lorentz, inoltre, Larmor pensava che ci potessero essere esperimenti elettromagnetici in grado di rendere evidente il moto attraverso l’etere.

Del tutto secondario, ma interessante come esempio dell’importanza del concetto dell’etere alla fine del XIX secolo e delle diverse sfaccettature che questo concetto portava con sé, il tentativo compiuto da Max Planck (1858-1947) di risolvere il problema del moto dell’etere rispetto alla Terra con una versione dell’etere di Stokes che non avesse i problemi teorici sottolineati da Lorentz nel 1886.

Planck, nel 1898, affermò che le due condizioni di esistenza del potenziale di velocità e di uguaglianza di velocità tra etere e Terra sulla superficie terrestre potevano essere compatibili nel caso di un gas comprimibile, che seguisse la legge di Boyle, con densità maggiore intorno ai corpi ponderabili. La maggior quantità di etere poteva essere spiegata con l’attrazione gravitazionale della Terra e Planck doveva solo assumere che la velocità della luce rimanesse indipendente dalle condensazioni dell’etere.

Nell’immediato, la proposta di Planck venne commentata e criticata da Lorentz.¹³³ Oltre a questa, seppur importante, citazione esistono pochi altri riferimenti a tale teoria e si ritiene, perciò, che essa “*did not attract very much attention*”.¹³⁴ Come vedremo nel Cap. 5, però, essa fu ripresa negli anni ‘20 ed ebbe un ruolo non secondario rispetto all’interpretazione dei risultati degli esperimenti di D. C. Miller a Mount Wilson. Vista la sua ripresa all’interno

¹³² Darrigol, O. (1994) “The electron theories of Larmor and Lorentz: A comparative study”, *Historical Studies in Physical and Biological Sciences*, 24 (1994): 265-336, p. 330. Vedere tutto l’articolo per una completa analisi delle differenze tra le teorie di Lorentz e Larmor.

¹³³ Lorentz, H. A. (1899b) “Stokes’s theory of aberration in the supposition of a variable density of the aether”, *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen* (1899): 443-48. Planck non ha pubblicato un articolo sull’etere comprimibile, tutte le citazioni storiche sono sull’articolo di Lorentz. Lorentz riprende la sua discussione della proposta di Planck nel suo noto libro riassuntivo della sua teoria completa pubblicata la prima volta nel 1909: Lorentz, H. A. (1909/1916) *The Theory of Electrons and Its Applications to the Phenomena of Light and Radiant Heat: a course of lectures delivered in Columbia University, New York, In March and April 1906* (2nd ed., Leipzig: B. G. Teubner, 1916).

¹³⁴ Schaffner (1972), *op. cit.*, p. 38.

del dibattito sugli esperimenti di *ether-drift* mi pare interessante riportare qui il commento di Lorentz, ripreso nel 1909 nel suo noto libro *The Theory of Electrons*.

Lorentz ammise che l'ipotesi di Planck rendeva possibile la coesistenza delle due ipotesi di Stokes senza problematiche teoriche. Anche se non era possibile evitare un scorrimento sulla superficie della Terra, in base alle leggi idrodinamiche, si poteva, infatti, rendere questa velocità relativa piccola a piacere in funzione dell'aumento di densità.

Passando ai calcoli, Lorentz affermò che una densità dell'etere nei dintorni della Terra che fosse ε^{11} volte la sua densità nello spazio celeste rendeva la massima velocità di scorrimento ("*velocity of sliding*") minore dello 0,5% della velocità della Terra.¹³⁵

Lorentz giudicò tale ipotesi "*startling*" e, sebbene la fisica progredisse anche grazie a questo tipo di ipotesi, "*this assumption of an enormously condensed ether, combined [...] with the hypothesis that the velocity of light is not at the least altered by it, is not very satisfactory*".¹³⁶

Lorentz affermò, inoltre, che lo stesso Planck avrebbe apprezzato maggiormente la teoria di Fresnel di un etere immobile una volta che questa fosse stata in accordo con tutti i fenomeni osservati. Lorentz, quando scrisse questi commenti nel 1909, aveva in mente la sua teoria dell'elettrone che aveva già trovato una forma compiuta nel 1904.

¹³⁵ Lorentz (1916), *op. cit.*, p.173. Lorentz sviluppa il calcolo matematico nella nota 67, pp. 316-17.

¹³⁶ Lorentz (1916), *op. cit.*, p. 174.

3.13. Ulteriori esperimenti di *ether-drift* (1902-04)

Oltre ai problemi teorici ed epistemologici legati alla teoria di Lorentz, si sviluppò, all'inizio del XX secolo, un ramo della ricerca che affrontò la possibilità di testare effetti elettromagnetici del moto della Terra nell'etere. Abbiamo visto che Lorentz, nel 1895, affrontava gli esperimenti già effettuati, in particolare ottici, ma la sua teoria non implicava l'impossibilità di scoprire effetti elettromagnetici dipendenti dal moto degli oggetti nell'etere, in particolare del moto terrestre.

Una prima esperienza fu proposta da Fitzgerald poco prima della sua morte ed eseguita dal suo assistente al *Trinity College* di Dublino, Frederick Thomas Trouton (1863-1922) nel 1901 e con H. R. Noble, con alcune modifiche, nel 1903.¹³⁷

Fitzgerald comprese che un condensatore carico avrebbe dovuto subire un effetto al secondo ordine di v/c con la comparsa di una coppia di forze nel caso l'asse del condensatore avesse formato un angolo con la direzione del moto terrestre. Un effetto del genere si sarebbe dovuto annullare nel caso di una contrazione del tipo Lorentz-Fitzgerald. L'esperimento non portò alla luce nessun effetto sul condensatore e questo condusse Larmor e Lorentz ad inserire questo risultato nelle loro teorie, con la dimostrazione matematica della dipendenza dell'effetto nullo dalla contrazione di Lorentz-Fitzgerald.¹³⁸

Per questo motivo l'esperimento di Trouton-Noble è spesso visto come l'analogo elettromagnetico dell'esperimento ottico di Michelson-Morley. È importante sottolineare, però, che Trouton e Noble riferirono un limite superiore della velocità relativa tra Terra ed etere di 1,5 km/s, mentre Michelson e Morley avevano proposto un limite superiore compreso tra 1/6 e 1/4 della velocità orbitale terrestre, ossia tra 5 e 7,5 km/s. Questo limite

¹³⁷ Trouton, F. T. (1902) "The results of an electrical experiment, involving the relative motion of the earth and ether, suggested by the late professor Fitzgerald", *Transactions of the Royal Dublin Society*, 7 (1902): 379-84; e Trouton, F. T. e Noble, H. R. (1903) "The mechanical forces acting on a charged electric condenser moving through space", *Philosophical Transactions of the Royal Society Series A*, 202 (903): 165-81. Per una discussione storica degli esperimenti vedere Whittaker (1953), *op. cit.*, pp. 28-29. Una discussione moderna che affronta analogie e differenze tra le spiegazioni di Lorentz, Larmor e Laue, può essere trovata nella tesi Janssen, M. (1995) "A Comparison between Lorentz's Ether Theory and Special Relativity in the Light of the experiments of Trouton and Noble" (PhD thesis, Pittsburgh, 1995).

¹³⁸ Larmor, J. (1904) "On the ascertained absence of effects of motion through the aether, in relation to the constitution of matter, and on the FitzGerald-Lorentz hypothesis.", *Philosophical Magazine Series 6*, 7 (1904): 621-25; e Lorentz, H. A. (1904) "Electromagnetic Phenomena in a System moving with a Velocity Smaller Than That of Light", *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen*, 6 (1904): 809-34. Lorentz, però, fa una distinzione netta tra l'esperimento di Trouton (1902) e quello di Trouton-Noble (1903): il primo, secondo Lorentz, non aveva mostrato alcun effetto solo a causa della poca sensibilità dello strumento, mentre si dilungò a lungo sulle motivazioni teoriche che motivavano l'inesistenza di un effetto di *ether-drift* per il secondo.

superiore era previsto nel caso non si fossero considerate altre spiegazioni per l'esito dell'esperimento, come appunto la contrazione di Lorentz-Fitzgerald.

Trouton e Noble, poi, affermarono che il caso di una compensazione tra velocità orbitale e velocità del sistema solare che rendesse inosservabile la velocità della Terra rispetto all'etere era improbabile. Questo ragionamento era basato su molteplici osservazioni di carattere astronomico.

L'altro esperimento di una certa rilevanza fu quello compiuto da Rayleigh del 1902 e ripetuto, con maggior precisione, da DeWitt Bristol Brace (1859-1905) nel 1904.¹³⁹

Lo scopo di Lord Rayleigh era di verificare la “*at the first sight startling hypothesis*”¹⁴⁰ di un cambio di dimensione del corpo a seconda del movimento nell'etere, proposta da Lorentz e Fitzgerald e sviluppata da Larmor. Secondo Lord Rayleigh una deformazione di un corpo rifrangente avrebbe comportato il nascere del fenomeno della doppia rifrazione. Lord Rayleigh e, in maniera più precisa, Brace conclusero che nessuna doppia rifrazione era stata osservata né in liquidi né in solidi. Il fisico statunitense concluse che la contrazione, o qualunque tipo di deformazione del corpo, non poteva essere la spiegazione del risultato nullo dell'esperimento di Michelson-Morley, ponendo un altro problema alla teoria di Lorentz oltre alle critiche teoriche poste da Poincaré.¹⁴¹

¹³⁹ Rayleigh, J. (1902) “Does Motion through the Aether cause Double Refraction?”, *Philosophical Magazine*, 4 (1902): 678-83; e Brace, D. B. (1904) “On Double Refraction in Matter moving through the Aether”, *Philosophical Magazine*, 7 (1904): 317-29. Brace, inoltre, espone il problema del rapporto tra materia in movimento ed i suoi risultati sperimentali nel Congresso di San Louis del 1904 dove erano presenti anche Poincaré e Langevin. Questa relazione fu pubblicata postuma in Brace, D. B. (1904) “The Ether and moving Matter”, *Congress of arts and science, universal exposition, St. Louis 1904*, vol. 4 (1906): 105-17. Comunicazione in data 23 settembre 1904.

¹⁴⁰ Rayleigh (1902), *op. cit.*, p. 679.

¹⁴¹ Brace cita la teoria di Lorentz come contrazione, mentre espone l'idea di Hicks come un allungamento della dimensione del corpo ortogonale al moto della Terra nell'etere. Hicks, W. M. (1902) “On the Michelson-Morley Experiment Relating to the Drift of Ether”, *Philosophical Magazine*, 3 (1902): 9-36. Brace non cita l'articolo Lorentz, H. A. (1899), *op. cit.*, dove il fisico olandese aveva proposto la teoria generale di qualunque deformazione del corpo in grado di spiegare l'esperimento di Michelson-Morley.

3.14. Le teorie di Lorentz, Poincaré ed Einstein (1904-05)

Nel capitolo introduttivo ho accennato alla dibattuta storiografia sull'argomento delle analogie e le differenze tra le teorie elettrodinamiche di Lorentz, Poincaré ed Einstein.¹⁴² Le tre formulazioni teoriche che arrivarono a previsioni sperimentabili identiche furono quasi contemporanee e ritengo che non sia di fondamentale soffermarsi su questioni di priorità in questa sede. Sarà mio interesse mostrare, invece, come le tre teorie venissero accolte e comprese dai fisici che continuarono esperimenti sul vento d'etere, per aggiungere elementi storici al dibattito, in particolare nel contesto della ricezione.

Lorentz, nel 1904, a seguito delle critiche di Poincaré e degli esperimenti discussi nel paragrafo precedente, compì alcune modifiche alla sua teoria dell'elettrone e dell'etere elettromagnetico stazionario, che assunse così la sua forma quasi definitiva. In questa nuova versione, Lorentz prevedeva l'invarianza dei fenomeni ottici per ogni ordine di v/c come conseguenza delle trasformazioni delle equazioni elettromagnetiche in sistemi in moto inerziale rispetto all'etere.

La memoria di Lorentz partiva con alcune assunzioni fondamentali che si avvicinavano al programma di ricerca denominato “*electromagnetic world-view*”. Tale programma di ricerca partiva dall'assunzione che tutta l'inerzia fosse di origine elettromagnetica ed era molto seguito da alcuni fisici dell'epoca come il più promettente avversario del superato programma di ricerca denominato “*mechanical world-view*”.¹⁴³

Come sottolineato da Janssen e Stachel, Lorentz non sviluppò la sua teoria partendo da un'assunzione di tipo generale sull'invarianza delle equazioni di campo, ma partendo da specifiche ipotesi fisiche da cui l'assunzione generale potesse essere derivata.¹⁴⁴ Tali ipotesi erano:

¹⁴² La teoria di Lorentz a cui qui ci si riferisce è la teoria come appare in Lorentz, H. A. (1904), *op. cit.* La teoria di Poincaré fu pubblicata come estratto sui *Comptes Rendus* nel 1905 in Poincaré, H. (1905) “Sur la dynamique de l'électron”, *Comptes Rendus*, 140 (1905): 1504-8; e nella versione completa in Poincaré, H. (1906) “Sur la dynamique de l'électron”, *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, 21 (1906): 131-75. L'articolo di Einstein fu pubblicato, invece, nel 1905 sugli *Annalen der Physik* in Einstein, A. (1905) “Zur Elektrodynamik bewegter Körper”, *Annalen der Physik*, 17 (1905): 891-921.

¹⁴³ Per accurate analisi dedicate a tale programma di ricerca vedere: Miller (1981), *op. cit.*; Hirose (1976), *op. cit.*; McCommarch (1970), *op. cit.*

¹⁴⁴ Janssen e Stachel (2004), *op. cit.*, p. 30.

- l'elettrone in moto con velocità v subisce una contrazione nella direzione del moto della quantità:

$$\gamma^{-1} = \sqrt{(1 - v^2/c^2)} \quad (3.15);$$

- una traslazione del sistema modifica tutte le forze come se queste fossero di origine elettromagnetica;
- tutta l'inerzia ha un'origine elettromagnetica.

Una volta poste queste assunzioni insieme con quella sulla validità delle equazioni di campo per l'etere stazionario e della forza di Lorentz, questi derivò le trasformazioni che, in seguito, Poincaré denominò "trasformazioni di Lorentz".¹⁴⁵ Lorentz aveva derivato le stesse equazioni nell'articolo del 1899, ma il nuovo approccio era più sistematico.

Questo modello di elettrone contrattile portava, inoltre, a nuove previsioni sperimentali sulla dipendenza della massa dell'elettrone dalla sua velocità di moto. I valori calcolati da Lorentz per la massa trasversale e longitudinale differivano da quelli previsti da Max Abraham (1875-1922) nella sua teoria dell'elettrone rigido. Tale differenza avrà poi un'importanza notevole nella successiva diffusione della teoria della relatività ristretta che prevedeva gli stessi dati sperimentali.¹⁴⁶

Nonostante la teoria di Lorentz presentasse ancora problemi dal punto di vista della complessità della derivazione dell'invarianza per fenomeni ottici e delle non consistenza rispetto alle forze di coesione che il suo elettrone contrattile richiedeva, Poincaré "*reacted enthusiastically to Lorentz memoir, because he saw in it an opportunity to satisfy the relativity principle in a complete and exact manner*".¹⁴⁷

Poincaré, a partire dalla teoria di Lorentz, riuscì a formulare una teoria che aveva molti punti di contatto con la contemporanea teoria creata da Einstein. Poincaré prese avvio da quello che chiamò il *postulato di relatività*, secondo cui è impossibile osservare sperimentalmente il moto della Terra nell'etere, e corresse le trasformate di Lorentz per le coordinate spazio-temporali che presero la forma (3.14) e per il campo elettromagnetico.

¹⁴⁵ Le trasformazioni di velocità, corrente e carica dedotte da Lorentz nel 1904 differiscono da quelle ora ritenute corrette, ma tutte le altre quantità ausiliare presenti in tale articolo corrispondono alle quantità misurate da un osservatore solidale con il sistema in moto.

¹⁴⁶ I primi esperimenti sulla massa dell'elettrone furono compiuti da Walther A. Kaufmann (1871-1947) nel periodo 1902-1906 con risultati che sembrarono confermare la teoria di Abraham. Esperimenti successivi e considerati più precisi di Alfred H. Bucherer (1863-1927) furono invece ritenuti una prova a sostegno dai valori previsti dalle teorie di Lorentz e Einstein, che erano, dal punto di vista delle previsioni sperimentali, identiche.

¹⁴⁷ Darrigol (2005), *op. cit.*, p. 68.

Tali trasformate lasciavano invariate le equazioni di Maxwell-Lorentz rispetto a qualsiasi sistema di riferimento in moto traslatorio rispetto all'etere. Poincaré riconobbe che tali trasformazioni formavano un gruppo e che le formule (3.14) lasciavano invariata la forma quadratica:

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 \quad (3.16).$$

Poincaré ricavò, inoltre, la formula relativistica della sommatoria delle velocità, la quale implicava che essa rimanesse sempre inferiore a c , qualunque fossero i valori della velocità nella sommatoria.

Riprendendo ancora le espressioni di Darrigol, che ha approfondito l'evoluzione della teoria dell'eminente fisico e matematico francese, possiamo concordare che *“there is little doubt that Poincaré regarded Lorentz invariance as a general requirement for the laws of physics, and that he identified that formal condition with the principle of relativity”*.¹⁴⁸

La teoria così proposta da Poincaré aveva le stesse conseguenze sull'elettrodinamica dei corpi in moto della teoria della relatività ristretta proposta da Einstein lo stesso anno.¹⁴⁹

A differenza di Poincaré, Einstein partì da due assiomi o postulati di valenza generale, senza nessuna interpretazione elettrodinamica:

- le stesse leggi dell'elettrodinamica e dell'ottica saranno valide per tutti i sistemi di coordinate nei quali valgono le equazioni della meccanica (Postulato I);
- la luce nello spazio vuoto si propaghi sempre con una velocità determinata, V , indipendente dallo stato di moto del corpo che la emette (Postulato II).¹⁵⁰

Partendo da questi due postulati Einstein fu in grado di dedurre, in due parti distinte, una nuova cinematica e le formule dell'elettrodinamica.

A parte l'ammirevole semplicità con cui le trasformate di Lorentz vengono dedotte da due principi fondamentali, la memoria di Einstein mostrò solo due aggiunte rispetto alle previsioni sperimentali contenute nei contemporanei articoli di Poincaré. Queste sono costituite dai calcoli delle nuove formule relativistiche dell'aberrazione stellare e dell'effetto Doppler.

¹⁴⁸ Ibid., p. 68.

¹⁴⁹ Per le differenze ed analogie tra le due teorie rimando alla folta bibliografia già citata in nota 14 del Cap. 1.

¹⁵⁰ Einstein (1905), *op. cit.*, p. 134.

Per quello che concerne i temi della presente tesi, più fondamentale risultò essere la frase di Einstein che esplicitò l'inutilità dell'ipotizzare un etere una volta che si fosse accettato il suo quadro teorico, poi denominato teoria della relatività ristretta. Einstein tolse, in questo modo, all'etere anche l'ultima caratteristica lasciatagli dalla Lorentz, ossia quella dell'immobilità. Questa dichiarata messa da parte del concetto di etere divenne uno dei principali temi di critica verso la teoria di Einstein e fu percepita come una differenza profonda rispetto alle teorie di Lorentz e Poincaré.

Un altro tema che ebbe senza dubbio una notevole risonanza nel proseguo della storia sugli esperimenti di *ether-drift* è il ruolo dell'esperimento di Michelson-Morley nel contesto della scoperta della teoria della relatività ristretta da parte di Einstein. Tale esperimento, mentre rivestì un'indubbia valenza nel contesto della giustificazione, in particolare in alcuni ambienti scientifici come quello statunitense, non fu nemmeno nominato nell'articolo di Einstein (1905).

Questo tema è indissolubilmente legato alla conoscenza che egli aveva delle teorie e delle opinioni di Lorentz e Poincaré. L'ipotesi più accreditata è che Einstein non conoscesse i lavori contemporanei dei due scienziati e che, quindi, la sua revisione della teoria di Lorentz si basasse su come essa era espressa nel *Versuch* (1895). Accettando che Einstein stesse ragionando attorno a questa teoria elettromagnetica, all'epoca ampiamente diffusa, e concentrando l'attenzione su quello che egli stesso afferma nell'introduzione, sembrerebbe che la reale spinta alla revisione della teoria di Maxwell-Lorentz fosse la necessità di superare un'asimmetria teorica che non aveva alcun corrispettivo sperimentale. Il noto esempio di Einstein riguardava il fenomeno d'induzione di un magnete e un conduttore in moto relativo. Mentre il fenomeno osservato dipendeva solo dal moto relativo tra di essi, la sua spiegazione assumeva forme teoricamente diverse a secondo di quale corpo si muovesse nell'etere. Tale considerazione di Einstein risiedeva su un credo epistemologico che non aveva collegamenti con gli esperimenti di *ether-drift*.

Einstein, però, immediatamente dopo citava i "tentativi falliti di rivelare un qualche movimento della Terra rispetto al 'mezzo luminifero'".¹⁵¹ Quanto Einstein avesse in mente l'esperimento di Michelson-Morley in questa frase è fonte di dibattito che avrà conseguenze anche nel lavoro di Shankland (vedi Cap. 6), ma lo scienziato, al momento in cui scrisse l'articolo, aveva a sua disposizione un elevato numero di esperimenti con lo stesso risultato

¹⁵¹ Einstein (1905), *op. cit.*, p. 133.

nullo e, soprattutto, pare evidente che la sua formazione lo poneva in contatto con la ricerca tedesca all'interno della “*electromagnetic world-view*” che non basava il proprio programma di ricerca sugli esperimenti di *ether-drift*.

Partendo dalle considerazioni sull'asimmetria della teoria di Maxwell-Lorentz e sugli esperimenti di *ether-drift* con risultato nullo, Einstein dedusse che i fenomeni elettrodinamici come quelli meccanici non possedessero proprietà corrispondenti all'idea di quiete assoluta e da questa caratteristica sperimentale trasse il Postulato I.

Einstein, nell'introduzione, poneva così le basi di un nuovo programma di ricerca che eliminava definitivamente le problematiche concernenti le caratteristiche dell'etere e il rapporto con lo spazio assoluto. Nonostante le sue previsioni fossero identiche a quelle derivabili dalla teoria di Poincaré e Lorentz (1904), le sue prese di posizione furono pregne di conseguenze sul modo in cui il mondo scientifico reagì alla teoria di Einstein.

In tal senso non possiamo che evidenziare una profonda differenza che la società scientifica contemporanea percepì e che pose Einstein nella posizione di essere identificato come il portatore nella nuova visione del mondo. Questa visione del mondo, sebbene avesse preso spunto da discussioni sulla teoria elettromagnetica, implicava che il tempo e lo spazio assoluto non esistevano e che tutti i sistemi di riferimento inerziale avevano lo stesso significato ontologico.

Grazie a questa nuova cinematica, Einstein poté costruire una dinamica, invariante per le trasformazioni di Lorentz, che coincideva con la dinamica newtoniana per velocità molto inferiori alla velocità della luce e, soprattutto, poté iniziare a costruire una generalizzazione a tutti i sistemi di riferimento che da lì a pochi anni avrebbe portato alla formulazione della teoria della relatività generale nel novembre 1915.

Prima di passare al breve resoconto della storia dell'evoluzione delle teorie di Einstein fino all'annuncio di Eddington che le osservazioni delle deflessioni dei raggi di luce confermavano le previsioni della teoria della relatività generale, vorrei soffermarmi sull'analisi dell'origine della relatività compiuta dallo storico Loyd Swenson.¹⁵²

Non ho inserito questo trattato nella bibliografia delle origini della relatività e dedico ad esso uno spazio dilungato perché l'autore ha fornito altrove la più approfondita e conosciuta indagine storica sugli esperimenti chiamati di Michelson-Morley-Miller dal 1880 al 1930.¹⁵³

¹⁵² Swenson Jr., L. S. (1979) *Genesis of Relativity* (New York: Burt Franklin and Co., 1979).

¹⁵³ Swenson. (1972), *op. cit.*

Poiché il mio studio degli esperimenti di Miller s'inserisce sul lavoro storiografico di Swenson per trarre conclusioni, a volte, estremamente diverse, mi è sembrato opportuno verificare in che visione generale lo storico statunitense avesse inserito i suoi resoconti storici. Per fare ciò ho confrontato i passaggi e la struttura della sua storia con quella narrata nei precedenti paragrafi.

Il resoconto delle origini della relatività compiuto da Swenson parte dal lavoro che aveva costituito la premessa storica della sua ricerca di dottorato sugli esperimenti di *ether-drift* poi culminati nella pubblicazione dell'influente libro del 1972. L'attenzione e la conoscenza di Swenson di tali esperimenti lo porta ad enfatizzare il loro ruolo all'interno dello sviluppo delle teorie di Lorentz e Poincaré. Tale enfattizzazione è accompagnata da parallele affermazioni che l'esperimento di Michelson-Morley del 1887 non fu così preciso e definitivo come venne percepito dai fisici teorici europei dell'epoca.

Swenson aggiunge che furono l'autorevolezza e la fama di Michelson e Morley come attenti e precisi osservatori, ottenuta grazie ad altri esperimenti, ad impedire una critica più sostanziosa alle loro conclusioni. In altre parole, Swenson sembra, come già sottolineato altrove, far proprie le affermazioni di Miller che l'esperimento di Michelson-Morley non fu completato e che lo sviluppo della teoria della relatività ristretta dipese da un risultato dubbio.

Pur concordando sull'importanza dell'autorevolezza degli scienziati nell'accettazione di alcuni risultati sperimentali nel processo storico della fisica, mi preme qui sottolineare che l'importanza attribuita da Swenson al risultato di tale esperimento e alla mancanza della conoscenza del moto assoluto della Terra (si consideri qui assoluto il moto della Terra rispetto ad un etere stazionario) non concorda con le moderne rivisitazioni storiche delle origini della teoria della relatività ristretta che ho riassunto nei paragrafi precedenti.

Lo storico, inoltre, sottolinea in maniera colorita che Einstein non fece che mettere insieme idee, proposte, teorie, visioni epistemologiche, che si stavano diffondendo in Europa alla fine del XIX secolo. Pur ritenendo tutto ciò non errato, mi sembra che la modalità applicata da Swenson nel privare l'opera di Einstein di qualsiasi originalità evidenzi una mal celata avversione verso il noto scienziato. Questa considerazione non è secondaria perché tale posizione personale ha probabilmente influito su alcune interpretazioni storiografiche attinenti al caso Miller, rendendo, così, ancora più necessaria la revisione storica compiuta in questa sede.

3.15. La teoria della relatività generale (1915) e la conferma di Eddington della deflessione dei raggi di luce (1919)

Il percorso teorico che ha portato Einstein alla formulazione della teoria della relatività generale, resa pubblica nella sua forma definitiva il 25 novembre del 1915, a partire dal principio di equivalenza tra massa inerziale e gravitazione, espresso già nel 1907, esula dagli interessi di questa tesi.¹⁵⁴

D'indubbia attinenza sono, invece, le previsioni sperimentali della teoria che Einstein stava sviluppando e il rapporto con numerose osservazioni astronomiche che furono ritenute concordi a tale teoria. Nel compiere il lungo percorso che lo porterà alla formulazione definitiva della teoria della relatività generale, Einstein si confrontò con le possibili verifiche sperimentali derivabili dall'evoluzione della nuova teoria.

Già nella rassegna del 1907, Einstein prevede che la dipendenza del tempo dal campo gravitazionale dovesse portare allo spostamento verso il rosso delle righe spettrali provenienti dal Sole, dato che il campo gravitazionale generale da questo è molto più intenso del campo terrestre. Questo fenomeno è quello che viene ora denominato *red-shift*. Nel 1907 Einstein ipotizzò anche la deflessione dei raggi di luce in un campo gravitazionale e la possibilità di spiegare la variazione del perielio di Mercurio, la quale non aveva trovato, all'interno del quadro teorico newtoniano, una spiegazione convincente.

Per un primo calcolo di queste possibili verifiche sperimentali bisognerà attendere il 1911, quando Einstein ritornò sulla questione di un avanzamento della teoria della relatività ristretta che rendesse conto del principio di equivalenza.¹⁵⁵ Nell'articolo del 1911, Einstein affermò che la deflessione dei raggi di luce intorno al Sole potesse essere rivelata sperimentalmente secondo la formula:

¹⁵⁴ Einstein aveva, per la prima volta enunciato tale principio nell'articolo di rassegna Einstein, A. (1907) "Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen", *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 4 (1907): 411-62. Versione utilizzata: trad. inglese "On the Relativity Principle and the Conclusions Drawn from it", in Stachel, J., Cassidy, D. C., Renn, J. e Shulmann, R., (eds.) (1989) *The Collected Papers of Albert Einstein: Vol. 2, The Swiss Years: Writings, 1900-1909, English Translation* (Princeton: Princeton University Press, 1989): 252-311. Einstein riportò la struttura conclusiva della teoria della relatività generale il 25 novembre 1915 all'*Accademia Prussiana delle Scienze (Preußische Akademie der Wissenschaften)* a Berlino. La prima esposizione di tale teoria fu pubblicata nel marzo dell'anno successivo in Einstein, A. (1916) "Die Grundlagen des allgemeinen Relativitätstheorie", *Annalen der Physik*, 49 (1916): 769-822. Per uno studio approfondito e una bibliografia completa vedere Renn, J. (ed.) (2007) *The Genesis of General Relativity*, 4 vols. (Dordrecht: Springer, 2007).

¹⁵⁵ Einstein, A. (1911) "Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes", *Annalen der Physik*, 35 (1911): 898-908, versione utilizzata Einstein, A. "The influence of the force of gravity on the dispersion of light", in Klein, M. J., Kox, A. J., Renn, J. e Shulmann, R., (eds.) (1989) *The Collected Papers of Albert Einstein: Vol. 3, The Swiss Years: Writings, 1909-1911, English Translation* (Princeton: Princeton University Press, 1993): 379-87.

$$\alpha = \frac{2GM}{\Delta c^2} \quad (3.17);$$

dove G è la costante gravitazionale, M la massa sorgente del campo gravitazionale, Δ la distanza di massimo avvicinamento e c la velocità della luce nel vuoto.

Nel caso del Sole, Einstein calcolò un che raggio passante radente al Sole avrebbe dovuto subire una deflessione di $\alpha = 0,83''$. Tale valore verrà poi raddoppiato nella teoria della relatività generale nella sua forma conclusiva, ma il calcolo del 1911 e le esplicite richieste di Einstein agli astronomi di considerare tale osservazione resero possibile il fatto che la teoria entrasse a far parte dei programmi di ricerca osservativi ancor prima che questa raggiungesse la sua formulazione definitiva. L'articolo del 1911 ribadì, inoltre, il calcolo approssimato per lo spostamento verso il rosso delle misurazioni terrestri delle righe spettrali del Sole già espresso nel 1907.

Le predizioni di Einstein raccolsero l'attenzione del giovane astronomo tedesco Erwin Finlay Freundlich (1885-1964) già nel 1911. In quel periodo la previsione dei raggi di luce sembrava, anche a detta dello stesso Einstein, quella più verificabile, grazie agli sviluppi delle tecniche fotografiche delle eclissi di Sole. Dopo aver tentato, senza successo, di ottenere dei risultati con lo studio di vecchie foto di eclissi solari, Freundlich intraprese l'organizzazione per l'osservazione dell'eclissi solare totale che sarebbe potuta essere visibile il 21 agosto 1914 in Russia.

William Wallace Campbell (1862-1938) allora direttore del *Lick Observatory* in California, organizzò anch'egli una spedizione per testare le previsioni di Einstein insieme con il gruppo diretto da Freundlich. Le due spedizioni scelsero una località vicino Kiev per le osservazioni e si trovavano in quella città nel momento in cui scoppiò la Prima Guerra Mondiale. Freundlich fu arrestato dalle autorità russe. La spedizione statunitense, invece, fu lasciata libera di compiere le osservazioni, ma le cattive condizioni meteorologiche non resero possibile foto nitide del Sole durante l'eclissi.

Alla fine del 1915, Einstein riuscì a rendere conto, grazie alla sua conclusa teoria della relatività generale, delle variazioni del perielio di Mercurio e trovò la formula definitiva della deflessione dei raggi di luce che, intorno al Sole, avrebbero dovuto essere di $1,74''$.

Le devastazioni della Guerra e l'impegno bellico degli scienziati impedì altre osservazioni Europee delle previsioni della teoria della relatività generale, mentre Campbell poté raccogliere delle foto utili durante l'eclissi del luglio 1918. Il gruppo diretto da Campbell

non riuscì, però, ad analizzare le foto fino all'anno successivo a causa del trasferimento temporaneo di Heber Doust Curtis (1872-1942) dovuto ad impegni bellici.

Mentre Curtis e Campbell stavano cercando di superare delle problematiche organizzative e tecniche per poter arrivare ad una conclusione definitiva rispetto alle osservazioni del 1918, due spedizioni inglesi compirono le osservazioni dell'eclissi solare del maggio 1919 nell'isola di Principe nel Golfo di Guinea e nel comune di Sobral in Brasile.

I dati delle spedizioni britanniche non erano ancora stati analizzati quando, nel luglio 1919, si tenne il meeting della *Royal Astronomical Society* in Londra, dove Campbell espresse la convinzione che i dati ricavati dalle osservazioni dell'anno precedente erano sfavorevoli alle predizioni di Einstein, anche se il margine d'errore non consentiva risposte conclusive. La larghezza dell'errore probabile non permise al gruppo del *Lick Observatory* di essere sicuri delle conclusioni ottenute, mentre Eddington stava proseguendo con le riduzioni dei dati, convinto fin dall'inizio che questi avrebbero dimostrato la deflessione dei raggi luminosi prevista da Einstein.

Eddington e i suoi colleghi presentarono i loro risultati conclusivi al meeting congiunto della *Royal Society* e della *Royal Astronomical Society* il 6 novembre 1919. Le conclusioni espresse da Eddington e pubblicate l'anno successivo erano in accordo completo con le previsioni di Einstein di una deflessione dei raggi di luce di 1,74" nei dintorni del Sole.¹⁵⁶

L'annuncio della spedizione britannica creò una profonda impressione presso il mondo scientifico e culturale dell'epoca. Tale reazione era dovuta anche all'autorevolezza degli astronomi britannici presso la comunità scientifica internazionale. Anche se Eddington si mostrò favorevole alla teoria della relatività ancor prima delle osservazioni, l'Astronomo Reale e direttore del *Royal Greenwich Observatory*, Frank Watson Dyson (1868-1939), sembrava molto più scettico verso la nuova teoria e fu convinto dall'analisi dei dati dell'esistenza della deflessione dei raggi luminosi.

Dopo gli annunci di Eddington, la stampa internazionale pose la teoria di Einstein al centro di un interesse che creò un'atmosfera chiamata da Crelinsten, "*delirious fascination*".¹⁵⁷

¹⁵⁶ Eddington, A. S., Dyson, F. W., e Davidson, C. (1920) "A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations made at the Total Eclipse of May 29, 1919", *Philosophical Transactions of Royal Society of London Series A*, 220 (1920): 291-333.

¹⁵⁷ Crelinsten, J. (2006) *Einstein's Jury: The Race to Test Relativity* (Princeton and Oxford: Princeton University Press, 2006), p. 146. La maggior parte delle informazioni contenute in questo paragrafo sono tratte dai Cap. V e VI di tale studio dei lavori sperimentali sulla teoria della relatività generale negli USA fino agli anni '30.

La fama che circondò il nome di Einstein e la sue teorie fu un elemento essenziale nella ricezione della relatività nelle diverse comunità scientifiche nazionali. La reazione fu duplice: da un lato i direttori di vari osservatori inserirono la verifica delle due predizioni della teoria della relatività generale all'interno dei programmi di ricerca per testare le conclusioni espresse da Eddington, dall'altro la campagna stampa rese il pubblico internazionale a conoscenza della rivoluzione scientifica in atto, senza che questo potesse avere gli strumenti per comprendere le basi della nuova teoria.

L'esplosione dell'interesse dei circoli culturali verso le teorie di Einstein, le quali vennero percepite come un cambio di visione del mondo rispetto alla teoria di Newton, generò immediatamente due fazioni scientifiche che potremmo chiamare rivoluzionarie e conservatrici. La personalizzazione della teoria della relatività generale con il suo creatore, così come trasmessa dagli articoli dei giornali, produsse, inoltre, un fenomeno di reazione indirizzato alle caratteristiche personali di Einstein, non ultimo il suo essere ebreo.

Non è difficile distinguere nelle reazioni agli annunci di Eddington una perdita di razionalità da parte di alcuni elementi della comunità scientifica per avviarsi verso una sorta di divisione in cui giocarono fattori non puramente scientifici, e una parte di questa divisione derivò dall'enorme diffusione che Einstein e la sua teoria ebbero nel giro di pochi mesi, tanto che Pais intitola il Cap. 16 della sua biografia di Einstein "l'improvvisamente famoso dottor Einstein".¹⁵⁸

La campagna stampa che fece diventare Einstein lo scienziato più noto di tutti i tempi e il creatore di una nuova visione del mondo arrivò in un periodo di ricostruzione appena successivo alla fine della Prima Guerra Mondiale. Non sfuggì agli scienziati stessi la valenza riappacificatrice del fatto che astronomi inglesi avessero confermato una teoria prodotta a Berlino, per di più durante la guerra.¹⁵⁹

Einstein era ebreo tedesco di nascita, ma aveva rinunciato alla cittadinanza tedesca nel 1896. Il fatto che avesse scelto come sede del suo lavoro Berlino fin dall'aprile 1914 e durante tutto il periodo della guerra, faceva, comunque, di lui un esponente della comunità

¹⁵⁸ Pais, A. (1982) *'Subtle is the Lord...': The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 1982). Versione utilizzata: trad. italiana in Pais, A. *Sottile è il Signore: La Scienza e la Vita di Albert Einstein* (Torino: Bollati Boringhieri editore, 1991), pp. 319-44.

¹⁵⁹ In questo senso è emblematica la corrispondenza tra Einstein ed Eddington. L'astronomo britannico scrive ad Einstein che il risultato a favore della teoria generale delle proprie osservazioni "[...] is the best thing that could have happened for scientific relations between England and Germany". Eddington a Einstein, 1 dicembre 1919, cit. in Crellin (2006), *op. cit.*, p. 146.

scientifica tedesca. Einstein era, però, noto per le sue posizioni pacifiste. Egli fu, infatti, uno dei pochi scienziati residenti in Germania a firmare un “appello agli europei” in cui criticava gli scienziati per aver rinunciato alle relazioni internazionali.¹⁶⁰

Tutti questi temi, non prettamente scientifici, avranno poi delle ripercussioni sulla storia dell'accettazione della relatività, anche perché Einstein sembrò accettare consapevolmente il ruolo di portavoce della ricostruzione di una comunità scientifica internazionale distrutta dall'impiego degli scienziati durante la devastante guerra appena conclusasi.

Già dalla fine del 1919, quindi, Einstein e le teorie a lui attribuite iniziarono ad essere al centro di molti dibattiti fisici e culturali in cui rientrarono anche gli esperimenti di *ether-drift* e la loro interpretazione. Tali lavori risentirono del clima generale in cui venivano inseriti. In tale clima generale la relatività veniva percepita come un terremoto scientifico che minava le basi della meccanica newtoniana e il personaggio Einstein aveva raggiunto una fama mondiale in pochissimo tempo, prima che la comunità degli astronomi avesse potuto verificare le conclusioni di Eddington con altre osservazioni.

¹⁶⁰ Per un approfondimento del ruolo avuto da Einstein nel movimento pacifista internazionale vedere: Nathan, O., e Norden, H. (1968) *Einstein on Peace* (New York: Schocken, 1968).

3.16. Conclusioni

Le osservazioni legate all'ottica dei corpi in moto e lo sviluppo della teoria elettromagnetica dei fenomeni ottici avevano portato a trasformazioni radicali del concetto di etere, le quali si conclusero con la formulazione della teoria della relatività ristretta di Einstein nel 1905, dove l'etere venne esplicitamente dichiarato superfluo.

La teoria della relatività ristretta di Einstein nacque in un clima favorevole alla nascita di una nuova dinamica, prevista dalle teoria di Lorentz e dalle critiche ad essa di Poincaré. Molti scienziati stavano proponendo teorie elettrodinamiche che riuscissero a rendere conto dei fenomeni elettromagnetici ed ottici e il programma di riduzione delle teorie fisiche alle leggi della meccanica non era riuscito a formulare una spiegazione soddisfacente del comportamento dell'etere.

Alla fine del XIX secolo, tale etere aveva moltissime raffigurazioni, quasi quante erano le teorie che ad esso facevano riferimento, ma l'impossibilità di verificare il moto della Terra rispetto ad esso aveva portato qualche scienziato, in particolare Poincaré, a pensare che tale impossibilità avesse caratteristiche generali di cui il quadro teorico doveva rendere conto.

Tra tali esperimenti ebbero un'influenza decisiva sia l'esperimento di Fizeau del 1851, poi verificato con maggior precisione da Michelson e Morley nel 1886, sia l'esperimento di Michelson, soprattutto nella sua ripetizione del 1887 da parte degli stessi Michelson e Morley. I lavori sull'*ether-drift* dei due scienziati ribadirono l'impossibilità di formulare un modello di etere ottico che fosse in accordo con tutti i dati sperimentali.

Partendo da queste considerazioni, Lorentz sviluppò la sua teoria dell'etere e dell'elettrone deformabile che, però, incontrava alcune problematiche di carattere teorico, che furono superate dai lavori di Poincaré (1905-06) e, soprattutto, di Einstein (1905), i quali partirono dalle problematiche epistemologiche dell'opera di Lorentz.

Le teorie di Lorentz (nella sua formulazione conclusiva), Poincaré ed Einstein non mostravano differenze dal punto di vista sperimentale e, nonostante diversità sostanziali nelle considerazioni sul significato fisico di determinati enti, vennero spesso percepite come una stessa teoria elettrodinamica. Solo dopo che Einstein ebbe iniziato a sviluppare la generalizzazione alla gravitazione grazie al principio di equivalenza, la teoria di Einstein iniziò a prendere una sua forma autonoma. Tale differenziazione trovò una conclusione nel 1915 con la formulazione conclusiva della teoria della relatività generale.

Einstein divenne, così, noto presso gli ambienti scientifici come il creatore di una nuova dinamica la cui prima versione (del 1905) aveva importanti riscontri sperimentali. La teoria della relatività generale prevede, anch'essa, la possibilità di verifiche sperimentali già dal 1907, ancor prima che questa fosse completa. Solo nel 1919, dopo che Eddington ebbe annunciato la verifica di una delle due predizioni della teoria della relatività generale, tale teoria fu percepita come una rivoluzione scientifica. L'impatto mediatico dell'annuncio di Eddington non ha precedenti nella storia della Fisica, e l'improvvisa notorietà colse la teoria come il suo autore che furono identificati l'uno con l'altra.

La Prima Guerra Mondiale aveva, inoltre, rafforzato le comunità scientifiche nazionali a discapito delle relazioni internazionali. Tale situazione pose il personaggio Einstein nella condizione di essere un tramite alla ricostruzione della comunità scientifica internazionale, anche grazie alla sua propensione pacifista manifestata anche durante gli anni di guerra.

Questo era il contesto generale in cui vennero eseguiti o tornarono alla ribalta esperimenti sull'*ether-drift* come reazione alle conclusioni di Eddington favorevoli alla teoria della relatività generale, che sembrava essere diventata la teoria dominante ancor prima di una chiara ed accettata conferma sperimentale.

Capitolo 4

L'effetto Sagnac: i predecessori, la scoperta e la relazione con la teoria della relatività nella Francia degli anni '20.

4.1. Introduzione

L'effetto Sagnac prende il nome dal fisico francese Georges Mark Mery Sagnac che ne rese pubblica la scoperta nel 1913.¹ Si tratta di un effetto d'interferenza al primo ordine in $\omega r/c$, che il fisico francese scoprì grazie ad un interferometro in rotazione da lui ideato. Muovendosi all'interno dell'ottocentesco programma di ricerca volto a scoprire le proprietà di un supposto etere luminifero, Sagnac interpretò il risultato dell'esperimento come prova dell'esistenza dell'etere e della sua immobilità. Secondo il fisico sovietico Sergey Ivanovich Vavilov (1891-1951), *“if the Sagnac phenomenon had been revealed earlier than the first results of the second order experiments were obtained, it would certainly have been considered a brilliant proof of the existence of the ether”*.²

Alcuni fisici, anche contemporanei, considerano il fenomeno un'anomalia per i principi della relatività ristretta e chiedono una migliore e meno contraddittoria spiegazione del fenomeno.³

L'effetto Sagnac ha, però, trovato un posto naturale all'interno del programma di ricerca relativista sullo studio dei sistemi in rotazione già intorno al 1910. All'interno di questo programma non ha mai costituito anomalia nonostante una non univocità d'interpretazione,

¹ Sagnac, G. (1913a.) “L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme”, *Comptes Rendus*, 157 (1913): 708-10; Sagnac, G. (1913b) “Sur la preuve de la réalité de l'éther lumineux par l'expérience de l'interférographe tournant”, *Comptes Rendus*, 157 (1913): 1410-13; e Sagnac, G. (1914) “Effet tourbillonnaire Optique. La Circulation de l'éther lumineux dans un interférographe tournant”, *Journal de Physique*, 4 (1914): 177-95.

² Vavilov, S. I., *Eksperimental'nye Osnovaniya Teorii Otnositel'nosti* 4 (Moscow: Izdat. Akad. Nauk SSSR, 1956), p. 9, citato in Malykin, G. B. (1997) “Earlier studies of the Sagnac effect”, *Physics-Uspeski*, 40 (1997): 317-21, p. 318.

³ Per citare solo alcuni casi: Selleri, F. (2003) “Sagnac effect: end of the mystery”, in *Relativity in Rotating Frames*, a cura di Rizzi, G. e Ruggiero, M. C. (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003): 57-77; Vigier, J. P. (1997) “New non-zero photon mass interpretation of the Sagnac Effect as direct experimental justification of the Langevin paradox”, *Physics Letters A*, 234 (1997): 75-85; Klauber, R. D. (2002) “Anomalies in Relativistic Rotation”, *Journal of Scientific Exploration*, 16 (2002): 603-20; e Marinov, S. (1978) “Rotating Disk Experiments”, *Foundations of Physics*, 8 (1978): 137-56.

infatti molte derivazioni dell'effetto sono state compiute all'interno della teoria della relatività sia generale che ristretta.⁴

La letteratura scientifica sull'effetto è molto vasta sia in ambito teorico (per la complessità interpretativa relativista dei sistemi in rotazione), sia in ambito sperimentale (all'esperimento di Sagnac ne sono seguiti molti altri tra cui alcuni che ne hanno confermato l'esistenza anche per onde di de Broglie), sia in ambito applicativo (dagli anni '70 l'effetto è comunemente utilizzato nella navigazione aerospaziale ed è ora impiegato nella sincronizzazione temporale del GPS).⁵

Le ricerche teoriche, sperimentali e applicative sull'effetto hanno fatto sì che molti fisici s'interessassero ad alcuni elementi storici legati alla sua scoperta e al suo utilizzo, ma non è stato prodotto alcuno studio sull'accoglienza e le prime interpretazioni dell'effetto Sagnac (vedi Cap. 2). Lo scopo di questo capitolo è colmare tale lacuna soffermandosi sulla storia delle interpretazioni dell'esperimento di Sagnac nel periodo della sua scoperta fino agli anni '20, quando le osservazioni di Eddington hanno portato le interpretazioni dell'effetto Sagnac all'interno del contesto della ricezione delle teorie della relatività.

La storia dell'interpretazione dell'effetto deve innanzitutto tener conto delle differenti comunità nazionali. In Germania l'effetto entra immediatamente e senza dibattito all'interno del programma di ricerca relativista sui sistemi in rotazione uniforme, tanto da essere stato derivato teoricamente ancor prima della sua scoperta da Theodor Franz Eduard Kaluza (1885-1954) nel 1910 e Max von Laue (1879-1960) nel 1911.⁶

⁴ Per accurate analisi di tutti gli studi teorici dell'effetto Sagnac vedere Malykin, G. B. (2000) "The Sagnac Effect: correct and incorrect explanations", *Physics-USpekhi*, 170 (2000): 1229-52; per un'analisi di tali derivazioni fino al 1980 con un'attenzione verso la cronologia delle derivazioni vedere Martinez-Chavanz, R. (1980) "L'Expérience de Sagnac et le Disque Tournant" (Ph.D. thesis, Université de Paris VI, 1980).

⁵ Per un esperimento recente sull'effetto Sagnac per le onde di De Broglie legate agli elettroni e per un riassunto delle esperienze sull'effetto Sagnac per le onde di materia vedere Hasselbach, F., e Nicklaus, M. (1993) "Sagnac experiment with electrons: Observation of the rotational phase shift of electron waves in vacuum", *Physical Review A*, 48 (1993): 143-50; per la storia della sue applicazioni nella navigazione aerea vedere l'accurato studio storico MacKenzie, D. (1993) "From the Luminiferous Ether to the Boeing 757: A History of the laser Gyroscope", *Technology and Culture*, 34 (1993): 475-515; per una discussione dell'utilizzo dell'effetto Sagnac nel GPS vedere Ashby, N. (2002) "Relativity and Global Positioning System", *Physics Today*, (Mag. 2002): 41-7.

⁶ La derivazione di Kaluza si trova in Kaluza, T. (1910) "Zur Relativitätstheorie", *Physikalische Zeitschrift*, 11 (1910): 977-78; quella di Von Laue in Von Laue, M. (1911) "Über einen Versuch zur Optik der bewegten Körper", *Sitzungsberichte der mathematisch-physikalischen Klasse der K. B. Akademie der Wissenschaften* (1911): 405-12. Il primo ad aver rilevato l'esistenza della derivazione di Kaluza è stato Walter Scott nel 1996 in Scott, W. (1996) "Hermann Minkowski et la Mathématisation de la Théorie de la Relativité Restreinte 1905-1915" (Ph.D. thesis, Paris, 1996), pp. 67-76.

In Francia, invece, ha costituito fonte di dibattito come effetto in grado di mettere in crisi le teorie di Einstein nel breve periodo che va dalla fine della prima guerra mondiale alla metà degli anni '20.⁷ In particolare, in questo capitolo si metteranno a fuoco:

- le motivazioni di Sagnac nel compiere l'esperimento, in relazione con le motivazioni dei predecessori;
- il rapporto di Sagnac con la comunità accademica francese;
- l'accoglienza dell'effetto da parte della comunità scientifica francese e le sue prime interpretazioni fino all'accettazione della derivazione relativistico-generale, compiuta da Paul Langevin nel 1921.

Accennerò poi brevemente agli atteggiamenti scientifici nazionali verso le teorie della relatività e le teorie di Sagnac fino al 1933, anno della presa di potere di Hitler in Germania, come una sorta di epilogo agli argomenti qui approfonditi.

Nella storia del dibattito francese sull'effetto Sagnac giocarono un ruolo decisivo diversi fattori: la scarsa conoscenza e comprensione della relatività, e tematiche extra-scientifiche quali il nazionalismo e, in misura minore, un certo antisemitismo che serpeggiava anche all'interno dell'*Académie des Sciences (AdS)* nei confronti di Albert Einstein.

⁷ Il dibattito sull'effetto in Francia rinacque alla metà degli anni '30 per opera di Alexandre Dufour e Fernand Prunier i quali compirono altri esperimenti sui circuiti in rotazione e portarono avanti un dibattito con il teorico relativista Paul Langevin per circa una decina d'anni. Il lavoro sperimentale di Dufour e Prunier sui sistemi ottici in rotazione è raccolto in Dufour, A., e Prunier, F. (1952) "Sur un déplacement de franges enregistré sur une plate-forme en rotation uniforme", *Le Journal de Physique et le Radium*, 3 (1952): 153-61.

4.2. L'esperienza di Sagnac del 1913

Nel 1913, Sagnac compì l'esperienza sull'interferenza di due raggi di luce percorrenti uno stesso tragitto chiuso su una piattaforma in rotazione uniforme.

In fig. 4.1 è riprodotto il disegno di Sagnac dell'interferometro da lui costruito.

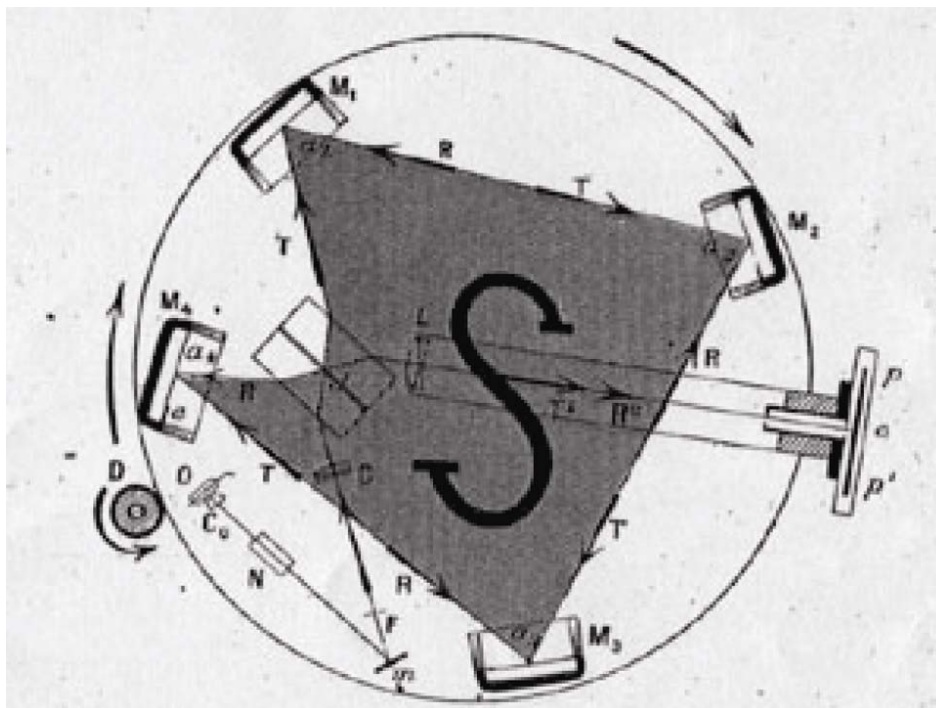


Figura 4.1. Disegno in pianta dell'interferometro costruito ed utilizzato da Sagnac per la scoperta dell'effetto tratta da Sagnac (1913b), *op. cit.*, p. 1412. Riprodotta per concessione dell'AdS di Parigi.

L'apparato era lo sviluppo di un interferometro non rotante, costruito ed utilizzato dal fisico già nel 1910. La sorgente luminosa O è una piccola lampada elettrica a filamento metallico orizzontale. L'obiettivo del microscopio proietta l'immagine di questo filamento sulla fenditura orizzontale F nel piano focale dell'obiettivo collimatore C. Il fascio di luce si divide in J, lamina d'aria posta tra i lati paralleli di due prismi di vetro uguali, nel raggio trasmesso T e nel raggio riflesso R. In seguito, T e R compiono in senso inverso lo stesso percorso chiuso di area S, riflettendo sui 4 specchi M1, M2, M3 e M4. Il raggio T, trasmesso nuovamente da J (T^2 in fig. 4.1), e il raggio R, riflesso nuovamente da J (R^2 in fig. 4.1), interferiscono nel fuoco principale della lente L, formando una figura d'interferenza.

La placca fotografica a grana fine pp' , sulla quale si fanno le foto delle figure d'interferenza delle rotazioni destrorsa e sinistrorsa, è anch'essa rigidamente legata al piatto in rotazione.⁸ Completa l'apparato del 1913 un motore elettrico al cui asse verticale è legato un piccolo disco orizzontale D grazie al quale si muove per contatto tutto l'interferometro: lo strumento è costruito in modo tale che la sorgente luminosa, il circuito ottico e il recettore ruotino contemporaneamente.

Sagnac chiamò d e s le fotografie ottenute rispettivamente con una rotazione destrorsa e con una sinistrorsa aventi identiche velocità angolari. Confrontando d e s , il fisico francese verificò, in maniera conforme alle sue previsioni teoriche, uno spostamento del centro della frangia centrale misurabile in frazioni d'interfrangia. Tale spostamento è il doppio di quello ora chiamato comunemente effetto Sagnac, dipendente dalla rotazione dell'apparato in un solo verso. La prima comunicazione dell'effetto Sagnac la fece nel 1910 dandogli il nome di "effetto vorticoso ottico".⁹

Sagnac, partendo dall'assunto che la luce fosse costituita da vibrazioni di un etere luminifero stazionario, prevede che, in un interferografo rotante, i due raggi di luce contro-rotanti T e R avrebbero dovuto interagire col vento d'etere. Nel caso di una rotazione uniforme destrorsa, un vento d'etere antiorario ritarderà di x la fase di T e avanzerà dello stesso valore la fase di R, producendo una differenza di fase di $2x$, visibile nella foto come spostamento della frangia centrale: il valore di $2x$ è l'attuale effetto Sagnac. Una rotazione sinistrorsa dell'interferografo, invece, produrrà un vento d'etere destrorso che ritarderà le onde R dello stesso valore x e avanzerà la fase delle onde T, sempre di x .

Gli spostamenti delle frange dovuti a queste differenze di fase saranno, in questo caso, di direzione opposta all'esperimento precedente e avranno lo stesso valore assoluto $2x$ se si mantiene invariata la velocità angolare. In questo modo, confrontando le due pose d e s , Sagnac si aspettava una differenza di fase totale di:

$$2z = 4x = \frac{16\pi NS}{\lambda V_0} \quad (4.1);$$

⁸ Il nome interferografo si deve al fatto che per osservare l'effetto, si usano immagini fotografiche impresse in una lastra a grana fine posta nel fuoco della lente L. Sagnac risolve così il problema di trovare un osservatore solidale con il circuito in rotazione: l'osservatore è la lastra fotografica.

⁹ Sagnac dà questo nome la prima volta in una memoria riportata al *Congrès de Bruxelles* del 1910. Vedere Post, E. J. (1967) "Sagnac Effect", *Reviews of Modern Physics*, 39 (1967): 475-93.

dove V_0 indica la velocità della luce considerata costante nell'etere, λ la lunghezza d'onda utilizzata, N il numero di giri per secondo e S l'area racchiusa dal percorso ottico.

Nella dimostrazione matematica, il fisico francese parte dall'idea che le onde viaggino nell'etere a velocità costante V_0 e considera il caso della rotazione oraria del disco.¹⁰ Rispetto ad una qualunque parte del circuito ottico, il raggio T, anch'esso viaggiante in senso orario, avrà una velocità $(V_0 - u)$, dove u è la proiezione della velocità lineare del disco su quella parte del circuito.

Sagnac calcola che il tempo impiegato dal raggio T per percorrere un segmento Δl sarà differente dal tempo impiegato nel caso di disco immobile nell'etere. Tale differenza è:

$$\Delta t_T = \frac{\Delta l}{(V_0 - u)} - \frac{\Delta l}{V_0} = \frac{u\Delta l}{V_0^2 \left(1 - \frac{u}{V_0}\right)} = \frac{u\Delta l}{V_0^2} - ku^2 + \dots \quad (4.2).$$

Nell'ultimo passaggio di (4.2), Sagnac ha sviluppato la serie binomiale con $k = \Delta l/V_0^3$.

Per il raggio R, nella stessa rotazione oraria del disco, Sagnac considera la velocità della luce rispetto allo stesso segmento Δl aumentata in $(V_0 + u)$ e calcola la differenza dei tempi di percorso rispetto all'apparato immobile:

$$\Delta t_R = \frac{\Delta l}{(V_0 + u)} - \frac{\Delta l}{V_0} = \frac{-u\Delta l}{V_0^2 \left(1 + \frac{u}{V_0}\right)} = -\frac{u\Delta l}{V_0^2} + ku^2 - \dots \quad (4.3).$$

Nel segmento di percorso ottico considerato, il raggio T sarà, perciò, in ritardo rispetto al raggio R della quantità:

$$\Delta t = 2 \frac{u\Delta l}{V_0^2} \quad (4.4);$$

dove si sono ignorati solo i termini superiori e uguali a u^3/V_0^3 .

Calcolando il ritardo totale tra i due raggi lungo tutto il percorso, Sagnac trova:

$$\Delta T = \frac{8\pi NS}{V_0^2} \quad (4.5);$$

dove i significati dei simboli matematici in (4.5) sono identici a quelli della formula (4.1).

In differenza di fase, la formula (4.5) diventa:

$$z = 2x = \frac{8\pi NS}{\lambda V_0} = 4 \frac{\omega S}{\lambda V_0} \quad (4.6);$$

¹⁰ Sagnac pubblica la dimostrazione matematica di della formula (4.1) non nei due articoli in cui annuncia la scoperta, ma l'anno successivo in Sagnac (1914), *op. cit.*

dove i simboli sono ancora gli stessi della formula (4.1) e nell'ultima trasformazione si considera la velocità angolare ω rad/s al posto di N giri al secondo della notazione di Sagnac. La (4.6) è esattamente la metà della formula (4.1) che Sagnac considera con il raffronto degli effetti di due rotazioni opposte e che verifica nel 1913.

La (4.6) rappresenta l'effetto vorticoso ottico rispetto al disco stazionario e in notazione vettoriale moderna è scritto:

$$\Delta Z = \frac{4\Omega \cdot \mathbf{A}}{\lambda_0 c} \quad (4.7);$$

dove ΔZ è lo spostamento di frangia rispetto al disco stazionario, Ω è il vettore velocità di rotazione del disco in rad/s, \mathbf{A} è il vettore area racchiusa dal percorso ottico, λ_0 è la lunghezza d'onda nel vuoto della luce utilizzata, e c è la velocità della luce nel vuoto.¹¹ Il prodotto scalare $\Omega \cdot \mathbf{A}$ indica che ΔZ è proporzionale al coseno dell'angolo tra l'asse di rotazione e la normale al circuito ottico.

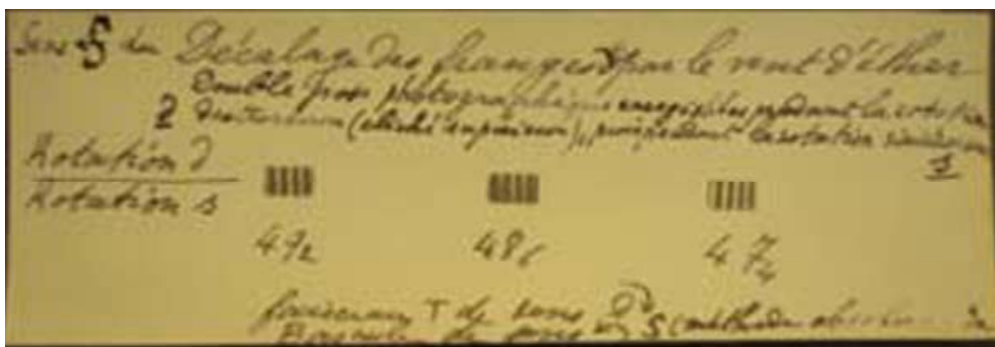


Figura 4.2. Foto con alcune pose dell'interferometro in cui sono evidenti gli spostamenti di frangia della parte superiore della foto rispetto a quella anteriore, trovata nel *Fond Sagnac, dossier AB/XIX/3534* negli *Archives Nationales* di Parigi (nel seguito *SANP*).¹²

Il nome effetto Sagnac, adoperato oggi dalla comunità scientifica internazionale per la formula (4.7), fu utilizzato comunemente solo a partire dagli anni '60, mentre, in quasi tutti

¹¹ La formula dell'effetto Sagnac fu scritta in tale modo nell'articolo Post (1967), *op. cit.*, tale articolo rappresenta la prima rassegna storica in lingua inglese dell'effetto in un periodo in cui l'interesse verso di esso stava aumentando grazie allo sviluppo del giroscopio laser e alle sue possibilità applicative. È uno degli articoli sull'effetto maggiormente citati ed è possibile affermare che dagli anni '70 in poi l'effetto Sagnac fu conosciuto nella versione proposta da tale articolo.

¹² In *SANP* si trovano i documenti personali di Georges Sagnac. Il fratello di G. Sagnac, Philippe Sagnac (1868-1954), storico e docente all'*Université de Paris*, conservò alcuni documenti personali del fratello. Dopo la morte di Philippe Sagnac la documentazione dello storico fu consegnata negli *Archives Nationales* di Parigi.

gli articoli della prima metà del secolo XX, si parlò di esperimento di Sagnac o, più raramente, di effetto Michelson-Sagnac.¹³

Sagnac compì vari tentativi in cui confrontò le foto *d* e *s*. La fig. 4.2 è la foto dello sfasamento delle frange osservato da Sagnac: il fisico francese non pubblicò tali foto, ma solo la tabella numerica dei risultati riprodotta in fig. 4.3. Lo sfasamento era osservabile anche per velocità angolari inferiori al giro per secondo e i versi degli spostamenti di frangia risultarono concordi con le previsioni teoriche dedotte dalla teoria del vento d'etere.

	S	Classe n°	N	z par c	z par f	z cal.	λ
1 ^{re} méthode. 863 ^{mμ}	32,2 et 3	0,86	-0,0264			-0,0297	419 ^{mμ}
						+0,065	
2 ^e méthode. 866 ^{mμ}	49,2	2,21	-0,072	-0,078		-0,075	425 ^{mμ}
						-0,079	
	47,4	2,35	-0,077	-0,080		-0,079	431 ^{mμ}

Figura 4.3. Tabella pubblicata da Sagnac con i risultati degli esperimenti, tratta da Sagnac (1913b), p. 1413.

Figura riprodotta per concessione dell'AdS di Parigi.

Nella tabella in fig. 4.3 sono presenti due aree S diverse, tre diverse lunghezze d'onda λ calcolate rapportando il valore dell'interfrangia corrispondente con l'interfrangia Λ_0 ottenuta con la radiazione 436 nm (Sagnac usa come unità di misura della lunghezza d'onda i $m\mu$ ora in disuso nel SI) dell'arco di mercurio, quattro valori diversi di N ed entrambi i metodi diversi d'operare: un totale di quattro raffronti tra previsioni teoriche, chiamate *z cal*, e risultati sperimentali, chiamati *z par c* o *z par f*, dove per *c* s'intende la frangia centrale e per *f* una frangia laterale.

Misurare lo spostamento sia delle frange laterali che di quella centrale permise di aumentare la quantità di raffronti con le previsioni teoriche, rafforzando così la validità del risultato sperimentale.

Per dimostrare che questo spostamento delle frange d'interferenza tra una rotazione e l'opposta dipendeva dall'azione del vento d'etere, Sagnac provò l'inesistenza d'altri fattori. Egli restrinse il valore dell'interfrangia e notò che sotto una certa entità non si sperimentava alcuna variazione della posizione delle frange nelle due foto *d* e *s* perché troppo piccola per

¹³ Il nome di effetto Michelson-Sagnac si trova in Zernike, F. (1947) "The convection of light under various circumstances with special reference to Zeeman's experiments", *Physica*, 13 (1947): 279-88, p. 287. La comunità scientifica internazionale assunse definitivamente il nome effetto Sagnac durante lo sviluppo del giroscopio laser e delle sue applicazioni nella navigazione aerospaziale.

essere visibile. In questo modo Sagnac dimostrò che lo spostamento delle frange era direttamente collegato al valore dell'interfrangia e non rivelabile per un valore piccolo di quest'ultima, esattamente come previsto dalla sua teoria. La dipendenza degli spostamenti di frangia dal valore d'interfrangia provava che questi non erano dovuti a movimenti accidentali o elastici dei pezzi ottici durante la rotazione.

Verificato che lo spostamento delle frange d'interferenza si doveva al movimento rotatorio, Sagnac si preoccupò di dimostrare che a produrre l'effetto non era un vortice d'aria. Per far questo pose un ventilatore sull'interferometro immobile e lo fece ruotare a gran velocità angolare, prima in un verso e poi nell'altro, fotografando le frange d'interferenza prodotte nei due sensi: se l'effetto ottico osservato fosse dipeso dal vento d'aria, si sarebbe visto uno spostamento delle frange. La verifica sperimentale non registrò nessuna differenza sensibile delle frange, quindi non era l'aria il mezzo che agiva nell'esperimento, da cui Sagnac concluse che:

*L'effet interférentiel observé est bien l'effet tourbillonnaire optique dû au mouvement du système par rapport à l'éther et manifeste directement l'existence de l'éther, support nécessaire des ondes lumineuses de Huygens et de Fresnel.*¹⁴

¹⁴ Sagnac (1913a), *op. cit.*, p. 310; [enfasi mia].

4.3. Predecessori

Nell'indagine di fine XIX secolo sul comportamento dell'etere nei dintorni di corpi materiali (vedi Cap. 3), furono fatte alcune ipotesi sperimentali anche sui sistemi in rotazione e il risultato, poi ottenuto da Sagnac, fu previsto sia da Lodge nel 1893 e nel 1897, sia da Michelson nel 1904.¹⁵ Entrambi gli scienziati cercavano un modo di rendere visibile il movimento di rotazione terrestre rispetto all'etere.

Nel 1893 Lodge, partendo dall'ipotesi dell'etere stazionario di Fresnel, propose la possibilità di verificare, grazie ad un interferometro chiuso di superficie molto vasta, un effetto d'interferenza dipendente dalla velocità di rotazione della Terra rispetto all'etere e dedusse una formula che, fatti i debiti cambi di notazione, era identica all'espressione di Sagnac. Alcuni anni dopo, nel 1897, Lodge arrivò anche a suggerire un esperimento del tutto simile a quello poi realizzato da Sagnac per verificare l'azione dell'etere sulla velocità della luce in un apparato in rotazione. Lodge, però, non compì mai questi esperimenti.

L'esperimento proposto alcuni anni dopo da Michelson si basava sullo stesso principio per studiare il moto terrestre (sia rotatorio che di rivoluzione) rispetto all'etere. Michelson descrisse l'idea in questo modo:

Suppose it were possible to transmit two pencils of light in opposite directions around the earth parallel to the equator, returning the pencils to the starting-point. If the rotation of the earth does not entrain the aether, it is clear that one of the two pencils will be accelerated and the other retarded (relatively to the observing apparatus) by a quantity proportional to the velocity of the earth's surface... so that a measurement of the difference of time required for the two pencils to traverse the circuit would furnish a quantitative test of the entrainment.¹⁶

In queste parole troviamo espresso lo stesso concetto di Lodge e del futuro esperimento di Sagnac: lo sfasamento temporale dovuto al vento d'etere tra due raggi di luce contro-rotanti in un circuito chiuso in movimento rotatorio.

¹⁵ Gli accenni di Lodge alla formula del futuro effetto Sagnac si trovano in Lodge, O. J. (1893) "Aberration problems – a discussion concerning the connection between ether and gross matter; with some new experiments", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 184 (1893): 727-807; e in Lodge, O. J. (1897) "Experiments on the absence of mechanical connexion between ether and matter", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 189 (1897): 149-65; la derivazione di Michelson si trova in Michelson, A. A. (1904) "Relative Motion of Earth and Ether", *Philosophical Magazine*, 8 (1904): 717-19.

¹⁶ Michelson (1904), *op. cit.*, pp. 716-7.

Nei suoi ragionamenti Michelson stava assumendo che l'etere non fosse trascinato dal moto di rotazione della Terra come affermavano sia la teoria di Fresnel che quella di Stokes, per la quale l'etere era trascinato dal solo moto traslatorio terrestre.

L'esperimento era irrealizzabile per l'impossibilità di far viaggiare un raggio terrestre lungo tutto il globo, ma Michelson mostrò che lo stesso effetto era sperimentabile in un interferometro di superficie molto grande. In questo caso la differenza dei tempi di percorso dipendeva dalla latitudine ed era, nei calcoli di Michelson, di:

$$\Delta T = \frac{2v_t A}{V_0^2 R} \sin \phi \quad (4.8);$$

dove A indica l'area racchiusa dal percorso ottico, v_0 la velocità della luce isotropa nell'etere, v_t la velocità tangenziale della rotazione terrestre considerata costante lungo tutto il circuito, R il raggio terrestre e ϕ la latitudine nel punto d'origine del circuito (dove i fasci si separano per poi riunirsi).

Il grande sperimentatore statunitense scrive così la corrispondente differenza di fase:

$$\Delta Z = \frac{2v_t A}{V_0 R \lambda} \sin \phi \quad (4.9).$$

Poiché $v_t/R = \omega_t$, dove ω_t è la velocità angolare terrestre in rad/s, l'eq. (4.9) dipendeva solo dall'area A che, per rendere visibile l'effetto, doveva essere molto grande. L'eq. (4.9) era la metà della futura formula dell'effetto Sagnac (4.6) a causa di un errore di calcolo di valore 2 che Michelson corresse in seguito.

Nello stesso articolo Michelson risolse anche il problema del riferimento interferometrico già posto da Lodge: trovare una figura d'interferenza rispetto alla quale misurare lo spostamento delle frange dovuto all'effetto cercato. Non potendo, ovviamente, cambiare il verso della rotazione terrestre, Michelson suggerì che *“a control is furnished by introducing another pair of mirrors in the path so as to make the area of the circuit so much smaller that the displacement would be negligible”*.¹⁷

Gli altri studiosi che si sono occupati della storia dell'effetto, stranamente, non hanno notato o enfatizzato che Michelson nel 1904 aveva già risolto questo problema ed avrebbe potuto compiere l'esperimento immediatamente.

¹⁷ Ibid., p. 718.

Non lo fece, secondo Malykin, “*probably because of financial problems*”.¹⁸ La realizzazione di quest’esperienza richiedeva l’ onerosa costruzione di un interferometro con un’area vastissima e Michelson riuscì a trovare i fondi per compiere l’esperimento solo nel 1925, quando i quadri teorici di riferimento erano molto cambiati in seguito alla diffusione delle teorie di Einstein.¹⁹

A compiere un esperimento molto simile a quello di Sagnac e prima di questi fu, invece, lo studente tedesco Francis Harress nella sua tesi di dottorato del 1911.²⁰ L’apparato in rotazione di Harress consisteva in un anello fatto di prismi grazie ai quali la luce si propagava attraverso i vetri. L’obiettivo del ricercatore tedesco era molto diverso da quello di Sagnac, ovvero quello di misurare le proprietà dispersive dei vetri e confrontare sperimentalmente il coefficiente di Fresnel con quello di Lorentz (vedi par. 3.10). I dati di dispersione da lui ottenuti, però, non corrispondevano ai valori aspettati. Harress non riuscì a leggere correttamente i risultati sperimentali ricavati perché “*tacitly assumed the absence of exactly the effect that Sagnac was looking for*”.²¹

L’esperimento di Harress rimase per lo più ignoto fino al 1914, quando P. Harzer ne rielaborò i dati nell’ambito della teoria classica dell’etere tenendo conto di un effetto dovuto alla rotazione del circuito chiuso.²² Harzer trovò in questo modo la formula (4.6) in maniera indipendente dalle ricerche contemporanee di Sagnac. I risultati dell’esperimento furono poi ripubblicati nel gennaio del 1920 dal relatore di Harress, O. Knopf, e, in una trattazione relativistica dei sistemi di riferimento ruotanti, da M. von Laue.²³ Anche per costoro tali risultati potevano essere spiegati considerando l’effetto di rotazione descritto da Sagnac. Dopo la pubblicazione dell’articolo di von Laue, in cui l’effetto di rotazione veniva considerato all’interno della teoria della relatività ristretta, i dati dell’esperimento di Harress furono considerati una conferma dell’effetto scoperto dal fisico francese.

¹⁸ Malykin (1997), *op. cit.*, p. 318.

¹⁹ Michelson compì l’esperimento con Henry G. Gale e i loro risultati furono pubblicati brevemente in Michelson, A. A., e Gale, H. G. (1925a) “The Effect of the Earth Rotation on the Velocity of Light” *Nature*, 115 (1925): 566; e, in maniera più estesa in Michelson, A. A., e Gale, H. G. (1925b) “The Effect of the Earth Rotation on the Velocity of Light”, *The Astrophysical Journal*, 61 (1925): 140-45.

²⁰ Harress, F. (1911) “Die Geschwindigkeit des Lichtes in bewegten Körpern” (Ph.D. thesis, Jena, 1911).

²¹ Post, E. J. (1967), *op. cit.*, p. 477.

²² Harzer, P. (1914a) “Über die Mitführung des Lichtes in Glas und die Aberration”, *Astronomische Nachrichten*, 198 (1914): 378-92.

²³ Knopf, O. (1920) “Die Versuch von F. Harress Die Geschwindigkeit des Lichtes in Bewegten Körpern”, *Annalen der Physik*, 62 (1920): 389-447, e Von Laue, M. (1920) “Zum versuch von F. Harress.”, *Annalen der Physik*, 62 (1920): 448-63.

L'esperimento del tedesco rendeva evidente, inoltre, una caratteristica non derivabile direttamente da quello di Sagnac; i dati di Harress, infatti, riaffermavano il valore numerico ricavato nel vuoto e questo significava che l'effetto Sagnac era indipendente dal fatto che il percorso ottico fosse vuoto o riempito da materia trasparente in moto solidale con la sorgente e l'osservatore.

4.4. Georges Sagnac: teoria ottica, ricerche sperimentali ed interpretazione dell'effetto (1899-1914)

Sagnac, nei suoi articoli, non cita mai questi predecessori e si ritiene che il suo lavoro sia stato del tutto indipendente da essi. La tesi è confermata da un'approfondita analisi di vari documenti d'archivio e della letteratura scientifica dell'epoca: l'esperimento è del tutto coerente con il percorso scientifico e filosofico che Sagnac percorre a partire dai suoi studi universitari.

Georges Sagnac, dopo aver terminato l'*École Normale Supérieure* nel 1893, diviene *agrégé-préparateur* di fisica al laboratorio d'insegnamento della *Sorbonne* fino al 1900. In questo periodo si occupa principalmente dello studio sui raggi X e, in particolare, dei raggi secondari.²⁴ Dal 1900 diventa *maître de conférences* all'Università di *Lille* fino al 1904, quando è incaricato del corso di fisica alla *Faculté des Sciences* di Parigi all'interno del *Certificat d'Etudes Physiques chimiques et naturelles (P.C.N.)*.²⁵ Dal 1912 è professore aggiunto di fisica nello stesso dipartimento, carica che riveste nell'anno in cui verifica l'effetto.

Dopo le indagini sui raggi X, Sagnac fu assorbito completamente dalle analisi teoriche sull'ottica e sviluppò una propria teoria sull'etere e sul suo rapporto con i corpi ponderabili in movimento. La teoria di Sagnac era fondata sulla convinzione dell'esistenza di un etere stazionario che avesse ovunque gli stessi valori di densità ed elasticità e nel quale la velocità della luce era costante in tutte le direzioni. Tale etere era identico a quello di Fresnel nello spazio vuoto di materia, ma si comportava in modo del tutto differente all'interno dei corpi ponderabili. Pubblicata la prima volta nel 1899, la sua teoria affermava, infatti, che nei corpi non vi fosse alcun trascinarsi d'etere: tutti i fenomeni ottici derivavano dalle interazioni tra l'etere immobile, sostegno delle onde luminose, e le parti costituenti i corpi materiali.²⁶

Come si è visto nel Cap. 3, il periodo nel quale si sviluppava il pensiero di Sagnac era pervaso da grandi svolte concettuali che portarono alla formulazione della teoria della

²⁴ Per un interessante approfondimento del ruolo di Sagnac nello studio dei raggi X vedere Quintin, M. (1996) "Qui a découvert la fluorescence X?", *Journal de Physique IV*, 6 (1996): 599-609; l'autore attribuisce a Sagnac la scoperta della fluorescenza dei raggi X.

²⁵ Il Corso *Enseignement préparatoire au Certificat d'Etudes Physiques chimiques et naturelles* fu creato nel 1893 come branca della *Faculté des Sciences* ed era di minor importanza accademica rispetto ai corsi della stessa.

²⁶ Sagnac, G. (1900a) "Théorie Nouvelle de la Transmission de la Lumière dans les Milieux en Repos ou en Mouvement", *Le Journal de Physique*, 9 (1900): 177-89.

relatività speciale. La teoria dell'etere di Lorentz aveva una posizione predominante presso le comunità scientifiche continentale della metà dell'ultima decade del XIX secolo. I repentini cambiamenti legati al concetto di etere trovarono il loro culmine nel 1905, quando Einstein espresse chiaramente l'inutilità di ipotizzarlo al contrario di Lorentz, che continuava a riferirsi ad un etere elettromagnetico stazionario. La visione fisica ed epistemologica di Einstein contrastava con la filosofia realista di chi riteneva impossibile l'esistenza di un'onda che non fosse sostenuta da alcun mezzo materiale. Chi continuava a ritenere necessaria l'esistenza di un supporto meccanico delle onde luminose e/o elettromagnetiche doveva, però, affrontare grandi problemi teorici quali le sue strane proprietà e l'impossibilità che esse spiegassero tutti i fenomeni ottici dei corpi in moto.

Questo era l'ambito in cui si muoveva Sagnac e il comportamento del suo etere era vicino a quello ipotizzato da Lorentz, nonostante il francese ne avversasse fortemente l'impianto teorico. Di questa somiglianza era consapevole lo stesso Sagnac, che vedeva un'identità "*au second ordre près, entre le principe sur le quel repose le changement de la variable temps, effectué par Mr H.A. Lorentz au §4 de son mémoire, et le principe de l'effet de mouvement que j'ai énoncé avec le même dans mon article du Journal de Physique*".²⁷

Questa somiglianza formale ammessa da Sagnac nascondeva però una distinzione sostanziale che portò il fisico francese ad affermare che la propria teoria era alternativa a quella di Lorentz e in piena consonanza con l'immagine fisica dell'etere di Fresnel. In una lettera del 1900, infatti, Sagnac cercò di convincere Henri Poincaré che il suo lavoro era indipendente dalla memoria di Lorentz del 1899 in cui era sviluppata la teoria dei fenomeni ottici ed elettrici dei corpi in moto rispetto all'etere (vedi par. 3.12).²⁸

A conferma di ciò, Sagnac affermava che la comprensione del comportamento dell'etere e della sua relazione con le particelle di materia era al centro dei suoi interessi già dagli studi universitari fino al 1896 quando "*sur le conseil pressant de Mr Bouty, je fus amené les laisser provisoirement [...] pour approfondir l'étude des rayons X dont je m'étais déjà occupé incidemment*".²⁹

²⁷ Lettera di G. Sagnac a H. Poincaré, 15 settembre 1900, (*Archives Henry Poincaré*) pubblicata sul web in <http://www.univ-nancy2.fr/poincare/chp/text/sagnac04.xml#CITELorH1899b> (visionato l'8 ottobre 2008) [enfasi di Sagnac]. L'articolo al quale si riferisce Sagnac è Sagnac (1900a), *op. cit.*

²⁸ L'articolo a cui si riferisce Sagnac è Lorentz, H. A. (1899a.) "Simplified Theory of Electrical and Optical Phenomena in Moving System", *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen* (1898-1899): 427-42.

²⁹ Ibid.

La sua futura attività scientifica conferma questa centralità d'interesse: tutti gli articoli pubblicati dopo l'anno 1900 riguardano le proprietà dell'etere luminifero.

Tornando alla lettera, Sagnac desiderava che Poincaré, una delle massime autorità scientifiche francesi, comprendesse che la sua teoria era indipendente da quella di Lorentz e profondamente differente nelle immagini fisiche di riferimento, ad iniziare da quella dell'etere. La sua *Théorie nouvelle de la transmission de la lumière dans les milieux en repos ou en mouvement* spiegava la propagazione della luce nei mezzi trasparenti non con reazioni meccaniche tra etere e materia, ma con un meccanismo puramente cinematico nel quale interveniva la “*discontinuité de la matière*”.³⁰

Le ipotesi di partenza erano che la luce fosse costituita dalle vibrazioni di un etere luminifero immobile rispetto al moto dei corpi e che i corpuscoli materiali, immersi in tale etere stazionario e piccoli rispetto alle lunghezze d'onda delle vibrazioni ottiche incidenti, fossero in grado di trasmettere in tutte le direzioni una proporzione delle vibrazioni d'etere. Sagnac sosteneva che per le vibrazioni luminose dello spettro visibile e per un mezzo materiale con la densità molecolare del vetro “*la presque totalité du faisceau lumineux est réfléchi, ou est transmise, sans diffraction appréciable, avec les épaisseurs de milieu pratiquement employées*” nella direzione normale alla faccia d'ingresso.³¹

Secondo Sagnac, quindi, le vibrazioni incidenti si separavano solo in trasmesse e riflesse lungo la direzione normale al fronte d'onda, visto il mutuo annullamento delle vibrazioni nelle altre direzioni. In seguito aggiunse:

Toutes les vibrations qui ont subi un nombre impair de ces réflexions élémentaires reviennent à la surface d'entrée. La résultante de ces vibrations impaires [...] est [...] la vibration réfléchi par la surface du corps.

Une vibration qui subit un nombre pair de réflexions élémentaires est [...] ramenée vers l'intérieur du milieu profond [...] La résultante de ces vibrations [...] est [...] la vibration transmise par le milieu.”³²

Il raggio trasmesso era, così, la risultante di queste vibrazioni elementari. Nei corpi trasparenti la sua velocità di propagazione era inferiore alla velocità della luce nel vuoto

³⁰ Sagnac (1900a), *op. cit.*, p. 177, il nome con cui ho citato la teoria di Sagnac corrisponde al titolo di questo articolo.

³¹ *Ibid.*, p. 178.

³² *Ibid.*, p. 178 [enfasi di Sagnac].

perché sommatoria di effetti che prevedevano un certo numero di riflessioni all'interno del mezzo.

Una volta formalizzata la sua teoria dei mezzi in riposo, Sagnac affrontò la propagazione della luce nei corpi in movimento e dedusse la formula di Fresnel-Fizeau. Per lui tale formula non derivava dal trascinamento dell'etere, ma era la sommatoria di due effetti (*l'effet de masse*³³ e *l'effet de mouvement*³⁴) ed era uno sviluppo della trattazione fatta per i mezzi trasparenti immobili.

In questo comportamento nei corpi trasparenti si trova la differenza con la teoria di Fresnel secondo la quale l'etere aveva maggiore densità all'interno dei corpi ponderabili e il coefficiente di trascinamento dipendeva dal trascinamento del *surplus* dell'etere contenuto all'interno dei corpi.

Sagnac stava dedicando tutti i suoi sforzi alla creazione di una nuova teoria ottica in cui l'immagine fisica dell'etere elastico sostegno reale delle onde luminose, simile in questo all'etere di Fresnel, si combinasse con le ipotesi di stazionarietà dell'etere e di corpuscolarità della materia, assunzioni alla base anche della teoria di Lorentz.

È importante a questo punto chiarire perché la teoria di Sagnac era, nella sua percezione e in quella dei contemporanei francesi, una difesa dell'etere di Fresnel. La visione fisica ed epistemologica di Sagnac, infatti, portava a considerare l'immagine dell'etere come fondamentale nella comprensione della natura. Secondo Sagnac, l'etere di Fresnel poteva, con opportune modifiche, spiegare tutti i fenomeni che le nuove teorie di Lorentz interpretavano con stravolgimenti concettuali avvertiti dal fisico francese. Questa

³³ L'effetto di massa era, nella teoria di Sagnac, l'effetto dovuto alla variazione di materia incontrata dalla luce in un certo percorso L in un mezzo trasparente dipendente dalla sua velocità rispetto all'etere. Nel caso di un corpo a riposo per una lunghezza L e con una velocità V nel mezzo, la luce impiegherà un tempo $T = L/V$. Nel caso di un corpo in moto rispetto all'etere con velocità v_E nella stessa direzione di propagazione della luce, questa, in un percorso L , attraversa una quantità di materia minore della frazione v_E/V rispetto alla quantità di materia immobile. Sagnac deriva da questo che la durata di propagazione è diminuita della quantità $T v_E/V$, vale a dire $L v_E/V^2$, trascurando quantità superiori alla seconda potenza di v_E/V .

³⁴ L'effetto di movimento si basa sul ragionamento della riflessione e trasmissione su ogni corpuscolo del mezzo di lunghezza l . Secondo Sagnac l'effetto del movimento è quello di annullare reciprocamente tutti i termini di riflessione e trasmissione, facendo sì che la luce si comporti come se il cilindro di lunghezza l fosse vuoto di materia, vale a dire con la stessa velocità che avrebbe nell'etere. La durata di propagazione della luce in un cilindro di lunghezza l immobile rispetto all'etere è l/V_0 , ma si allunga della quantità $l v_E/V_0^2$, nel caso il mezzo viaggi nella direzione della luce con velocità v_E . Sagnac a questo punto afferma che l'ultima quantità corrisponde, a meno del secondo ordine, a $L v_E/V_0^2$.

La differenza tra i due effetti di massa e movimento era, $\frac{L v_E}{V_0^2} - \frac{L v_E}{V^2} = \frac{L v_E}{V_0^2} (n^2 - 1)$, dove $n = V_0/V$ è l'indice di rifrazione del materiale. Questa è esattamente la formula di trascinamento di Fresnel che l'esperimento di Fizeau del 1851 sembrava aver confermato.

convinzione è senza dubbio l'asse portante di tutta la sua attività scientifica. Le differenze con la teoria di Lorentz sono chiare a Sagnac, tanto da renderle pubbliche in una nota ad un articolo scritto per il venticinquesimo anniversario del dottorato del grande fisico olandese:

*Ma théorie optique élémentaire et la théorie à la fois électrique et optique du Prof. H.A. Lorentz présentent des formes extrêmement différentes l'une de l'autre. Aussi ai-je été du fait suivant que le lecteur constatera très aisément. La loi très simple de l'effet de mouvement que constitue la partie essentielle de ma théorie élémentaire est, en définitive, équivalente au principe qui fait le succès du changement de variable introduit par le prof. H.A. Lorentz.*³⁵

In appunti scritti dopo il 1906, Sagnac rende ancora più evidente il forte contrasto teorico che lo separava dalle accreditate teorie di Lorentz, scrivendo che “*cette équivalence est purement mathématique*”.³⁶

Un contrasto teorico che ha radici epistemologiche portate alla luce dallo stesso Sagnac, quando parla della sua teoria:

*Ce mode de simplification de la théorie satisfait également le philosophe désireux de se rendre compte le plus directement possible de la nature des choses, d'en démêler le plus clairement possible les causes essentielles, et le physicien qui pour travailler utilement a besoin comme instrument de recherches d'une théorie capable de donner des solutions directes aussi simples que le permet la nature de chaque problème.*³⁷

A partire dal 1900, quindi, Sagnac si poneva in contrasto con la teoria dominante di Lorentz, così come dopo criticò quelle che si basavano sul *principe de relativité*. Tale contrasto si fece più aspro dopo la diffusione della teoria della relatività ristretta di Einstein che, nel 1905, aveva affermato l'inutilità di ipotizzare un tale ente (vedi par. 3.14).

Partendo dalla convinzione dell'esistenza dell'etere di Fresnel e dell'inutilità di aggiungere ipotesi dinamiche e elettromagnetiche, come faceva Lorentz, Sagnac continuò a lavorare per dimostrare la correttezza della sua visione. Egli dedusse che il suo *effet de mouvement* e l'ipotesi d'immobilità dell'etere spiegavano alcuni degli esperimenti che non avevano

³⁵ Sagnac, G. (1900b) “Relations nouvelles entre la réflexion et la réfraction vitreuses de la lumière”, *Extrait des Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles* (1900): 377- 82, p. 378.

³⁶ Copia di ibid. trovata in *SANP*.

³⁷ Sagnac, G. (1899c) “Théorie nouvelle de la propagation de la lumière à travers les corps en repos ou en mouvement”, *Bulletin de la Société des Gens de science*, 3 (1899): 17-20, p. 20 [enfasi di Sagnac].

mostrato alcun moto relativo tra etere e Terra, anche se era consapevole che la sua teoria non era in grado di spiegare tutti i fenomeni ottici, in particolare l'esperimento di Michelson-Morley del 1887.³⁸

Nel 1910 il fisico francese ipotizzò, in una comunicazione apparsa sul *Bulletin de Congrès de Bruxelles*, l'effetto vorticoso ottico osservabile in un sistema in rotazione uniforme rispetto all'etere: in un movimento d'insieme rispetto ad un etere immobile, la durata di propagazione della luce tra due punti qualunque del sistema è alterata come se questo fosse fermo e sottomesso all'azione di un vento d'etere, la cui velocità relativa in ciascun punto del sistema è uguale ed opposta alla velocità angolare in questo punto. Sagnac considerava l'osservazione dello sfasamento delle frange dovuto ad un movimento rotatorio una dimostrazione inconfutabile dell'esistenza dell'etere.

Il 1910 è anche l'anno in cui Sagnac riuscì a perfezionare un tipo d'interferometro a fasci sovrapposti contenenti un percorso chiuso.³⁹ Questo strumento fu poi posto in rotazione uniforme nel 1913 per osservare l'effetto vorticoso ottico.

Prima dell'esperienza descritta nel par. 4.2, Sagnac compì un altro esperimento basato sullo stesso concetto di *tourbillon* d'etere, utilizzando un interferometro a percorso chiuso la cui proiezione dell'area su un piano normale alla superficie terrestre era di circa 20 m². Questo esperimento, realizzato nel 1911, era simile a quello compiuto da Michelson nel 1897 per verificare se un eventuale trascinamento dell'etere vicino alla Terra si propagasse anche ad una certa distanza dalla superficie terrestre (vedi par. 3.11).⁴⁰

L'esperimento del 1911 non mostrò rilevanti spostamenti di frangia nei due fasci sovrapposti. Ciò implicava che il comportamento dell'etere nelle immediate vicinanze della superficie terrestre si trasmetteva anche ad una certa distanza. Contrariamente a Michelson, però, Sagnac usò questo risultato sperimentale per riaffermare la sua teoria dell'etere immobile: il trascinamento dell'etere dovuto alla traslazione era nullo nelle vicinanze della Terra.

³⁸ Sagnac si riferisce ai risultati degli esperimenti al primo ordine della costante d'aberrazione, in modo particolare a quelli pubblicati da Mascart nel 1872 e 1874 (vedi par. 3.7).

³⁹ Sagnac, G. (1910a) "Sur les interférences de deux faisceaux superposés en sens inverses le long d'un circuit optique de grandes dimensions", *Comptes Rendus*, 150 (1910): 1302-5; e Sagnac, G. (1910b) "Interféromètre à faisceaux superposés inverses donnant en lumière blanche polarisée une frange centrale étroite à teinte sensible et des franges colorées étroites à intervalles", *Comptes Rendus*, 150 (1910): 1676-79.

⁴⁰ Michelson compì questo esperimento per calcolare fino a che distanza la Terra trasmetteva il suo movimento all'etere e concluse che "the earth in its motion drags with it the ether even at distances of many thousand kilometers from its surface" in Michelson, A. A. (1897) "The Relative Motion of Earth and Ether", *The American Journal of Science*, 3, (1897): 475-78, p. 478.

Nello stesso articolo Sagnac proponeva la propria teoria come alternativa al *principe de relativité* e cita per la prima volta il nome di Einstein come uno dei principali sostenitori del principio secondo il quale solo i movimenti relativi sono visibili.⁴¹ Poche righe più in basso, troviamo l'importante affermazione: “*Mais un tel principe de relativité sera utilement soumis à nouvelle épreuves ne rentrant dans aucun des types des diverses expériences jusqu'ici effectuées*”.⁴²

Sagnac pare avere già in mente l'esperimento che, in seguito, considererà prova decisiva contro il principio di relatività. Dopo solo due anni, infatti, pubblicava i risultati dell'esperimento conclusivo delle sue ricerche sull'etere stazionario. Nella visione di Sagnac un osservatore solidale con l'apparato in rotazione avrebbe osservato uno spostamento di frange solo nel caso di velocità diverse della luce nei due sensi. Lo spostamento di frange effettivamente verificato, dimostrava, quindi, che per l'osservatore in rotazione non valeva il principio di costanza della velocità della luce nel vuoto. La conclusione dell'articolo del 1914, comprensivo di tutta la sua ricerca sull'effetto, non lascia dubbi d'interpretazione:

Contrairement à ce qui est arrivé dans la célèbre expérience de Michelson relative aux effets du second ordre de la translation d'un système emporté par la Terre, l'effet tourbillonnaire optique d'une rotation artificielle de l'ensemble d'un système se manifeste réellement, sans compensation inattendue, comme un effet du premier ordre du mouvement par rapport à l'éther.

*L'expérience révèle directement [...] le retard linéaire $2\Delta P$ [...] que la rotation d'ensemble du système optique produit dans l'éther entre les deux systèmes d'ondes inverses T et R pendant leur propagation autour du circuit. Ce retard est un effet tourbillonnaire optique du vent relatif d'éther qui souffle dans le système tournant. Il ne dépend pas d'un vent de translation relative, mais seulement de la circulation relative C de l'éther et s'accorde avec le valeur de cette circulation calculée en supposant l'éther ainsi défini: un fluide immobile transmettant les ondes lumineuses avec une vitesse invariable.*⁴³

⁴¹ Sagnac, G. (1911a) “Limite supérieure d'un effet tourbillonnaire optique dû à un entraînement de l'éther lumineux au voisinage de la Terre”, *Le Radium*, 8 (1911): 1-8.

⁴² Ibid., p. 1 [enfasi di Sagnac].

⁴³ Sagnac (1914), *op. cit.*, pp. 194-95.

4.5. Perché Sagnac fu il primo a sperimentare l'effetto?

La precisa e convinta posizione teorica del fisico francese in quel dato momento storico fornisce una possibile spiegazione del perché egli sia stato il primo a compiere l'esperimento verificando, così, la formula dell'effetto. Sagnac aveva la forte esigenza di confutare le teorie che si basavano sul principio di relatività, mentre i predecessori non potevano attribuire all'esperimento la stessa valenza. Le derivazioni teoriche di Lodge e Michelson erano, infatti, antecedenti alla pubblicazione dell'articolo di Einstein sulla teoria della relatività ristretta del 1905.

Per quanto riguarda la genesi dell'idea dell'effetto vorticoso ottico la documentazione d'archivio fornisce alcune delucidazioni in merito. Sagnac, molto probabilmente, non era a conoscenza né delle deduzioni teoriche di Lodge e Michelson né dell'esperimento di Harress. Ci sono numerosi riferimenti, invece, al moto vorticoso atmosferico del fisico norvegese Vilhelm Bjerknes (1862-1951), il quale si occupava di fenomeni meteorologici.⁴⁴ Dalla corrispondenza privata si evince che i due scienziati conoscevano i rispettivi lavori e condividevano la stessa idea fisica di etere.⁴⁵ Dalle affermazioni di Sagnac è possibile ritenere Bjerknes il diretto ispiratore dell'effetto vorticoso ottico.

Sul perché Lodge non fece mai l'esperimento, si possono tracciare alcune ipotesi storiografiche. Malykin fa notare che Lodge aveva problemi tecnici nel creare una struttura in cui l'apparato ruotasse nel suo insieme (sorgente, disco e osservatore) ed è, inoltre, probabile che non sia riuscito a trovare un modo di fotografare la figura d'interferenza.

Indipendentemente dalle problematiche tecniche, Lodge riteneva, comunque, che i suoi esperimenti avessero dato una conferma decisiva alla stazionarietà dell'etere e che gli esperimenti con masse elettrificate e magnetizzate fossero più essenziali di quello sulla semplice rotazione nella ricerca delle proprietà dell'etere elettromagnetico. Già convinto dell'esistenza di un etere stazionario, Lodge riteneva, probabilmente, che un esperimento come quello di Sagnac non avrebbe portato alla luce niente di nuovo rispetto a quelli sui corpi elettrificati e magnetizzati. È ipotizzabile, perciò, che Lodge non si sia impegnato per risolvere i problemi tecnici che tale esperimento comportava.

⁴⁴ Un accostamento esplicito dell'effetto di *tourbillon* dell'etere alla teoria del *tourbillon* atmosferico di Bjerknes e dei calcoli da questo effettuati si trova in Sagnac (1914), *op. cit.*; in Sagnac (1911), *op. cit.*, p. 3; e nella lettera di Philipp von Lenard a Sagnac, 11 aprile 1912, *SANP*, nella quale Lenard commenta positivamente l'accostamento tra le due formule compiuto da Sagnac.

⁴⁵ V. Bjerknes a Sagnac, 1 febbraio 1914, *SANP*.

I suoi esperimenti avevano dato risultato nullo sul trascinarsi e non rimaneva che considerare la teoria dell'etere di Fresnel, ampliata dall'ipotesi di contrazione di Lorentz-Fitzgerald, per spiegare l'esito dell'esperienza di Michelson-Morley, e indirizzare le sue ricerche verso osservazioni più rilevanti all'interno di questo programma di ricerca.⁴⁶

A conferma di ciò vediamo che Lodge, nella sua autobiografia pubblicata nel 1931, ancora scrive: *"I still [...] cling to the idea that the Fitzgerald contraction is a reality"*, ossia una reale contrazione dei corpi che si muovono in un etere stazionario.⁴⁷ Lodge entrò, poi, nella letteratura sull'effetto Sagnac grazie ad un articolo di Ludwik Silberstein (1872-1948) del 1921 che gli concesse la priorità dell'idea sperimentale (vedi Cap. 5).⁴⁸

Ad ogni modo, Sagnac fu il primo a completare l'intero percorso dall'ipotesi dell'effetto fino all'esecuzione dell'esperimento. Il fisico francese era interessato a studiare non solo il rapporto tra rotazione terrestre ed etere, esperimento che richiedeva uno sforzo economico enorme, ma anche quello tra etere e un piatto rotante. Sagnac stava, infatti, cercando una conferma della propria teoria ottica dei corpi in moto, in aperto contrasto con quelle che partivano dal principio di relatività, ma anche con la teoria elettromagnetica di Lorentz, della quale scrive che *"serait interprétée d'une manière néfaste et je le vois [...] ridicule"*.⁴⁹ Il fisico francese riuscì, perciò, a verificare l'effetto perché esso fu al centro di ricerche che lo occuparono per una quindicina d'anni sia come teorico che come sperimentatore. Al contrario di Lodge, Sagnac lavorò in un momento storico in cui alcune concezioni, considerate certe alla fine del secolo precedente, erano messe in crisi e in cui stavano nascendo teorie che, in seguito, avrebbero preso il sopravvento presso la comunità scientifica.

Non sembra che la teoria della relatività ristretta di Einstein fosse, nel periodo in cui Sagnac compì l'esperimento, la principale antagonista, anche per la scarsa risonanza che essa aveva in Francia. È comunque certo che la visione fisica ed epistemologica di Sagnac si contrapponeva al principio di relatività così come espresso sia da Poincaré che da Einstein.

⁴⁶ Per una discussione storica del rapporto tra Lodge e la ricezione della teoria della relatività ristretta in Gran Bretagna vedere Goldberg, S. (1984) *Understanding Relativity: Origins and Impact of a Scientific Revolution* (Oxford: Clarendon Press, 1984), e Sanchez-Ron, J. M. (1987) "The Reception of Special Relativity in Great Britain", in Glick, T. (ed.) *The Comparative Reception of Relativity, Boston Studies in the Philosophies of Science*, V. 103, (Dordrecht: Reidel, 1987): 27-58.

⁴⁷ Cit. in Anderson, R., Bilger, H. R. e Stedman, G. E. (1994) "Sagnac Effect: A century of Earth-rotated interferometers", *American Journal of Physics*, 62 (1994): 975-85, p. 981.

⁴⁸ Silberstein, L. (1921) "The propagation of light in rotating systems", *Journal of the Optical Society of America*, 5 (1921): 291-307.

⁴⁹ Appunti presi a margine di una copia appartenente a Sagnac di Sagnac (1900b), trovato in *SANP*.

Sagnac non riteneva che la loro visione del mondo corrispondesse alla realtà fisica e il suo principale obiettivo divenne cercare una prova dell'esistenza dell'etere verificando uno stato di moto rispetto ad esso; obiettivo che, secondo lui, fu pienamente raggiunto con la scoperta dell'effetto nel 1913. Per questa consonanza perfetta tra previsioni teoriche e risultato sperimentale l'effetto è, a volte, citato come un risultato che ribalta quello più noto dell'esperimento di Michelson-Morley. Per esempio John E. Chappel Junior, oppositore delle teorie relativiste, termina il suo articolo sull'effetto con la frase: "*the honour due to Georges Sagnac as the first man to demonstrate the existence of luminiferous ether*".⁵⁰

La tesi della difficoltà economica proposta da Malykin può essere valida per l'esperimento sulla rotazione terrestre, ma non spiega perché non si sia ragionato su un esperimento simile a quello di Sagnac. In questo senso è doveroso considerare Sagnac come il primo a cogliere l'importanza di un esperimento che poteva dire qualcosa sul comportamento della luce in un sistema in rotazione e la supposta impossibilità dell'invarianza e isotropia della luce rispetto ad un osservatore solidale con il disco in rotazione.

⁵⁰ Chappel Jr., J. E. (1965) "Georges Sagnac and the Discovery of the Ether", *Archives Internationales d'Histories des Sciences*, (1965): 175-90, p. 190.

4.6. Accoglienza ed accettazione dell'effetto in Francia negli anni successivi alla scoperta

4.6.1. Il contesto culturale francese

La storia delle interpretazioni dell'effetto Sagnac, negli anni immediatamente successivi alla sua scoperta, rimane confinata alle nazioni di Francia e Germania e si accompagna all'accettazione delle teorie di Einstein, la quale segue, nei due Paesi, percorsi molto diversi.⁵¹ In Francia l'interesse verso le teorie relativiste riguarda solo un esiguo numero di fisici finché le osservazioni di Eddington del 1919 sembrarono confermare i calcoli di Einstein sulla deflessione dei raggi di luce in prossimità del Sole. In seguito a queste, le teorie della relatività divennero oggetto di grande interesse, ma l'atteggiamento della maggioranza degli scienziati era di perplessità. Tali teorie scardinavano le basi su cui era stato costruito tutto l'impianto della fisica e la comunità scientifica francese non era pronta ad affrontare tale cambiamento, nonostante l'opera di Henri Poincaré. Le obiezioni alle teorie di Einstein erano di carattere quasi esclusivamente epistemologico ed incentrate sui fondamenti e sul significato fisico della teoria, in particolare sui concetti di spazio e tempo. Come afferma Paty:

*The ideas of relativity were too far removed from common sense, with which classical newtonian mechanics agreed; it would be better to avoid such a break with ordinary modes of thought.*⁵²

La maggior parte dei fisici francesi lavorava per un perfezionamento della teoria newtoniana piuttosto che per una sua sostituzione. Oltre al dibattito puramente fisico-epistemologico sulle teorie della relatività, nella storia dell'effetto subentrano questioni culturali extra-scientifiche: intorno alla prima Guerra Mondiale elementi non secondari furono la difesa della scienza nazionale contro la scienza germanica colpevole di aver firmato l'"*odieux*

⁵¹ Molti storici hanno mostrato la diversità di relazione delle varie comunità scientifiche nazionali rispetto alla nuove teorie della relatività. Per le problematiche storiche, epistemologiche e fisiche che hanno accompagnato la lenta accettazione della relatività in Francia vedere bibliografia del par. 1.4.

⁵² Paty, M. (1987) "The Scientific Reception of Relativity in France" in Glick, T. (ed.) *The Comparative Reception of Relativity, Boston Studies in the Philosophies of Science*, V. 103, (Dordrecht: Reidel, 1987): 113-67, p. 144.

*manifeste des 93*⁵³ e, in maniera meno esplicita, un certo pregiudizio razziale verso una teoria nata da uno scienziato ebreo.

4.6.2. Georges Sagnac e la comunità scientifica francese tra il 1914 e il 1921

Nei documenti legati all'effetto, come nella corrispondenza privata di Sagnac, sono presenti molti dei temi sopra menzionati. Sagnac fu, durante la Prima Guerra Mondiale, uno dei numerosi fisici francesi chiamati a collaborare con l'esercito per la creazione di strumenti tecnologici militari. Tra il 1914 e il 1917, infatti, lavorò soprattutto alla creazione di una lente acustica interferenziale per percepire oggetti in avvicinamento grazie all'amplificazione delle onde sonore, in aiuto delle difese anti-aeree francesi.⁵⁴

Poco dopo la fine della guerra, il 20 gennaio 1919, Sagnac scrive una lettera al vice-rettore della *Faculté des Sciences de Paris* dove il fisico francese lamenta l'interruzione delle sue ricerche a causa della Guerra.⁵⁵ Nella lettera Sagnac informa Lucien Poincaré che "*tout le monde ignore*" il suo lavoro tranne *Monsieur Brillouin* "*qui a bien voulu venir en 1914*" ad esaminare le esperienze "*sur le mouvement de la terre.*"⁵⁶ L'affermazione di Sagnac che i suoi esperimenti riguardassero il movimento della Terra confermerebbe l'ipotesi che il movimento di rotazione del disco fosse una via semplificata per raggiungere lo scopo principale: mostrare il moto relativo tra Terra ed etere. Il fatto che Sagnac ripeté i suoi risultati nella lettera a Lucien Poincaré, fa pensare, inoltre, che questi non fossero noti all'interlocutore.

⁵³ Berthelot, D. (1922) *La Physique et la Métaphysique des Théories d'Einstein* (Paris : Payot & Cie, 1922), p. 9. Il Manifesto di cui parla Berthelot è il *Manifest der 93*, firmato nell'ottobre del 1914 da 93 noti intellettuali tedeschi, tra cui molti scienziati, in difesa delle modalità germaniche nella conduzione della guerra.

⁵⁴ In *SANP* è presente una lunga corrispondenza ufficiale tra Sagnac e le autorità militari. Molti appartenenti alla comunità scientifica francese aiutarono le forze armate. Il matematico Paul Painlevé ricoprì numerose posizioni di governo durante la Guerra: ministro dell'Istruzione e delle Invenzioni, Ministro della Guerra e Primo ministro. Questo doppio ruolo d'importante accademico, membro della sezione di Geometria dell'*AdS* dal 1900, e d'uomo politico favorì il collegamento tra mondo scientifico e militare. Anche il relativista Paul Langevin sviluppò la tecnica per la ricezione e la produzione degli ultrasuoni proprio nel suo lavoro per l'esercito durante la Prima Guerra Mondiale.

⁵⁵ G. Sagnac a L. Poincaré, 20 gennaio 1919, in *Dossier Professionnel de Georges Sagnac, Fond AJ/16/6149, (DPS) Archives Nationales de Paris*. Lucien Poincaré (1862-1920) fu il presidente del consiglio dell'*Université de Paris* con la carica di Vice-rettore dal 1917 al 1920, anno della sua morte. Lucien era cugino di primo grado di Henri Poincaré e fratello di Raymond Poincaré (1860-1934) che era uomo di Stato francese, con la carica di Presidente della Repubblica Francese tra il 1913 e il 1920.

⁵⁶ *Ibid.*, *Monsieur Brillouin* è Louis Marcel Brillouin (1854-1948), professore di Fisica del Globo alla *Faculté des Sciences*. L'esperimento poteva interessargli in quanto simile all'esperienza di Foucault nel dimostrare il moto di rotazione senza bisogno di riferimenti esterni al sistema. Nel programma delle lezioni tra il 1914 e il 1918 di Brillouin, trovato in *Fond Brillouin Marcel degli Archives de l'Académie des Sciences (AAS)*, però, l'esperimento non è citato affatto e ci si sofferma solo sull'esperienza di Foucault.

Nei documenti privati di Sagnac si trovano, infatti, solo due lettere del 1914 che commentano l'esperimento, entrambe provenienti dalla comunità scientifica tedesca.⁵⁷ La più interessante è quella di Bjerknæs in cui il fisico norvegese affermava che lui e Otto Heinrich Wiener (1862-1927) erano perfettamente d'accordo con le tesi del fisico francese: l'apparecchio di Sagnac aveva effettivamente registrato un movimento d'insieme senza l'aiuto di nessun riferimento esterno, ma aggiungeva:

*Quand même [sic] il ne suffira pas pour convaincre les relativistes incarnés [sic] de l'existence de l'éther [sic]. Car les relativistes sont des hommes qui sont en état [sic] de s'imaginer [sic] des ondes que se propagent [sic] dans un milieu [sic] dont ils nient l'existence.*⁵⁸

È evidente in queste parole come, per una parte della comunità scientifica, l'etere continuava ad essere un supporto necessario senza il quale le onde luminose ed elettromagnetiche erano inconcepibili.

La scoperta di Sagnac non era passata inosservata neanche in Francia: Sagnac aveva reso pubblica la sua scoperta con tre articoli nel biennio 1913-14 e con una comunicazione nella seduta dell'*AdS* del 22 dicembre 1913.⁵⁹ Una delle reazioni più entusiastiche apparve lo stesso anno da parte del professore alla *Faculté des Sciences* di Marsiglia, I. Houllevigue. In un riassunto degli avvenimenti nel campo dell'ottica nell'anno 1913, Houllevigue scrisse:

*Le résultat de cette expérience [la scoperta dell'effetto Sagnac] est un des plus importants que l'optique ait enregistrés depuis Fresnel, puisqu'il prouverait indiscutablement l'existence d'un milieu matériels; ainsi se trouverait terminé, en faveur de l'éther, un débat encore très indécis.*⁶⁰

⁵⁷ Lenard a Sagnac, 19 maggio 1914, *SANP*; e Bjerknæs a Sagnac, 1 febbraio 1914, *loc cit.* Entrambe sono risposte a precedenti lettere di Sagnac scritte alla fine del 1913 e contenenti i risultati del suo esperimento.

⁵⁸ Lettera di Bjerknæs a Sagnac, *ibid.* La lettera è scritta a macchina e ho riportato la frase esattamente come appare. Le imperfezioni linguistiche sono dovute in parte ai limiti della macchina da scrivere (sugli accenti di alcune parole) in parte ad errori di Bjerknæs.

⁵⁹ "Académie des Sciences de Paris: Séance du 22 Décembre 1913", *Revue générale des Sciences Pure et Appliquées*, 25 (1914): 38.

⁶⁰ Houllevigue, I. (1914) "Revue d'Optique", *Revue générale des Sciences*, 25 (1914): 440-46, p. 442. L'articolo in questione risulta essere anche una conferma della scarsa attenzione in Francia verso la teoria della relatività ristretta. Houllevigue, infatti, si riferisce alla teoria dell'emissione di Ritz come l'antagonista della teoria dell'etere luminifero, mentre il nome Einstein non viene citato.

Dalla lettera del 1919 è, però, evidente che Sagnac sperava di vedere riconosciuta un'importanza maggiore alla sua scoperta come prova diretta dell'esistenza dell'etere e di ricevere una più grande attenzione riguardo al suo lavoro teorico. La sua teoria non fu mai presa in seria considerazione, tanto che non venne citata nella letteratura scientifica: il lavoro teorico di Sagnac non poteva reggere il confronto con la più completa teoria di Lorentz neanche all'interno della comunità scientifica francese. Inoltre il suo porre l'esperimento come prova della propria teoria potrebbe aver influito sull'accoglienza avuta dall'effetto.

Altro fattore rilevante nella scarsa risonanza dell'effetto fu che esso fu scoperto nei mesi precedenti lo scoppio della Prima Guerra Mondiale. La guerra spostò le ricerche dei fisici verso un'applicazione militare delle loro conoscenze e bloccò il dibattito teorico in Francia oltre che le ricerche sperimentali di Sagnac. Il fisico francese, però, continuò ad elaborare una teoria basata sull'etere meccanico stazionario anche durante il conflitto.

Nella lettera a Lucien Poincaré, scritta subito dopo la fine delle ostilità, Sagnac chiede al suo superiore accademico se pubblicare o meno la propria teoria. Fino ad allora questa non era stata resa nota per due principali motivi: il disinteresse dei colleghi e l'interruzione della ricerca dovuta all'impegno bellico. Sagnac afferma che tale teoria è una riforma della teoria della relatività "*souhaitée par le tant regrette et illustre H. Poincaré...*", cugino dell'interlocutore, e che si opponeva alle "*bizarres hypothèses de Lorentz, Einstein*", che Sagnac associa come se fossero un'unica teoria.⁶¹

Rimandando il lettore al par. 3.14 per una breve discussione del dibattito storiografico sulle teorie di Lorentz, Poincaré ed Einstein le frasi di Sagnac citate mostrano come siano presenti atteggiamenti di protezionismo verso le proprie tradizioni scientifiche nazionali oltre alle questioni puramente fisiche ed epistemologiche. La lettera di Sagnac riconferma, infatti, quanto già affermato da altri studiosi: la comunità scientifica francese era molto legata al nome e alle ricerche di Henri Poincaré e presentava, alla fine del secolo XIX, un atteggiamento molto rispettoso dell'autorità nazionale e scettico verso le nuove teorie.⁶²

⁶¹ Sagnac a L. Poincaré, 20 gennaio 1919, *loc. cit.*

⁶² Vedere per esempio Goldberg (1984), *op. cit.* l'autore del trattato evidenzia l'enorme importanza dell'autorità accademica di Poincaré sullo sviluppo scientifico francese e sulla difficoltà di rapportarsi alle teorie di Einstein da parte della comunità scientifica francese. A mio avviso l'autore, nella sua trattazione sull'accoglienza della teoria della relatività in Francia, concentra troppa attenzione sulla figura di Poincaré non evidenziando delle complessità fondamentali all'interno della comunità scientifica francese che non permisero di cogliere appieno neanche le proposte di Poincaré sul *principe di relativité*. Per un approfondimento della diffusione della relatività in Francia vedere Biezunski, M. (1981) "La Diffusion de la Théorie de la Relativité en France" (Ph.D. thesis, Université de Paris VII,

Il fatto che Sagnac accomuni le teorie di Lorentz ed Einstein contrapponendole a quella del francese Poincaré è di difficile interpretazione considerando che, nel già citato articolo del 1911, si proponeva di contrastare il *principe de relativité* di Poincaré e Einstein. La spiegazione più probabile è che in questa lettera ci sia una forte sottomissione verso l'autorità scientifica nazionale, come dimostrerebbe anche la necessità di avere l'autorizzazione di Lucien Poincaré per pubblicare le proprie teorie. Oltre alla sottomissione all'autorità, è evidente una scarsa comprensione delle differenze tra le teorie di Lorentz ed Einstein che diventano uno stesso nemico da abbattere. Questa confusione, presente anche nelle già citate tesi di Whittaker, non appartiene solo a Sagnac, ma è decisamente diffusa tra i fisici non relativisti del periodo.⁶³

È possibile affermare che i fondamenti della fisica dai quali partiva Sagnac nella costruzione delle sue teorie erano comuni a molta parte della comunità scientifica, soprattutto francese. In particolare, era diffusa l'immagine di un etere costituente fisico del mondo, del tutto simile all'etere di Fresnel, patrimonio della cultura scientifica francese. Nonostante l'adesione ai fondamenti della fisica della propria comunità scientifica, Sagnac si sente isolato e non valorizzato, lasciandoci con alcune domande storiografiche.

Perché la sua teoria non ebbe, in Francia, il riscontro che Sagnac sperava? Perché la teoria di Sagnac non riuscì a competere con la teoria di Lorentz, nonostante l'ultima si discostasse molto dai fondamenti della fisica comunemente accettati in Francia?

Senza dubbio le teorie di Lorentz e di Sagnac non sono neanche paragonabili per coerenza e possibilità di sviluppo euristico, tanto che quella di Lorentz costituisce un vero e proprio programma di ricerca, mentre quella di Sagnac non fu mai citata da altri fisici. Si possono tuttavia considerare altri due fattori per rispondere alle precedenti domande. Per prima cosa è probabile che la teoria di Lorentz fosse ritenuta accettabile perché non rinunciava all'etere, come più tardi farà Einstein. L'etere di Lorentz era molto diverso dall'etere di Fresnel, ma la comunità scientifica francese stava lentamente modificando il proprio approccio a tale immagine grazie all'opera di Henri Poincaré. Il secondo fattore era l'atteggiamento di perplessità della comunità scientifica francese verso teorie nuove non proposte da personaggi autorevoli all'interno dei programmi di ricerca consolidati. Questo

1981). Biezunski affronta anche il tema dell'insegnamento ponendo l'accento sull'importanza che ha, nel considerare l'accettazione di una teoria, il suo utilizzo nella didattica, facendo notare che la relatività entrò nel programma della *Faculté des Sciences de Paris* solo dopo la Seconda Guerra Mondiale.

⁶³ Whittaker, E. (1953) *A History of the Theories of Aether and Electricity: Volume II: The Modern Theories 1900-1926* (London: Thomas Nelson and Sons Ltd, 1953), versione utilizzata (Dover edition, New York: Dover, 1989).

atteggiamento influi senza dubbio sull'accoglienza delle teorie di Einstein, ma si ripercosse anche sulla stessa teoria di Sagnac, che spiegava in termini innovativi l'effetto Fresnel-Fizeau. Ci troviamo di fronte ad un apparente paradosso che dipendeva dai repentini mutamenti propri del periodo rivoluzionario che stiamo trattando. La teoria di Sagnac, reazionaria rispetto a quella di Lorentz, era percepita come nuova e non abbastanza autorevole dagli stessi fisici che vedevano il mondo in maniera più simile a quella di Sagnac che a quella del fisico teorico olandese. Da qui la profonda frustrazione di Sagnac che non si sentiva incoraggiato dalla propria comunità scientifica.

Entro la fine dell'anno successivo, però, dopo aver probabilmente ottenuto il consenso da Lucien Poincaré, Sagnac pubblicò ben otto articoli sui *Comptes Rendus* proponendo la sua teoria della “*mécanique absolue des ondulations*”.⁶⁴

Martinez-Chavanz afferma che il linguaggio di Sagnac è “*de stricte obédience newtonienne, ce qui contraste énormément avec l'époque ou le concept d'éther n'avait presque pas cours [e] fort obscur, même pour l'époque, ambigu et nébuleux*”.⁶⁵

I documenti sopra riportati mostrano che tali affermazioni sembrano rileggere gli avvenimenti da una posizione teorica costituita a posteriori che non considera i fatti in un'adeguata prospettiva storica. Il periodo in cui Sagnac scrive è ancora impregnato, soprattutto in Francia, di un linguaggio in cui alcuni concetti avevano un significato molto diverso da quello attuale. Tra questi concetti quello dell'etere, ora quasi completamente sparito, era tra i più fondamentali ed in molti lo vedevano ancora come una realtà fisica esistente. Lo storico Paty, infatti, afferma che “*It was the question of the physical existence of the ether which was the principal backdrop for considerations of the meaning of experiments*”.⁶⁶

⁶⁴ Sagnac, G. (1919a) “L'éther et Mécanique absolue des ondulations”, *Comptes Rendus*, 169 (1919): 469-71; Sagnac, G. (1919b) “L'éther et Mécanique absolue des ondulations”, *Comptes Rendus*, 169 (1919): 529-31; Sagnac, G. (1919c) “Mécanique absolue des ondulations et Relativité newtonienne”, *Comptes Rendus*, 169 (1919): 643-46; Sagnac, G. (1919d) “Comparaison de l'expérience et de la théorie mécanique de l'éther ondulatoire”, *Comptes Rendus*, 169 (1919): 783-85; Sagnac, G. (1919e) “La comparaison directe des deux mécaniques simultanées de la radiation. Méthode de révélation de la translation de la Terre”, *Comptes Rendus*, 169 (1919): 1027-29; Sagnac, G. (1920b) “Les longueurs d'accès de la radiation lumineuse newtonienne et les zones de silence des signaux amortis de la T.S.F.”, *Comptes Rendus*, 170 (1920): 800-3; Sagnac, G. (1920c) “La relativité réelle de l'énergie des éléments de radiation et le mouvement dans l'éther des ondes”, *Comptes Rendus*, 170 (1920): 1239-42; Sagnac, G. (1920d) “Les deux mécaniques simultanées et leurs liaisons réelles”, *Comptes Rendus*, 171 (1920): 99-102. I primi due articoli furono presentati da Édouard Goursat, membro della sezione di Geometria dell'AdS, ed esponevano tutta la teoria. I successivi erano dedicati al rapporto tra teoria ed esperienze e, in particolare, alla spiegazione dell'esperimento di Michelson-Morley. Essi furono presentati da Gabriel Lippmann, membro della sezione di *Physique générale* dal 1886.

⁶⁵ Martinez-Chavanz (1980), *op. cit.*, pp. 55-6.

⁶⁶ Paty (1987), *op. cit.*, p. 140.

La situazione teorica era, quindi, molto complessa come mostra la stessa parabola di Sagnac nel mondo scientifico e accademico francese: dallo sconforto dopo l'esperimento del 1914 al periodo 1919-1920 che lo vide molto attivo nella proposizione della sua teoria dell'etere meccanico.

Analizziamo ora alcune informazioni in merito ai rapporti che Sagnac aveva con la comunità scientifica francese e, in particolare, con l'*AdS* in questo periodo.

Nel 1917 l'influente istituzione scientifica francese gli conferì il *prix Wilde* di 2000 franchi per il suo lavoro nello sviluppo di tecnologie per le difese militari. Tra il 1914 e il 1916, inoltre, entrò nella redazione del *Journal de Physique*. Questi due avvenimenti lo inserirono maggiormente all'interno della comunità scientifica francese, ma fu decisiva, soprattutto, l'elezione nel 1919 di Daniel Berthelot (1865-1927) a membro dell'*AdS* nella sezione di *Physique générale*.⁶⁷ Daniel Berthelot si mostrò di lì a poco un acceso anti-relativista e promosse il lavoro di Georges Sagnac all'interno dell'*AdS*.

Proprio nel 1919, infatti, la stessa istituzione conferì a Sagnac l'importante *prix Pierson-Perrin*, grazie alla presentazione che di lui fece D. Berthelot. Nelle motivazioni al premio, Berthelot descriveva Sagnac come “*un théoricien aussi original que profond*” e affermava che l'effetto da lui sperimentato era conforme alla teoria dell'etere di Fresnel, costituendone una verifica.⁶⁸

Berthelot riteneva, inoltre, che la teoria elettro-ottica dei corpi in movimento proposta da Sagnac aveva il merito di spiegare nuovi fenomeni senza portare a sconvolgimenti nozionistici:

*Cette synthèse pénétrante, basée sur une analyse délicate des phénomènes et sur une série d'expériences aussi ingénieuses que nouvelles, témoigne d'un effort de pensée puissant, qui, au delà des formules mathématiques, cherche à atteindre la réalité des phénomènes physiques.*⁶⁹

⁶⁷ Berthelot Daniel era il figlio dell'influente fisico e uomo politico Pierre Eugène Marcelin Berthelot (1827-1907), segretario perpetuo dell'*AdS* per le *Sciences physiques* dal 1889 al 1907, nonché donatore della stessa.

⁶⁸ Berthelot et al. (1919) “Prix Pierson-Perrin”, *Comptes Rendus*, 169 (1919): 1227-32, p. 1232.

⁶⁹ *Ibid.*, p. 1231.

In questa frase si presenta una chiara visione epistemologica: per Berthelot la fisica doveva rendere conto della realtà dei fenomeni fornendo spiegazioni che mostrassero i costituenti del mondo fisico e che non fossero puri strumenti matematici. Berthelot non cita le teorie antagoniste che non seguirebbero questo assunto metodologico, ma sembra evidente che si riferisca alle teorie di Lorentz e Einstein che erano viste, invece, come puramente matematiche e lontane dal territorio della realtà dei fenomeni fisici.

Questa posizione era maggioritaria all'interno della comunità scientifica francese e fu una delle questioni che Einstein, con l'aiuto del fisico relativista francese Paul Langevin, affrontò durante le conferenze a Parigi del 1922, sottolineando come le teorie della relatività fossero teorie fisiche e non matematiche né filosofiche.

Dopo le osservazioni di Eddington iniziò, all'interno dell'*AdS* e di tutta la comunità scientifica francese, una lotta tra due posizioni teoriche ed epistemologiche profondamente diverse che si scontravano sui fondamenti della fisica. Le teorie di Einstein erano accolte da una minoranza, mentre una buona parte della tradizione culturale francese era vicina ad una visione simile a quella di Sagnac che, infatti, fu incaricato del primo corso di fisica teorica della *Faculté des Sciences de Paris*, instaurata nel 1920 con il nome di *Physique théorique e Physique céleste*.⁷⁰ In una nota scritta a mano, il fisico francese affermava che questo corso era stato “*créé par la Faculté pour nous permettre de rétablir la vérité des fondateurs de la mécanique de la lumière*”.⁷¹

Ad ulteriore conferma della forte tendenza conservatrice della comunità scientifica francese verso l'etere di Fresnel, il 17 maggio 1920 l'*AdS* conferì a Sagnac il *prix La Caze* per le sue ricerche. Per il francese era il momento più favorevole, ma, nonostante questi riconoscimenti, il suo lavoro continuò a non produrre il dibattito che il fisico francese sperava.

Alla fine del 1921, il segretario perpetuo dell'*AdS* Emile Picard e l'influente matematico ed uomo di stato Paul Painlevé aprirono il dibattito all'interno dei *Comptes Rendus* su quella

⁷⁰ Negli anni in cui Sagnac fu incaricato del corso, i titolari della cattedra furono Aimé Auguste Cotton (1869-1951) fino al 1921 e, poi, Anatole Leduc (1856-1937). Sagnac non fu eletto titolare della cattedra per soli tre voti come si legge in Sagnac, G. (1920a) *Notice sur les Titres et Travaux de M. Georges Sagnac* (Paris: Gauthier-Villars et Cie, 1920); compendio dei suoi titoli e lavori preparato per le future candidature a membro dell'*AdS*.

⁷¹ Commento scritto a mano da Sagnac in una copia di Sagnac (1920a), *op. cit.*, trovata nel *dossier Sagnac* in AAS.

che loro chiamavano semplicemente la *théorie de la relativité*.⁷² Come afferma lo storico Paty, questo considerare la teoria della relatività come un *unicum*

*had to do with an edifice, an architecture marked by the same theoretical logic, the same conceptual innovativeness (in terms of space, time, invariant element), by the same type of connection to experimentation.*⁷³

I due autorevoli scienziati francesi mostrarono il loro scetticismo sui fondamenti delle teorie di Einstein a cui le osservazioni di Eddington avevano dato una decisiva conferma sperimentale e una non meno importante fama internazionale. Picard, in particolare, riteneva la teoria della relatività generale piena di punti oscuri, ma affermava che, a discapito di ragionamenti epistemologici, il compito di indicare il valore di una qualsiasi teoria era affidato agli esperimenti. In questo contesto, Picard richiama l'esperienza di Sagnac aggiungendo: “*il serait intéressant d'expliquer la belle expérience de M. Sagnac au moyen de la théorie générale de la relativité, en allant jusqu'aux concordances numériques*”.⁷⁴

Picard affermò questo dopo aver esplicitamente dichiarato che l'effetto non poteva essere utilizzato contro la teoria della relatività ristretta in quanto inerente a sistemi di rotazione, i quali non rientravano nell'ambito di questa teoria. L'esperimento di Sagnac fu l'unico di cui si chiese una derivazione relativistico-generale ed è probabile che Picard, uno dei massimi esponenti della cultura scientifica francese, lo ritenesse in contraddizione con i principi alla base delle teorie di Einstein.

Possiamo far coincidere l'inizio del dibattito sull'esperimento di Sagnac con la pubblicazione dell'articolo di Picard. Tale dibattito, come vedremo nel prossimo paragrafo, si concluderà pochi mesi dopo.

5.6.3. La derivazione relativistico-generale di Langevin

A dicembre dello stesso anno il principale relativista francese Paul Langevin pubblica il suo primo articolo sull'effetto Sagnac come risposta alla richiesta di Picard.⁷⁵

⁷² Picard, E. M. (1921) “Quelques remarques sur la théorie de la relativité”, *Comptes Rendus*, 173 (1921): 680-82; e Painlevé, P. (1921) “La mécanique classique et la théorie de la relativité”, *Comptes Rendus*, 173 (1921): 677-79.

⁷³ Paty (1987), *op. cit.*, p. 145.

⁷⁴ Picard (1921), *op. cit.*, p. 681.

⁷⁵ Langevin, P. (1921) “Sur la théorie de relativité et l'expérience de M. Sagnac”, *Comptes Rendus*, 205 (1921): 831-34. Langevin si prese il compito di diffondere le teorie di Einstein, sia nei suoi insegnamenti al *Collège de France* sia nella sua attività di ricerca. Con Einstein condivideva anche una visione internazionalista e pacifista della ricerca scientifica e

L'autore inizia la sua trattazione con una difesa della teoria della relatività generale, l'unica a suo avviso in grado di spiegare la maggior parte dei fatti sperimentali conosciuti e di prevedere la deviazione dei raggi luminosi osservate da Eddington. Proprio grazie alla relatività generale, secondo l'autore, è possibile spiegare l'esperienza di Sagnac con l'interpretazione *“la plus simple et la plus conforme à la nature des choses”*.⁷⁶

Prima di addentrarsi nella trattazione matematica dell'effetto all'interno della teoria relativista, Langevin chiarisce che l'esperienza di Sagnac è del tutto differente da quella di Michelson-Morley. In questo modo si pone in netta contrapposizione con chi riteneva che l'esperienza di Sagnac riuscisse a dimostrare al primo ordine quello che l'esperimento di Michelson-Morley aveva negato al secondo ordine: il moto della Terra attraverso l'etere.

Secondo Langevin, l'esperienza di Michelson-Morley *“est du second ordre en fonction de la vitesse de translation”*,⁷⁷ mentre l'effetto Sagnac è del primo ordine rispetto alla velocità di rotazione (ossia rispetto a $\omega R/c$, dove R è il raggio della piattaforma ruotante) *“sur la quelle toutes le théories de l'optique, mécaniques ou relativistes sont d'accord, qualitativement et quantitativement, et qui ne peut témoigner pour ni contre aucune d'entre elles”*.⁷⁸

Per Langevin l'effetto Sagnac è derivabile da tutte le teorie fisiche e la teoria della relatività generale è la più completa descrizione della natura. Il fisico relativista francese considera, quindi, l'effetto in questa cornice *“en y voyant l'influence sur la propagation de la lumière du champ de gravitation particulier aux observateurs liés à la plate-forme en rotation, le même champ qui se manifeste mécaniquement par les effets de force centrifuge ou gyroscopiques”*.⁷⁹

Studiando la simmetria dell'esperimento e dei fenomeni di rotazione in generale, rispetto all'orientamento dell'asse di rotazione, Langevin deduce che gli effetti di contrazione e dilatazione spazio-temporali possono essere solo del secondo ordine in $\omega R/c$ perché le modifiche non cambiano col segno di ω e, in seguito, ricava l'effetto Sagnac.⁸⁰

si adoperò per fargli ottenere una cattedra nel *Collège de France* nel 1933, dopo l'avvento al potere di Hitler. Nel 1937 pubblicò un secondo articolo, sulla derivazione relativista dell'effetto Sagnac: Langevin, P. (1937) “Sur l'expérience de Sagnac”, *Comptes Rendu*, 205 (1937): 304-6; tale articolo era in risposta a Dufour e Prunier che avevano compiuto altri esperimenti del tipo-Sagnac per contrastare la relatività.

⁷⁶ Ibid., p. 831.

⁷⁷ Ibid., p. 832.

⁷⁸ Ibid., pp. 831-2.

⁷⁹ Ibid., p. 832.

⁸⁰ Al primo ordine rispetto a $\omega R/c$, le relazioni tra gli assi saranno quelle della cinematica classica (o meglio pre-relativistica), cioè:

$$x' = x \cos \omega t - y \sin \omega t, \quad y' = x \sin \omega t + y \cos \omega t, \quad z' = z, \quad t' = t. \quad (4.10).$$

Langevin conclude la sua relazione collegando il risultato, ottenuto utilizzando la trasformazione di coordinate senza i termini del secondo ordine in $\omega R/c$ e considerando il tempo invariante $t = t'$, ai potenziali della teoria della relatività generale di Einstein, modificati al primo ordine dalla rotazione del sistema. Langevin pone, poi, l'effetto nell'ambito delle esperienze in grado di verificare la rotazione di un sistema grazie a misure interne allo stesso, come quella del pendolo di Foucault.

La derivazione di Langevin ebbe la conseguenza di privare d'importanza la scoperta dell'effetto togliendogli qualsiasi possibilità di essere un *experimentum crucis* contro le teorie di Einstein: nella Francia di quegli anni non si trova nessun articolo scientifico che contrasti, dal punto di vista teorico, la derivazione di Langevin. Lo stesso Sagnac non rispose mai all'articolo.

Anche gli scettici o i palesemente contrari alle teorie della relatività non basarono le loro critiche sull'esperimento di Sagnac, ma evidenziarono altri tipi di paradossi portando il dibattito a livello epistemologico e di significato più che di rapporto con l'esperienza.

I principali anti-relativisti dell'*AdS*, quali D. Berthelot, Léon Lecornu (1854-1940) e Gabriel Xavier Paul Koenigs (1858-1931) continuarono, probabilmente, a ritenere l'effetto una prova dell'esistenza dell'etere, ma non ritornarono oltre sull'argomento e, secondo lo storico Paty, gli stessi Picard e Painlevé accettarono la spiegazione dell'effetto data da Langevin.⁸¹

È importante, però, evidenziare alcuni elementi che non sono stati sufficientemente presi in considerazione dalla storiografia dell'effetto rispetto a quest'apparente accettazione della derivazione di Langevin in Francia.

In seguito il ragionamento di Langevin introduce la notazione relativistica, però considerando le trasformate (4.10). Nel sistema di riferimento non legato al disco in rotazione, la linea d'universo è:

$$ds^2 = c^2 dt'^2 - dl'^2, \quad \text{dove } dl'^2 = dx'^2 + dy'^2 + dz'^2 \quad (4.11).$$

Nel sistema di riferimento legato al disco in rotazione la linea d'universo diventa:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - 2\omega(ady - ydx)dt - dl^2 \quad \text{dove } dl^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2. \quad (4.12);$$

La propagazione di un raggio luminoso nel sistema di riferimento legato al disco in rotazione corrisponde a $ds^2 = 0$, e, Langevin risolve l'equazione rispetto ai tempi t_1 e t_2 necessari ai due raggi di senso inverso per compiere tutto il percorso ottico racchiudente un'area A .

In questo modo Langevin trova la differenza dei tempi di percorso tra i due raggi co-rotante e contro-rotante rispetto al moto del disco:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{4\omega A}{c^2} \quad (4.13).$$

Questa relazione è esattamente uguale alla relazione dei tempi dell'effetto Sagnac (4.5).

⁸¹ Paty (1987), *op. cit.*, p. 141. Nella letteratura scientifica successiva al 1921 non c'è nulla che contrasti con tale ipotesi, ma neanche qualcosa che la convalidi. Si può affermare solo che l'effetto Sagnac è di rado citato come esperimento contro le teorie della relatività.

L'articolo di Langevin presenta punti oscuri, non è eccessivamente approfondita e fu, a posteriori, criticata. Martinez-Chavanz, per esempio, ha affermato:

*Langevin [...] considère la géométrie spatiale du disque comme étant euclidienne quand en réalité elle est non euclidienne; en outre, il met en lumière la difficulté de définir le temps sur le disque et son identification avec la coordonnée temporelle. [...] la méthode de Langevin [...] est hybride et bâtarde [...]: elle emploie le temps galiléen du laboratoire et les coordonnées spatiales du disque en rotation, même sans tenir compte du facteur $(1 - \beta^2)^{\frac{1}{2}}$ de la contraction de Lorentz et calculées exactement comme en mécanique classique.*⁸²

Nella letteratura contemporanea sull'effetto troviamo altre critiche alla coerenza interna della derivazione di Langevin. Selleri, per esempio, afferma che la sua discussione è “*as much formally self-assured as substantially weak*” e il suo approccio “*is only slightly veiled in relativistic form by some words and symbols, but is really 100% Galilean*”.⁸³

La trattazione relativistica dei sistemi in rotazione ha fatto parte fino ad oggi di un complesso programma di ricerca. Le critiche mosse in seguito a Langevin nacquero tutte nell'ambito del programma di ricerca relativista per una migliore e più coerente spiegazione dei sistemi in rotazione. Nella Francia del periodo, quel programma aveva in Langevin il massimo esponente e gli avversari delle teorie della relatività non parevano avere gli strumenti teorici necessari per contestare la sua derivazione dell'effetto. Tali strumenti teorici, infatti, richiedevano una padronanza delle stesse teorie che non si volevano accettare. La conclusione del dibattito sull'effetto presenta dei punti oscuri non analizzabili come semplice rapporto tra esperimento e teoria. La discussione era fortemente influenzata dalla differenza di linguaggio tra i relativisti e gli anti-relativisti ed era incentrata sui fondamenti piuttosto che sulla verifica sperimentale. Langevin aveva dimostrato che un effetto, scoperto partendo dalla teoria dell'etere immobile, non costituiva anomalia per la teoria della relatività generale. Questo fu, evidentemente, sufficiente per chiudere il dibattito perché la maggior parte dei fisici francesi non aveva gli strumenti per capire e contestare i passaggi di Langevin, e perché la non accettazione della relatività partiva dalle analisi dei fondamenti della fisica e non da questioni sperimentali.

⁸² Martinez-Chavanz (1980), *op. cit.*, p. 147.

⁸³ Selleri (2003), *op. cit.*, p. 59.

4.6.4. Nazionalismo e antisemitismo

La fine del dibattito potrebbe essere derivata anche da una situazione storico-politica nella quale si trovavano l'*AdS* e tutta la comunità scientifica francese.

Un avvenimento del 1922 offre lo spunto per riflettere sull'importanza che avevano valori esterni al dibattito puramente scientifico, quali il nazionalismo, nella storia dell'effetto e dell'accoglienza della relatività in Francia. Einstein, nell'aprile del 1922, tenne a Parigi alcune conferenze sulle sue teorie, dopo aver vinto il premio Nobel l'anno precedente. Biezunski, che ha studiato la cornice storico-politica della visita di Einstein a Parigi, evidenzia la presenza di forti sentimenti anti-tedeschi negli anni successivi alla Prima Guerra Mondiale.⁸⁴ Tali sentimenti attraversavano tutta la società, compresa la comunità accademica, come dimostra *l'affaire de l'Académie des Sciences*: trenta dei suoi membri avevano deciso di alzarsi e uscire all'entrata di Einstein nel salone dell'*AdS*. L'azione alla fine non fu compiuta perché Einstein, una volta saputo, decise di non presenziare. Biezunski ascrive l'episodio ai sentimenti anti-germanici. È una spiegazione condivisibile anche se ritengo presente anche una sorta di osteggiamento verso Einstein in quanto ebreo.

Il creatore delle teorie della relatività aveva rinunciato alla nazionalità tedesca, ma molti francesi lo ritenevano egualmente un esponente di spicco della comunità scientifica germanica. Egli era da considerarsi, perciò, il primo scienziato tedesco ad essere invitato a Parigi dopo la Prima Guerra Mondiale. La sua presenza nella capitale avrebbe potuto riavvicinare le comunità scientifiche francesi e tedesche allontanatesi dal 1914 per l'attiva partecipazione degli scienziati delle due nazioni allo sviluppo militare.

Nella conferenza al *Collège de France* del 3 aprile 1922, i presenti avevano uno spazio per sollevare domande o perplessità in merito alle sue teorie: Sagnac colse l'occasione e prese la parola per oltre un'ora attaccando Einstein in maniera molto aggressiva.⁸⁵ L'unico articolo dell'epoca che riferisce l'avvenimento afferma che Einstein e gli stessi fisici francesi preferirono continuare dopo tale attacco come se niente fosse successo.

Gli scienziati francesi che proseguirono il discorso con Einstein durante le sue conferenze parigine non citarono più l'effetto Sagnac. Le frange meno estremiste della comunità accademica francese vedevano nella visita di Einstein qualcosa che andava al di là del

⁸⁴ Biezunski, M. (1991) *Einstein à Paris. Le Temps n'est plus...* (Saint Denis: Presse Universitaires de Vincennes, 1991).

⁸⁵ Pomey, J.-B. (1922) "Les Conférences d'Einstein au Collège de France", *Le Producteur*, 8 (1922): 201-6. Episodio citato anche in Biezunski, (1991), *op. cit.*, p. 20.

semplice evento scientifico: era un atto diplomatico che apriva le porte ad una ricostituzione di una comunità scientifica internazionale che la guerra aveva profondamente segnato.

L'atteggiamento eccessivamente polemico di Sagnac ne causò, probabilmente, l'emarginazione dalla comunità scientifica francese, se si eccettua l'amico Daniel Berthelot, che continuò a ritenere l'esperimento del 1913 una confutazione delle teorie della relatività. L'unico fisico francese, infatti, che continuerà a citare, negli anni '20, l'effetto Sagnac come problema per le teorie di Einstein è Carvallo, le cui note sui *Comptes Rendus* furono presentate sempre da Berthelot.⁸⁶

Berthelot fu, dal 1919 al 1927, uno dei sei membri della sezione di *Physique générale* dell'*Académie*, quindi un'autorità nella statica comunità scientifica francese, ma la sua autorevolezza si accompagnava ad atteggiamenti estremi: è proprio dallo studio di alcune sue opere che si evince come, all'interno dell'élite culturale francese, aleggiasse nei confronti di Einstein un sentimento antisemita, oltre che anti-germanico.

Nel suo libello *La Physique et la Métaphysique des Théories d'Einstein*, dai toni evidentemente sarcastici, Berthelot critica le teorie della relatività, facendo riferimento alle loro conseguenze metafisiche “*neuves et de grande portée*”.⁸⁷ Berthelot somma all'attacco scientifico, basato su una profonda differenza sui fondamenti della fisica, un forte attacco personale fondato su pregiudizi razziali. Berthelot attacca Einstein per la sua rinuncia alla nazionalità tedesca e si chiede di che nazionalità egli si senta. Tutto questo per arrivare alla conclusione che Einstein:

Au vrai, c'est un israélite, et qui, comme beaucoup de ses coréligionnaires, n'attache qu'une importance limitée à l'idée de patrie. Ces précisions ne sont pas inutiles. Elles situent dans l'espace et le temps ce grand négateur de l'espace et du temps. C'est un représentant typique de cette race juive, si orgueilleusement regardée par ses fils comme la race élue de Dieu, si passionnément vilipendée par ses adversaires; race attirante et décevante à la fois; race troublante et troublée, dans le cerveau de laquelle se mêlent en une fumeuse ivresse les élans frénétiques des anciens prophètes, les rêves messianiques [...] De cette race est Einstein.

⁸⁶ Carvallo, M. E. (1921) “L'électromagnétisme et le principe de relativité”, *Comptes Rendus*, 173, (1921): 1155-57. Da notare, comunque, che anche l'articolo di Carvallo è precedente all'episodio sopra riportato.

⁸⁷ Berthelot (1922), *op. cit.*, p. 8. È da notare che tale libro fu pubblicato lo stesso anno in cui Einstein tenne le sue conferenze a Parigi.

*Indifférent à l'idée de patrie, le mouvement sioniste le passionne. En ses théories se reflètent les audaces de la pensée sémite, peut-être ses illusions et ses chimères.*⁸⁸

In questo discorso è malamente celato quel razzismo scientifico che sarà reso esplicito in Germania dalla *Deutsche Physik* durante la dittatura nazionalsocialista. Nelle parole di Berthelot appare il legame indissolubile tra il suo pensiero scientifico e la sua visione del mondo profondamente nazionalista: l'immagine della patria si sovrappone costantemente al concetto di spazio ed è evidente l'astio verso l'internazionalismo e il sionismo che il fisico francese vedeva incarnati dalle posizioni di Einstein. Il rapporto tra Sagnac e Berthelot porta ad ipotizzare l'esistenza di una frangia intellettuale che considerava con astio non solo la fisica di Einstein, ma anche lo stesso autore della teoria. L'aggressività dell'attacco di Sagnac e la decisione da parte di trenta membri dell'*AdS* di lasciare la sala nel momento in cui Einstein avesse tenuto la conferenza prevista nell'importante istituzione parigina, confermerebbero questa lettura.

Tra la fine della Prima Guerra Mondiale e la presa di potere di Hitler in Germania nel 1933, si riscontrano all'interno delle comunità scientifiche dei diversi Paesi due atteggiamenti: uno fortemente nazionalista, l'altro universalista. In Francia questi opposti atteggiamenti furono incarnati, rispettivamente, da Berthelot e da Langevin. Quest'ultimo instaurerà con Einstein un'amicizia duratura fondata su comuni visioni politiche e scientifiche. Al contrario, Berthelot considererà la teoria di Einstein come un attacco alle basi di un modo di pensare e fare cultura. Questi eccessi non sono stati seguiti, o almeno non sono stati esplicitati in maniera visibile, dalla maggioranza dei fisici francesi. Questa può essere una spiegazione del perché un uomo di stato come Painlevé, nonché uno degli scienziati più scettici verso le teorie della relatività, dopo la derivazione di Langevin non usò l'effetto Sagnac contro quest'ultima. L'aggressività dell'attacco di Sagnac nei confronti di Einstein, durante la conferenza del 3 aprile al *Collège de France*, lasciò interdetto il padre della relatività che, al contrario, rispose in maniera convincente ed esaustiva a tutte le altre obiezioni sollevate dagli scienziati presenti in sala.⁸⁹

Dopo la Prima Guerra Mondiale il desiderio di ritorno alla normalità e il ruolo assunto da Einstein di ponte d'unione delle separate comunità scientifiche francese e tedesca possono

⁸⁸ Ibid., pp. 9-11.

⁸⁹ Nordman, C. (1922) "Einstein Expose et Discute sa Théorie", *Revue des deux mondes*, 9, (1922): 129-66.

essere elementi non secondari nella perdita di rilevanza dell'effetto nella Francia degli anni '20. Sembra che l'effetto abbia seguito lo stesso destino dell'uomo Sagnac, progressivamente privato di un qualsiasi peso all'interno della comunità scientifica francese.

4.6.5. La caduta di Sagnac

Dopo il 1922, Sagnac pubblicò pochi articoli, tutti presentati da Daniel Berthelot e rese sempre più manifesta la sua avversione per la relatività trovandosi sempre più isolato in questo atteggiamento. Altri avvenimenti della vita di Sagnac c'illuminano sulla dinamica della comunità scientifica francese rispetto alle teorie della relatività.

Nel 1923, dopo la morte di Edmond Bouty (1846-1922), Sagnac e Langevin proposero entrambi la loro candidatura a membri dell'*AdS* nella sezione di *Physique générale*: Langevin fu presentato in terza linea, mentre Sagnac non fu presentato affatto. All'elezione vinse Jean Perrin che era, secondo le parole di Jean Langevin, un “*partisan de la relativité*”.⁹⁰

La successiva elezione per sostituire il defunto Jules Louis Gabriel Violle (1843-1923) avvenne alla fine dello stesso anno. Langevin, presentato da Marcel Brillouin, era in seconda linea e Sagnac, presentato da Berthelot, era in terza linea. Solo dopo un richiamo del segretario perpetuo Picard, che contestò la presenza di due scienziati collocati scorrettamente in prima linea, Langevin venne retrocesso in terza linea insieme a Sagnac.

Poco dopo l'elezione Berthelot comunicò a Sagnac l'apprezzamento che i membri dell'*AdS* avevano espresso nei confronti delle sue ricerche e, in particolar modo, dell'esperimento compiuto nel 1913. Le parole di Berthelot erano le stesse della relazione del *prix Pierson-Perrin* e riaffermavano che l'esperimento di Sagnac dimostrava l'esistenza dell'etere di Fresnel.⁹¹

A parte le parole di Berthelot e le sue personali convinzioni, l'autorità di Langevin, già nel 1923, era evidentemente maggiore di quella di Sagnac, ma l'*AdS* in queste due elezioni scelse un atteggiamento cauto. Elasse due nomi d'indubbia autorevolezza scientifica che non avevano nelle loro ricerche alcun rapporto con le teorie della relatività.⁹² È da notare

⁹⁰ Nota manoscritta di Langevin, N. “A proper du séjour d'Einstein en France organisé par P. Langevin au printemps de 1922”, trovata in *Archives Langevin* posseduto dall'*ESPCI* di Parigi.

⁹¹ D. Berthelot a Sagnac, 26 maggio 1923, *SANP*.

⁹² Per una trattazione dell'accoglienza della relatività in Francia contemporanea agli avvenimenti vedere Fabré, L. (1921) *Les Théories d'Einstein - Une Nouvelle Figure du Monde* (Paris: Payot & Cie, 1921). Nella trattazione delle

che Langevin stesso fu presentato da Marcel Brillouin, nonostante questi fosse tra i più scettici rispetto alle teorie relativiste. Nella presentazione all'*AdS* della vita e dei lavori scientifici di Langevin, infatti, non si pose affatto l'accento sulla sua opera di relativista, ma sui lavori al servizio della patria durante la guerra e su quelli di fluidodinamica. Berthelot, al contrario, evidenziò proprio il lavoro anti-relativista di Sagnac e l'importanza del suo esperimento.

Dopo il 1922 lo stato di salute di Sagnac peggiorò costringendolo a restare lontano da Parigi. Ciò compromise il regolare svolgimento delle sue lezioni presso la *Faculté des Sciences*.⁹³ Questo porterebbe a dubitare dell'affermazione di Biezunski che Sagnac influì sull'educazione della futura classe scientifica ed a figurarsi, piuttosto, un fisico solitario che, vedendo la sua visione del mondo man mano sconfitta da un'altra di cui non apprezzava nulla, si rintanava nelle sue dimore di Meudon lontano da Parigi.⁹⁴

Il peggioramento dello stato di salute lo porterà ad abbandonare completamente l'università nel 1926 e alla morte nel 1928. Sono molto poche le lettere ricevute in questo periodo che si trovano tra le carte conservate dal fratello, ed una sola fra queste è di condoglianze, da parte di Bjerknes. Si presume che molte lettere siano andate perse, tuttavia la differenza di quantità di corrispondenza tra il periodo anteguerra e quello successivo al 1920 è notevole.

Langevin diverrà membro dell'*AdS* nel 1934, un anno dopo l'elezione di Einstein a membro straniero della stessa. Queste date possono essere ritenute un passaggio essenziale nella storia della relatività in Francia: da questo momento la massima istituzione scientifica aveva ammesso al proprio interno il creatore della nuova visione teorica e il suo massimo esponente francese. Questa volta, nella presentazione dei titoli e lavori scientifici di Langevin, la spiegazione relativistico-generale dell'effetto Sagnac è presente, al contrario della precedente.⁹⁵

opposizioni alla relatività in Francia, all'interno del libro di Fabré, Sagnac non viene neanche nominato. Si riconosce un certo interesse, infatti, solo alle teorie di Guillame e Varcollier.

⁹³ Varie comunicazioni al *Le Doyen de la Faculté des Sciences*, *DPS*.

⁹⁴ Biezunski (1991), *op. cit.*

⁹⁵ Langevin, P. (1934) "Notice sur les Travaux Scientifiques" (Paris: Société Générale d'imprimerie et d'édition, 1934).

4.7. Conclusioni

L'effetto Sagnac s'insertò nel programma di ricerca relativista sui sistemi in rotazione anche prima della sua scoperta: all'interno di questo programma è esistito, ed è tuttora presente, un dibattito su quale sia la derivazione più consistente e, in modo particolare, se quella in relatività ristretta sia valida. La lettura che Sagnac fece del suo esperimento come prova dell'esistenza dell'etere luminifero ha, invece, trovato scarso seguito all'interno della comunità scientifica. Nel periodo in cui Sagnac fece il suo esperimento solo in Francia esso costituì, per alcuni, una prova contro le teorie di Einstein. Nel dibattito riguardante l'effetto si scontrarono, più che due teorie, due diverse concezioni del mondo e della fisica. Sagnac non poteva rinunciare al concetto di etere come reale sostegno delle onde luminose e tale visione si inseriva perfettamente in un ambiente, quello francese, che rimaneva legato all'etere teorizzato da Fresnel.

Il dibattito relativista in Francia, poi, si ampliava con elementi epistemologici, quando non con extra-scientifici come il nazionalismo e, in misura minore, l'antisemitismo, evidenti durante il viaggio di Einstein a Parigi nel 1922.

Il dibattito sull'effetto trovò una conclusione con la derivazione compiuta nel 1921 dal maggior relativista francese, Paul Langevin, all'interno della teoria della relatività generale. Le critiche alla spiegazione di Langevin furono di molto successive e, per la maggior parte, interne allo stesso programma di ricerca relativista. Dal punto di vista teorico la spiegazione di Langevin non fu contestata perché utilizzava termini che non erano ancora in possesso dei contemporanei fisici francesi. È probabile che la spiegazione di Langevin non fosse capita dai contemporanei francesi, come pare confusa la comprensione delle teorie relativiste. Nel passaggio rivoluzionario pochi scienziati riuscirono a compiere velocemente quella traduzione di linguaggi che portarono al radicale mutamento delle nozioni di spazio, di tempo e d'onda elettromagnetica.

In questo clima di profondo cambiamento che, secondo Daniel Berthelot, portava con sé una nuova metafisica, l'effetto Sagnac risultò sicuramente di secondo piano rispetto alla capacità di Einstein di rendere conto dell'esperimento di Michelson-Morley e alle sue risposte in merito alle difficoltà epistemologiche. Einstein compì uno sforzo per calarsi nelle concezioni dei suoi ospiti, facendo opera di divulgazione e scegliendo gli argomenti che potevano essere più facilmente intesi in base alla cultura e al linguaggio degli scienziati

francesi. In questo possiamo vedere la volontà di Einstein, aiutato da Langevin, di non mettersi in contrapposizione, ma in atteggiamento di ascolto delle culture altrui così da far comprendere la propria visione come un approfondimento delle precedenti teorie e non come uno stravolgimento delle stesse, ottenendo anche commenti positivi dalla stampa non specialistica:

*The press releases of his public lecture of March 31 at the Collège de France were almost unanimous: Einstein was understandable! Almost everybody admired the way he developed his ideas, his clear mind the slow but good French he spoke, etc.; and almost everybody had the feeling of having understood something of his conceptions.*⁹⁶

È possibile, inoltre, che la derivazione di Langevin in Francia non fu contestata anche per motivi politici. La visita di Einstein a Parigi costituì una possibilità di riavvicinamento delle comunità scientifiche francese e tedesca dopo la Prima Guerra Mondiale e, perciò, molti scienziati francesi la considerarono un evento diplomatico. Sagnac e il suo esperimento rimasero, invece, dall'altra parte della barricata, separati da Einstein da un muro di concezioni metafisiche e politiche, oltre che scientifiche. È probabile che sia stata l'incapacità di Sagnac di modulare i toni del proprio discorso ad emarginare *in primis* la sua figura e, di conseguenza, le sue ricerche.

In conclusione abbiamo visto che, una volta che si consideri la storia della prassi scientifica, il rapporto tra teoria ed esperimento è molto più complesso di quello implicito nel falsificazionismo popperiano. La storia della fisica può, quindi, essere arricchita da considerazioni extra-scientifiche, illuminanti soprattutto riguardo a rapporti tra teorie ed esperimenti altrimenti non limpidi nella loro evoluzione storica, ancor più nei periodi di rivoluzioni concettuali.

⁹⁶ Biezunski M. (1987) "Einstein's Reception in Paris in 1922" in Glick, T. (ed.) *The Comparative Reception of Relativity, Boston Studies in the Philosophies of Science*, V. 103, (Dordrecht: Reidel, 1987): 169-87, p. 184.

Capitolo 5

Miller e gli esperimenti di *ether-drift* in USA (1902-1933)

5.1. Introduzione

Nel 1925 Dayton C. Miller annunciò in due meeting svoltisi negli USA che il suo interferometro aveva mostrato un effetto corrispondente a un vento d'etere di circa 10 km/s. L'esperimento di Miller era una ripetizione dell'esperimento di Michelson-Morley e il suo risultato si opponeva a quello dei suoi predecessori e, conseguentemente, contraddiceva le previsioni della teoria della relatività ristretta.

Abbiamo visto nel capitolo 2 come il caso Miller sia affrontato dalla storiografia contemporanea e come esso costituisca un esempio interessante per alcuni filosofi della scienza. Loyd Swenson, nel noto trattato *Ethereal Ether*, ha analizzato la storia degli esperimenti di Michelson-Morley fino al 1930 e, quindi, una buona parte di questo capitolo è una revisione della sua precedente trattazione.¹ Il libro di Swenson presenta delle forti ambiguità soprattutto per il suo utilizzo acritico dell'articolo conclusivo di Miller scritto nel 1933 (vedi par. 2.6.1).² Il libro di Swenson lascia priva di risposta, in modo particolare, una delle domande storiografiche fondamentali della presente tesi, ossia quale sia stata la reazione della comunità scientifica statunitense agli annunci di Miller.

Questo quesito rimane senza soluzione anche considerando la storiografia riguardo tale caso nella sua completezza. Da un lato, alcuni danno credito all'affermazione che “*nobody doubted relativity*” e che tutti i fisici erano convinti che “*some unknown source of error [...] had upset Miller's work*”.³ Dall'altro, alcuni eventi contemporanei o immediatamente successivi agli annunci del risultato di Miller fanno ritenere che l'accoglienza di tali

¹ Swenson Jr., L. S., (1972) *The Ethereal Ether: A History of the Michelson-Morley Aether-Drift Experiments, 1880-1930* (Austin /London: University of Texas, 1972).

² Miller, D. C. (1933) “The Ether-Drift Experiment and the Determination of the Absolute Motion of the Earth”, *Reviews of Modern Physics*, 5 (1933): 203-42.

³ Darwin, C. G. (1939) “Logic and Probability in Physics”, *Philosophy of Science*, 6 (1939): 48-64, p. 51. Le affermazioni di Darwin trovarono poi eco in Polanyi, M. (1951) *The Logic of Liberty: Reflections and Rejoinders* (London: Routledge and Kegan Paul Ltd, 1951), p. 12; e in Clark, R. W. (1973) *Einstein, the Life and Times* (London: Hodder and Stoughton, 1973), p. 316.

esperimenti fu molto più complessa di come riportato da Darwin. Per citare solo gli eventi più rilevanti che mostrano un'accoglienza positiva:

- l'importante istituzione *American Association for the Advancement of Science (AAAS)* diede a Miller un premio di 1.000 \$ per la sua relazione sugli esperimenti di *ether-drift* come miglior articolo proposto al meeting del 1925;
- molti fisici, tra cui lo stesso Michelson, iniziarono a ripetere l'esperimento di Michelson-Morley, con apparati di grande precisione, per sottoporre a verifica le conclusioni di Miller;
- il direttore di *Science Service*, Edwin E. Slosson, scrisse ad Einstein che la relazione di Miller "made a deep impression upon the National Academy of Sciences (NAS) when it was read [al meeting dell'aprile 1925]".⁴

Nel mio approccio storiografico di considerare gli esperimenti di Miller all'interno del processo di ricezione delle teorie della relatività, la parabola della valenza dei risultati di Miller può rappresentare un esempio dei cambi repentini che la comunità scientifica statunitense visse nel periodo dagli anni '20 agli anni '50.

In questo capitolo affronterò la prima parte di tale cambio, quella che va dalle prime ripetizioni dell'esperimento di Michelson-Morley, compiuti da Miller e Morley all'inizio del 1900, fino agli anni '30, quando la maggior parte dei fisici smise di dare credito alle conclusioni di Miller.

Vedremo come in tale ambito giocarono diversi fattori che riportano al centro dell'interesse alcune domande storiografiche: Come e quando l'esperimento di Michelson-Morley si concluse?⁵ Quando e perché i risultati di Miller vennero definitivamente accantonati? Quali furono i fattori determinanti nella definitiva accettazione (se di definitiva si può parlare) del risultato nullo dell'esperimento di Michelson-Morley? Quali furono le peculiarità della reazione della comunità scientifica statunitense agli annunci di Miller rispetto a quelle delle principali comunità scientifiche europee? Quale ruolo giocarono elementi sociologici nella reazione statunitense?

⁴ Edwin E. Slosson a Einstein, 26 giugno 1925, *Collected Papers of Albert Einstein (CPAE)* 17 259 per concessione di Einstein Paper Project (EPP), *California Institute of Technology (Caltech)*, Pasadena, California.

⁵ Questa domanda è stata espressa, per altri casi storici, in Galison, P. (1987) *How Experiments End* (Chicago: University of Chicago Press, 1987).

Altre domande, poi, sorgono in relazione alle analisi epistemologiche di questo soggetto: Quali erano le caratteristiche delle diverse ripetizioni di uno stesso esperimento e in cosa l'esperimento di Miller risultò significativamente diverso dagli altri?⁶ Quale comportamento potrebbe essere chiamato razionale e quale irrazionale nella storia correlata agli esperimenti di Miller?

La storia degli esperimenti di Miller, delle ripetizioni successive, e del cambio di prospettiva da parte della comunità scientifica statunitense sarà un esempio di come tale risposte non possono avere, in questo caso come in altri, risposte metodologiche ferree e indipendenti dal comportamento sociologico di una comunità scientifica nazionale all'interno di un processo di sviluppo internazionale.

Come nel caso trattato nel precedente capitolo, anche negli USA ci fu la tendenza a riferirsi alla teoria della relatività senza fare distinzioni tra generale e ristretta negli anni appena successivi agli annunci di Eddington. Anche in questo capitolo, quindi, ci si riferirà alla relatività come a quella visione del mondo, percepita come *unicum*, che si contrapponeva a quella newtoniana, in particolar modo riguardo alle concezioni di spazio, tempo, radiazione e materia.

⁶ Un'interessante analisi dell'ultima domanda è proposta in Laymon, R. (1980a) "Independent Testability: The Michelson-Morley and Kennedy-Thorndike Experiments", *Philosophy of Science*, 47 (1980): 1-37.

5.2. Esperimenti di Morley-Miller (1902-1906)

I fatti che portarono Morley e Miller a riprendere all'inizio del XX secolo l'esperimento di Michelson-Morley con un nuovo interferometro (vedi fig. 5.1) sono ben descritti da Swenson.

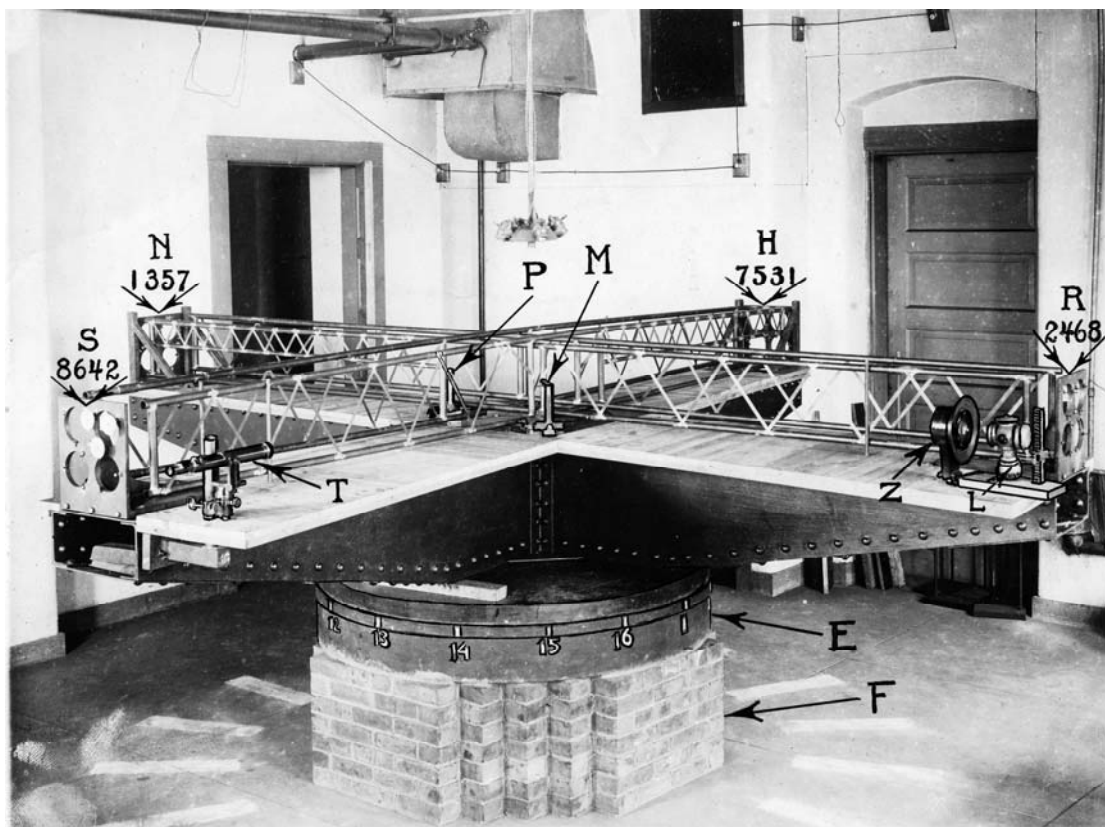


Figura 5.1. Interferometro usato da Morley e Miller a Cleveland nel 1904 e 1905, con alcune annotazioni scritte da Miller. Foto mandata a Arvid Reuterdaahl (1876-1933), in Arvid Reuterdaahl Papers, per concessione della *University of St. Thomas, Special Collections*.

Il contesto teorico delle ricerche di Morley e Miller era la teoria dell'etere di Lorentz e il loro proposito dichiarato fu quello di scoprire se la contrazione di Lorentz-Fitzgerald fosse uguale per differenti materiali, quali legno, acciaio e arenaria (utilizzata nell'originale esperimento di Michelson-Morley).

Al contrario delle precedenti versioni dello stesso esperimento compiute da Michelson nel 1881 e nel 1887 (con Morley), questi esperimenti non sono molto conosciuti e Swenson ha utilizzato, per tracciarne la storia, l'articolo di Miller del 1933 come fonte principale.

In tale articolo, Miller produsse una storia degli esperimenti del tipo Michelson-Morley dal 1887 a quelli da lui stesso realizzati negli anni '20. La trattazione degli esperimenti di Morley-Miller del periodo 1902-06 è senza dubbio accurata, ma giocava, all'interno dell'articolo, un ruolo di sostegno alle argomentazioni sull'esistenza dell'effetto di *ether-drift*. Miller, infatti, rilesse i risultati degli esperimenti compiuti a Cleveland dal 1887 al 1906 con la convinzione che questi confermassero la presenza di un vento d'etere di circa 10 km/s periodico rispetto al tempo siderale. Questa congiunzione tra narrazione storica e finalità teoriche non permette che si accetti tale esposizione senza un ulteriore studio delle fonti primarie.

La ripetizione dell'esperimento di Michelson-Morley aveva un significato considerevole nello sviluppo pre-relativistico delle teorie dell'etere e, anche se Morley e Miller avevano dichiarato esplicitamente che il loro obiettivo era scoprire se la contrazione di Lorentz-Fitzgerald cambiasse con i diversi materiali utilizzati, i due sperimentatori arrivarono ad una conclusione molto più generale: “*there is no drift of the ether at the place of the interferometer is mounted*”.⁷

Tale frase significava, per i due scienziati, semplicemente che non c'era segno di *ether-drift* nel seminterrato della *Case School of Applied Science* a Cleveland. Essi pensarono, quindi, alla possibilità di verificare la presenza di un qualche *ether-drift* in altri luoghi, ipotizzando che le pareti del seminterrato stessero trainando l'etere all'interno della stanza.

La ricerca di Morley e Miller di questo periodo partiva da due semplici e abbastanza esplicite assunzioni:

- 1) l'originale esperimento di Michelson-Morley del 1887 aveva ottenuto un risultato *nullo*;
- 2) il valore aspettato di *ether-drift* derivava dalle, allora accettate, misure della velocità orbitale della Terra intorno al sole (di circa 30 km/s) e del moto cosmico del sole (con velocità di 19 km/s verso la costellazione di Ercole).

⁷ Morley, E. W., e Miller, D. C. (1905b) “Report of an Experiment to Detect Change of Dimension of Matter Produced by its Drift through the Ether”, *Science*, 21 (1905): 339 [enfasi mia]. Gli autori resero pubblici i risultati dei loro esperimenti anche in Morley, E. W., e Miller, D. C. (1905a) “Report of an experiment to detect the Fitzgerald-Lorentz Effect”, *Philosophical Magazine*, 9 (1905): 680-85.

Tali premesse teoriche fecero sì che i due sperimentatori interpretassero i risultati degli esperimenti compiuti a Cleveland nel 1905 come una conferma del precedente risultato nullo del 1887.

Miller e Morley pianificarono, quindi, ulteriori osservazioni sulla cima degli Euclid Heights, nelle vicinanze di Cleveland, all'altezza di 870 m sopra il livello del mare. Nel 1906 compirono in tale luogo un numero molto ridotto di osservazioni di cui pubblicarono solo un breve resoconto. Questo si concluse con la netta affermazione: “*the temperature effects could never be entirely eliminated. The conclusion [...] is that there was no indication of a drift of the ether [...]*”, infatti il risultato fu solo “*one eightieth part of the whole*”.⁸

Molto tempo dopo, però, Miller riportò che questi esperimenti avevano mostrato un “*very definite positive effect*”.⁹ Questo piccolo effetto, insieme con il fatto che Michelson e Morley non avevano mai ripetuto l'esperimento in diverse stagioni dell'anno, giocò un ruolo fondamentale nella decisione di Miller del 1920 di ripetere gli esperimenti di Michelson-Morley ad un'altezza molto più elevata.

⁸ Morley, E. W., e Miller, D. C. (1907) “Final Report on Ether-Drift Experiments”, *Science*, 25 (1907): 525.

⁹ Miller (1933), *op. cit.*, p. 217, frase riportata anche in Swenson (1972), *op. cit.*, p. 153.

5.3. Le prime osservazioni di Miller al *Mount Wilson Observatory* (1921)

5.3.1. La preparazione

Tra il 1906 e il 1921 esperimenti del tipo Michelson-Morley (in seguito chiamerò MM tali esperimenti, mentre mi riferirò con MMX all'esperimento di Michelson-Morley del 1887) non furono mai ripetuti, il risultato nullo era diffusamente accettato, e l'esperimento non faceva parte di nessun programma di ricerca scientifico. Morley era andato in pensione nel 1907, mentre Miller si era dedicato alle ricerche in acustica di cui era diventato un'indiscussa autorità presso la comunità scientifica statunitense.

Il presunto piccolo risultato positivo dei precedenti esperimenti di Morley-Miller divenne importante solo dopo gli annunci di Eddington del novembre 1919 in favore della teoria della relatività generale che resero il nome di Einstein e la sua teoria enormemente famosi (vedi par. 3.15). Solo dopo che la campagna stampa successiva alle dichiarazioni degli astronomi britannici ebbero portato la teoria della relatività generale al centro del dibattito culturale e scientifico internazionale, Miller riaffermò che gli esperimenti MM compiuti a Cleveland non avevano mai espresso un risultato esattamente nullo.

Lo stesso Miller scrisse che fu l'accoglienza positiva ricevuta dalla relatività ad indurlo a riesumare gli esperimenti di *ether-drift* “*since the Theory of Relativity postulates an exact null effect from the ether-drift experiment which had never obtained in fact*”.¹⁰ Swenson riassume bene i principali fattori che spinsero Miller ad intraprendere la ripetizione dell'esperimento MM: il “*ballyhoo of 1920 in the yellow press*” e “*the half-truths and falsehoods about the Michelson-Morley experiment which had become common currency among his fellow physicists*”.¹¹

Con queste parole, Swenson sembra generalizzare le impressioni e le motivazioni di Miller, come se questi fossero fatti oggettivi; in altre parole, Swenson compie una riproposizione del caso Miller dal punto di vista dello stesso Miller senza un'analisi critica della sua visione.

L'uso eccessivo dell'articolo di Miller (1933) ha portato Swenson non solo a fornire una deformata versione della storia, ma anche a scrivere alcune imprecisioni nella narrazione

¹⁰ Miller (1933), *op. cit.*, p. 217. Lo studente di Miller, Douglas L. Darnell ricordò che “[Miller] said that Einstein had based his theory on incomplete experimental data and that he would have to get busy and complete the aether-drift”. Darnell a Shankland, 10 aprile 1963, Cleveland, *Case Western Reserve University (CWRU) Archives*, Robert S. Shankland Papers (RSP), A 08-19, box 1.

¹¹ Swenson (1933), *op. cit.*, p. 191.

degli eventi. Swenson, infatti, ha affermato che l'iniziativa di invitare Miller a ripetere l'esperimento MM al *Mount Wilson Observatory (MWO)* fu del suo allora direttore George Ellery Hale (1868-1938). Al contrario, Crelinsten riporta che fu Miller a chiedere a Hale di ripetere tali esperienze al *MWO* per la sua elevata altitudine (circa 1700 m sopra il livello del mare).¹²

La versione di Crelinsten è confermata da alcune lettere che chiariscono l'andamento degli eventi. Nell'aprile del 1920 Miller andò a Philadelphia con la precisa intenzione di chiedere a Hale l'ospitalità per la ripetizione dell'esperimento MM recando seco alcune foto dell'interferometro usato da lui e Morley nei precedenti esperimenti.¹³ Prima di accettare la richiesta di Miller, Hale chiese consiglio a Michelson, il quale era diventato ricercatore associato del *MWO* dal 1919, se accettare o meno la proposta di Miller.¹⁴ La risposta di Michelson, per come venne riportata da Hale, fu scettica:

*While [Michelson] sees no objection, he doubts whether we would be justified in going to the necessary expense, because he understood from Professor Morley that the last results obtained were almost certainly due to temperature changes.*¹⁵

Hale seguì il consiglio di Michelson: accettò di ospitare gli esperimenti di *ether-drift* di Miller, ma senza aiuti finanziari.¹⁶ Tali avvenimenti portano alla prima domanda sul rapporto della comunità statunitense con gli esperimenti di Miller: chi erano gli scienziati realmente interessati a tali esperimenti nel 1920?

Miller, nelle sue lettere del periodo, dichiara esplicitamente di avere l'approvazione di Michelson e di Larmor, entrambi d'accordo sull'importanza dell'esperimento. Le parole di Michelson sopra riportate sembrano indicare che costui non fosse poi così interessato al problema, mentre il fisico britannico Larmor, che all'epoca aveva 63 anni e di cui era nota l'avversione verso la relatività per come si stava sviluppando, non pare abbia avuto una particolare influenza sul dibattito scientifico statunitense del periodo.

¹² Crelinsten, J. (2006) *Einstein's Jury* (Princeton/Oxford: Princeton University Press, 2006).

¹³ Miller a Hale, 11 novembre 1920; e Miller a Hale, 19 gennaio 1921, Washington, *Niels Bohr Library and Archives dell'American Institute of Physics (AIP)*, George E. Hale Papers (*HP*), roll 93.

¹⁴ Il primo documento che attesta la collaborazione tra Michelson e il *MWO* è la lettera Robert S. Woodward a Michelson, 5 maggio 1919, *Carnegie Institution of Washington (CIW) Archives*, fol. Michelson.

¹⁵ Hale a Miller, 19 luglio 1920, *AIP, HP*, roll 93.

¹⁶ Le spese furono poi pagate tutte da Eckstein Case di Cleveland. Vedere Miller (1933), *op. cit.*, p. 217.

Una maggiore rilevanza presso la comunità scientifica statunitense la ebbe il fisico, polacco di nascita, Ludwik Silberstein. Proprio nel 1920, costui era giunto negli USA per lavorare nella *Eastman Kodak Co.* a Rochester ed era considerato un esperto di fisica teorica, dato che aveva scritto una delle prime monografie in lingua inglese sulla teoria della relatività ristretta.¹⁷

Il suo nome fu suggerito a Hale come possibile aiuto teorico all'opera di Miller già nel 1920, perché Silberstein era ritenuto molto abile dal punto di vista matematico e il suo approccio alle teorie della relatività era apprezzato da alcuni fisici statunitensi.¹⁸ Considerando il fatto che Silberstein fu uno dei primi fisici teorici europei ad emigrare negli USA, è possibile ritenerlo uno dei maggiori esperti delle teorie della relatività vivente in tale Paese, ma la situazione presentava degli aspetti contraddittori. Anche se Silberstein ebbe un ruolo non secondario nell'iniziale diffusione della teoria della relatività generale negli USA, con la pubblicazione di un libro e molte lezioni in diverse università, egli mostrò di non apprezzare tale teoria fin dal suo concepimento.¹⁹ Pochi mesi dopo gli annunci della spedizione britannica a favore della teoria della relatività generale, infatti, Silberstein aveva cercato di trovare un'altra spiegazione che rendesse conto della deflessione dei raggi di luce nelle vicinanze del Sole riesumando la teoria dell'etere di Stokes, con la modifica proposta da Planck (vedi par. 3.12).²⁰ L'attitudine di Silberstein verso la teoria della relatività generale portò lo scienziato ad essere realmente interessato agli esperimenti di Miller del 1921 e, probabilmente, ad avere una qualche influenza sulla decisione finale di realizzarli.²¹

5.3.2. I primi esperimenti al MWO nell'aprile 1921 e la reazione di Einstein

Miller compì tale scelta tra il novembre 1920 e il gennaio 1921 con il dichiarato proposito di eseguire le osservazioni in differenti stagioni dell'anno.²²

¹⁷ Silberstein, L. (1914) *The Theory of Relativity* (London: MacMillan, 1914).

¹⁸ Merritt a Hale, 22 novembre 1920, *AIP, HP*, roll 93.

¹⁹ Silberstein, L. (1922) *The Theory of General Relativity and Gravitation* (New York: Van Nostrand, 1922).

²⁰ Silberstein, L. (1920) "The Recent Eclipse Results and Stokes-Planck's Aether", *Philosophical Magazine*, 39 (1920): 160-71.

²¹ Le ipotesi di un'influenza di Silberstein sulle ricerche di Miller del 1921 sarebbero confermate dalla lettera di Hale a Larmor, 21 dicembre 1921, *AIP, HP*, roll 22.

²² Hale a Merritt, 29 novembre 1920; telegramma Miller a Hale, 24 gennaio 1921; Miller a Hale, 19 febbraio 1921, *AIP, HP*, roll 93.



Figura 5.2. La costruzione provvisoria in cui Miller pose il suo interferometro sul Mount Wilson, in aprile e dicembre 1921. Foto spedita ad Arvid Reuterdaahl, Arvid Reuterdaahl Papers, per concessione della *University of St. Thomas*, Special Collections.

La prima sessione di osservazioni si tenne nell'aprile 1920 (vedi fig. 5.2-5.3), dopo la quale Miller concluse:

*Have strong definite indications of drift four times as large as at Cleveland but accompanied by unexplained disturbance which prevents conclusions till further observations are made later in year.*²³

Il disturbo inspiegabile nominato da Miller gli impedì di essere sicuro dei risultati ottenuti. A dispetto di questa incertezza, un possibile risultato a favore dell'*ether-drift* fu annunciato ad Einstein durante la sua visita a Princeton il mese dopo.

²³ Telegramma Miller a Hale, 22 aprile 1921, *AIP*, *HP*, roll 92.



Figura 5.3. Interferometro usato da Miller a Mount Wilson nell'aprile del 1921. Foto mandata ad Arvid Reuterdaahl, Arvid Reuterdaahl Papers, per concessione della *University of St. Thomas*, Special Collections.

Dall'aprile del 1921, Einstein si trovava negli USA per accompagnare Chaim Weizmann (1874-1952), presidente della *World Zionist Organisation* nella raccolta fondi per la *Hebrew University* a Gerusalemme. Cogliendo l'occasione della presenza di Einstein nel territorio statunitense la *Princeton University* organizzò quattro sue lezioni sulla relatività. Nel ricevimento dopo una di queste lezioni, qualcuno nominò il presunto risultato positivo degli esperimenti di Miller ed Einstein formulò la nota frase "*Subtle is the Lord, but He is not malicious*".²⁴ Sebbene l'episodio abbia assunto una certa celebrità a livello aneddótico perché alcuni anni dopo la frase di Einstein fu incisa su una pietra del *Princeton Department of Mathematics*, non è stabilito chi conoscesse e comunicò a Einstein i risultati, dubbi, di Miller. Lo sperimentatore statunitense, infatti, non aveva riportato pubblicamente i propri risultati e non era riuscito a partecipare al meeting della *American Physical Society (APS)*

²⁴ H. Dukas a Shankland, 24 febbraio 1963, *CWRU, RSP*, A 08-19, box 3. Veblen a Einstein, 17 aprile 1930; e Einstein a Veblen, 30 aprile 1930, Washington, *Library of Congress (LC)*, Manuscript Division, Oswald Veblen Papers, box 4, fol. Einstein. Per le biografie di Einstein che riportano tale evento vedere par. 2.4.2.

tenutosi nell'aprile dello stesso anno, nel quale avrebbe potuto comunicare in maniera informale i risultati delle osservazioni.

L'ipotesi che appare più probabile è che, anche in questo caso, Silberstein abbia giocato un qualche ruolo. Il fisico teorico era presente alle lezioni di Einstein ed è dimostrato che essi parlarono del significato e della valenza di una ripetizione dell'esperimento di Sagnac con un interferometro molto vasto solidale con la superficie della Terra. Silberstein, infatti, stava tentando di convincere Michelson affinché realizzasse l'idea avuta nel 1904 (vedi par. 4.3) perché il contesto teorico poteva fare di tale esperimento un *experimentum crucis* contro la teoria della relatività generale. Secondo i calcoli di Silberstein, la teoria della relatività generale e la teoria dell'etere immobile avrebbero dovuto portare alla rilevazione dell'intero effetto Sagnac, mentre un etere trascinato parzialmente o totalmente nei dintorni della Terra avrebbe portato alla rilevazione, rispettivamente, di un effetto o nullo, o inferiore alla formula di Sagnac.²⁵ Silberstein stava proseguendo le sue ricerche di una teoria alternativa a quella della relatività generale e l'esistenza di un etere di Stokes-Planck poteva essere mostrata dai risultati dell'esperimento in questione. In ogni caso, indipendentemente dal fatto che fosse in accordo o meno con la sua teoria, un effetto nullo o inferiore alla formula (4.8) sarebbe risultata, secondo Silberstein, una confutazione della teoria della relatività generale.

È oltremodo probabile che Silberstein, durante la discussione su tale esperimento, abbia chiesto a Einstein un commento sui risultati ottenuti da Miller il mese precedente. Come prima reazione, Einstein mostrò un'iniziale scetticismo, ma, a dispetto delle sue convinzioni personali, incontrò Miller a Cleveland il 25 maggio 1921. In tale occasione i due scienziati discussero i risultati ottenuti a Mount Wilson e sembrerebbe che Einstein abbia chiesto a Miller di continuare con le sue osservazioni in differenti periodi dell'anno. L'opinione di Miller su Einstein dopo questa visita fu estremamente positiva (vedi par. 2.6).²⁶

²⁵ "Hope Soon to Prove If Einstein Is Right", *The New York Times*, 13 maggio 1921; ripubblicato in Illy, J. (2006) *Albert Meets America: How Journalists Treated Genius during Einstein's 1921 Travels* (Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2006), 199-202. Silberstein pubblicò un articolo con la teoria di tale esperimento di Silberstein, L. (1921) "The propagation of light in rotating systems", *Journal of the Optical Society of America*, 5 (1921): 291-307.

²⁶ Miller scrisse a Mendenhall pochi giorni dopo questa visita che Einstein "was exceedingly pleasant and not at all insistent about the theory of relativity" in Miller a Mendenhall, 2 giugno 1921, *Worcester Polytechnic Institute (WPI)*, University Archives and Special Collections, G. C. Gordon Library, Thomas Corwin Mendenhall Papers, box 10, fol. 8. Miller riconferma la sua impressione positiva rispetto ad Einstein in Miller a Larmor, 9 giugno 1921, *Royal Society Archives*, Joseph Larmor Papers.

I resoconti storici di tale visita producono, però, immagini contrapposte rispetto al ruolo giocato da Einstein nella prosecuzione degli esperimenti di Miller. Shankland ha affermato che tale visita fu fondamentale nella decisione di Miller di continuare gli esperimenti perché Einstein “*urged that further trials be made to remove any possible doubts*”.²⁷ Al contrario, Swenson ha riportato che “*after Einstein’s visit [...] Miller was a bit less enthusiastic about his April findings*”.²⁸

La contrapposizione delle immagini fornite dai due resoconti non ha bisogno di ulteriori commenti, quello che invece è possibile cercare di fare è chiarire la posizione di Einstein considerando il contesto teorico nel quale si muoveva. I commenti di Einstein fanno ritenere che egli fosse sicuro già in quel periodo che ulteriori osservazioni non avrebbero mostrato alcun *ether-drift*, che altre spiegazioni erano più probabili e che i dati di Miller erano poco rilevanti. È probabile, altresì, che Einstein non intendesse entrare in polemica con i fisici statunitensi durante la sua visita del 1921 negli USA e che fu molto diplomatico con il suo ospite. Durante la conversazione, Einstein, da un lato, propose una spiegazione dipendente dalle variazioni di temperatura ai dati di Miller, dall’altro, affermò la necessità di testare le differenti ipotesi con ulteriori esperimenti.

Ancora una volta il resoconto di Swenson sembra non essere corretto: non fu la visita di Einstein a scoraggiare Miller. Da una lettera che Miller scrisse a Hale alla fine del giugno 1921, appare evidente che i motivi di sconforto furono altri. A causa di diversi impegni, Miller poté studiare i dati e trovare che l’effetto inspiegabile riferito già nel telegramma a Hale (vedi nota 23) era periodico ogni giro dell’interferometro solo in seguito alla visita di Einstein.²⁹ Analizzando i dati, Miller si rese conto che tale effetto era molto più grande dell’effetto periodico ogni mezzo giro dell’interferometro, il quale sarebbe potuto essere spiegato con un *ether-drift*. Senza una spiegazione per l’effetto con periodo ogni giro, non era possibile affermare che l’effetto periodico ogni mezzo giro fosse dovuto all’ *ether-drift*, e fu questo il reale motivo della caduta di entusiasmo citata da Swenson.

²⁷ Shankland, R. S. McCuskey, S. W., Leone, F. C., e Kuerti, G. (1955) “New Analysis of the Interferometer Observations of Dayton C. Miller”, *Reviews of Modern Physics*, 27 (1955): 167-78, pp.167-8.

²⁸ Swenson (1972), *op. cit.*, p. 195.

²⁹ Miller a Hale, 30 giugno 1921, *AIP, HP*, roll 93.

5.3.3. Le osservazioni del dicembre 1921 al MWO

A parte Einstein, negli USA non ci furono altre reazioni importanti ai risultati di Miller dell'aprile 1921. Altri esperimenti erano, infatti, considerati molto più rilevanti come test della relatività ed erano tutte riguardanti la teoria della relatività generale: le osservazioni delle eclissi solari per confermare o confutare le conclusioni della spedizione inglese del 1919, le osservazioni del *red-shift* solare e stellare, e l'esperimento di Michelson sulla rotazione terrestre riproposto da Silberstein.³⁰

Ad ogni modo, Michelson ribadì a Hale che il lavoro di Miller sarebbe dovuto continuare anche se non sembra si sia realmente interessato a tali ripetizioni. Seguendo il consiglio di Michelson, Hale invitò Miller a chiedere l'aiuto di Lorentz per capire una possibile spiegazione dell'effetto periodico ogni giro dell'interferometro.³¹ Hale e Miller stavano cercando di trovare qualcuno che potesse aiutare nel proseguo della ricerca. Dal punto di vista sperimentale il più autorevole esperto nel campo degli esperimenti ottici di *ether-drift* era senza dubbio Michelson. Gli altri fisici che potevano essere interessati al problema erano i teorici europei esperti nella teoria della relatività, quali Silberstein, Lorentz e Einstein. Hale chiese, perciò, l'aiuto di Lorentz, un' indiscussa autorità internazionale, per avere un supporto alle ricerche di Miller dal punto di vista teorico. Sfortunatamente la risposta di Lorentz non è stata trovata, ma è probabile che egli abbia suggerito la ripetizione dell'esperimento in altri periodi dell'anno. Prima ancora della risposta di Lorentz, Miller aveva, comunque, già deciso di ripetere gli esperimenti MM al MWO.

Nel 1921 Miller ragionava ancora nei termini dei moti conosciuti della Terra e del Sole per scegliere quale periodo dell'anno e che ore del giorno fossero le migliori per osservare un possibile *ether-drift*. I calcoli basati su tali ipotesi lo portarono a scegliere dicembre come il miglior mese per fare tali osservazioni. Nel dicembre 1921, così, Miller ripeté l'esperimento, ma i risultati di questa sessione furono ancora più insoddisfacenti di quelli di aprile.³² Miller fece subito una relazione per lo staff del MWO sui risultati dei suoi esperimenti e Hale non ebbe dubbi sul loro significato:

³⁰ Per un'accurata analisi degli esperimenti negli USA per testare le previsioni della relatività fino agli anni '30 vedere Crelinsten (2006), *op. cit.*

³¹ Miller a Lorentz, 22 agosto 1921, *AIP, HP*, roll 93.

³² Miller a Hale, 26 agosto 1921, *AIP, HP*, roll 93. Miller scrisse nel suo diario (research notebook, 11 dicembre 1921) "*all effects are probably due to the instrument. This is the end!*" frase riportata in Shankland et al. (1955), *op. cit.*, p. 168.

*Professor Dayton Miller [...] has just repeated the Michelson-Morley experiment on Mount Wilson with negative result. [...] displacements of the fringes [...] were finally proved to be of instrumental origin and almost wholly eliminated.*³³

Questa frase di Hale è considerevole per due diverse ragioni: per prima cosa, egli era ancora il direttore del *MWO*, quindi era o era considerato come uno scienziato con una grande conoscenza del lavoro di Miller; in secondo luogo, Hale era un membro molto autorevole della comunità scientifica statunitense dell'epoca. Ci sono pochi dubbi che le parole di Hale abbiano avuto un impatto significativo sul mondo scientifico statunitense e non si trova presenza di altre risposte immediate. Questi fatti portano a concludere che l'impressione diffusa all'epoca fosse che gli esperimenti di Miller avessero confermato il risultato nullo dei precedenti esperimenti MM.

³³ Hale a Larmor, 21 dicembre 1921, *loc. cit.*

5.4. Le ricerche di Miller a Cleveland (1922-24)

Prima di continuare con il resoconto cronologico degli esperimenti di *ether-drift* di Miller, è necessario spendere alcune parole sulla relazione tra Miller e la comunità scientifica statunitense negli anni '20. Miller era diventato un membro dell'*APS* nel 1901 e tale istituzione era enormemente cresciuta nei primi venti anni del secolo XX.³⁴ Nel 1921 Miller aveva 55 anni ed era un membro eminente di molte società scientifiche statunitensi. In particolare, egli ricopriva il ruolo di segretario dell'*APS*, in un momento in cui tale società contava più di 1.000 membri.³⁵ Nello stesso anno in cui compì i suoi primi esperimenti al *MWO* fu, inoltre, eletto membro della prestigiosa *NAS*.³⁶ Fino al 1921 le principali ricerche di Miller furono eseguite nel campo dell'acustica, della quale scienza era ritenuto uno dei massimi esperti statunitensi.

Nello stesso momento in cui Miller stava eseguendo la seconda serie di osservazioni del 1921, era iniziata la progettazione del nuovo edificio della *NAS* e del *National Research Council*. Il presidente della *Carnegie Institution of Washington (CIW)*, John Campbell Merriam (1869-1945), e Hale erano entrambi membri della *Building Committee*. Nella corrispondenza tra loro, Hale espresse l'opinione che Miller era “*the best authority in the country on the acoustics of buildings*” e chiese a Merriam di mandare a lui le copie carbone dei progetti del nuovo edificio per avere alcuni suggerimenti sull'acustica dell'auditorium.³⁷ Mi soffermo su questi avvenimenti in quanto sono particolarmente illuminanti riguardo allo scarso interesse della comunità scientifica statunitense verso le ricerche di *ether-drift* di Miller. Nel periodo nel quale Miller stava ripetendo il supposto *experimentum crucis* sulla

³⁴ Per un'accurata analisi degli sviluppi della comunità statunitense dei fisici vedere Kevles, D. J. (1987) *The Physicists: The History of a Scientific Community in Modern America* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1987).

³⁵ Nel 1902 il membri erano 144 mentre nel 1929 erano più di 1100. “Bulletin of American Physical Society” vol. I and II, e “List of Members of American Physical Society of July 1920”, *Records of the American Physical Society in Niels Bohr Library and Archives, AIP*.

³⁶ Miller a Mendenhall, *loc. cit.* Mendenhall era l'unico altro membro della *NAS* dello stato dell'Ohio. Per un resoconto della vita di Miller, vedere Shankland, R. S. (1941) “Dayton C. Miller: Physics Across Fifty Years”, *American Journal of Physics*, 9 (1941): 273-83; e Fletcher, H. (1943) “Biographical Memoir of Dayton Clarence Miller 1866-1941”, *National Academy of Sciences of the USA Biographical Memories*, 23 (1943): 61-71, questo secondo articolo è per stessa ammissione dell'autore basato su quello di Shankland. Per una trattazione contemporanea, vedere Fickinger, W. (2006) *Physics at a Research University: Case Western Reserve 1830-1990* (Cleveland, Case Western Research University, 2005): 24-45.

³⁷ Hale a Merriam, 30 novembre 1921, *AIP, HP*, roll 93. Hale mandò anche un telegramma il giorno prima con la stessa richiesta: Hale a Merriam, 29 novembre 1921, *LC, MD*, John Campbell Merriam Papers (*MP*), box 87, fol. Hale/2. Merriam rispose immediatamente (Merriam a Hale, 29 novembre 1921, *AIP, HP*, roll 93), ma non riuscirono a far giungere a Miller le copie carbone del progetto prima che questi lasciasse Mount Wilson: telegramma Hale a Merriam, 14 dicembre 1921, *AIP, HP*, roll 93.

famosa teoria della relatività, Hale, che stava ospitando l'esperimento, e Merriam, il presidente dell'istituzione che supportava finanziariamente il *MWO*, nominano Miller solo in relazione all'acustica del nuovo edificio.

Durante il 1922, Miller fece dei calcoli per migliorare l'acustica della *Science Hall* del nuovo edificio in costruzione. Le migliorie proposte da Miller implicavano un lavoro che avrebbe comportato un costo aggiuntivo di 12.785 \$ rispetto a quello preventivato nel budget per l'edificio. L'autorevolezza di Miller nel campo dell'acustica era così imponente che tutti i membri della *Building Committee*, a parte Augustus Trowbridge (1870-1934), votarono per tali lavori aggiuntivi.³⁸ La Commissione ringraziò formalmente Miller per l'apporto dato e chiesero altri suggerimenti riguardo l'acustica del nuovo edificio l'anno seguente.³⁹

Nel 1922, intanto, Miller aveva riportato il proprio interferometro a Cleveland per scoprire le possibili cause dell'effetto che aveva trovato a Mount Wilson, ma egli fu tanto occupato da non riuscire a compiere alcuna osservazione fino a giugno.⁴⁰

Nel meeting dell'*APS* che si tenne nell'aprile del 1922, Miller, contrariamente a quanto affermato nel diario, riportò che i risultati delle sue osservazioni “*show a definite displacement, periodic in each half revolution of the interferometer, of the kind to be expected, but having one tenth of the presumed amount*”.⁴¹

Nella relazione pubblica, Miller sottolineò l'importanza della sua scoperta e citò l'effetto periodico ogni rivoluzione solo dopo aver riportato l'esistenza del presunto effetto di *ether-drift*. La conclusione di tale resoconto fu che non era possibile formulare alcuna ipotesi fino a quando altre ripetizioni non avessero mostrato le possibili cause dei due effetti. Gli esperimenti del 1921 mostravano solo che l'effetto periodico ogni mezzo giro dell'interferometro non poteva avere una causa magnetica. Il modo in cui presentò i dati dell'esperimento permise a Miller di lasciare la questione aperta senza raggiungere nessuna conclusione definitiva.

³⁸ Trowbridge a Gano Dunn 24 ottobre 1922; e “Vote of the committee”, in *NAS-NRC Archives: Building Records Group: P&E: Real Estate: Buildings: NAS-NRC: Construction: Materials: Acoustical Tiles: Akoustolith: 1907-1925*.

³⁹ Brockett a Miller, 28 dicembre 1922; Gano Dunn a Miller, 7 maggio 1923; Dunn a Miller, 2 ottobre 1923; e Miller a Dunn, 5 ottobre 1923, *NAS-NRC Archives: Building Records Group: P&E: Real Estate: Buildings: NAS-NRC: Construction: Materials: Acoustical Tiles: Akoustolith: 1907-1925*.

⁴⁰ Miller scrisse a Hale: “*I have not been able to make any observations since I saw you in Washington*”. Miller a Hale, 15 giugno 1922, San Marino, CA, *Huntington Library (HL)*, Walter S. Adams Papers (*WAP*), box 46, fol. 46.802. In Washington ci fu il meeting dell'*APS* il 21 e 22 aprile 1921.

⁴¹ Miller, D. C. (1922) “Ether-drift Experiments at Mount Wilson Solar observatory”, *Physical Review*, 19 (1922): 407-8, p. 407.

A dispetto delle affermazioni di Miller di aver trovato un qualche effetto del tipo previsto nel caso di un *ether-drift*, gli esperimenti del 1921 continuarono a non provocare alcun dibattito. Sembrava un tema che interessasse solo il lavoro di Miller, anche se nel periodo circolava una certa antipatia nei confronti di Einstein e della sue teorie.⁴²

Il programma di Miller di riprodurre gli esperimenti a Cleveland in varie condizioni con la finalità di dimostrare che l'effetto non dipendeva da altri fattori di disturbo non ebbe luogo fino al 1923.⁴³ Possiamo, perciò, affermare che la frase formulata da Miller nel 1933 “*during the year 1922 and 1923 many trials were made*”⁴⁴ è scorretta. Nel 1922, come si è visto, Miller non riuscì a compiere alcuna osservazione. Una delle possibili cause del fatto che Miller lasciasse passare un anno prima di effettuare le osservazioni che aveva pianificato fu, probabilmente, la mancanza d'interesse da parte della comunità scientifica a cui apparteneva. Solo uno scienziato statunitense, infatti, considerò i suoi risultati sperimentali come significativi. Costui era l'anti-relativista Charles Lane Poor (1866-1951), professore di Astronomia alla *Columbia University*, il quale scrisse il libro *Gravitation versus Relativity* proprio nel 1922.⁴⁵ Poor non accettava le teorie della relatività e utilizzò il piccolo effetto visionato da Miller per rafforzare i suoi attacchi che partivano da altre tematiche scientifiche. I principali temi del libro erano due: la possibilità di spiegare la variazione del perielio di Mercurio all'interno del quadro teorico della gravitazione newtoniana e le critiche verso le conclusioni della spedizione britannica sui dati ricavati dall'eclissi solare del 1919. Miller espresse un deciso apprezzamento per le osservazioni di Poor sulla relatività e sul valore dei suoi risultati ottenuti a Mount Wilson.⁴⁶

⁴² Alcuni giornali avevano riportato le impressioni di Einstein sugli scienziati e la cultura statunitensi che aveva creato un certo disappunto tra i fisici di quel Paese: “Einstein Declares Women Rule Here”, *New York Times*, 8 luglio 1921; “‘American Women’s Toy Dogs’, Einstein”, *Chicago Daily Tribune*, 8 luglio 1921. Silberstein informò Einstein su questa campagna stampa statunitense in Silberstein a Einstein, 13 luglio 1921, e Silberstein a Einstein, 18 luglio 1921 in *The Collected Papers of Albert Einstein*, vol. 12, a cura di Buchwald, D. K., Rosenkranz, Z., Sauer, T., Illy, J., e Holmes, V. I. (Princeton/Oxford, Princeton University Press, 2009), pp. 220-21 e 227-28.

⁴³ A parte i suoi lavori per l'acustica del nuovo edificio delle *NAS* e *NRC*, Miller fu impegnato in diversi lavori per le società scientifiche che non lasciarono lui del tempo da dedicare alla ricerca. Nel 1922 Miller era il segretario dell'*APS* e lavorava intensamente per questa società scrivendo le minute di tutti i meeting precedenti, dalla nascita dell'associazione fino al 1922. Oltre a questi lavori, Miller fece parte del *NRC committee* per l'acustica, della quale fu uno dei membri più importanti. Nel novembre del 1922 tale Commissione pubblicò “Certain Problem in Acoustics”, *Bulletin of the National Research Council* 4 (1922): 1-30. Vedere anche Miller a Dunn, 6 dicembre 1922, *HL, WAP*, box 8, fol. 46.802.

⁴⁴ Miller (1933), *op. cit.*, p. 219.

⁴⁵ Poor, C. L. (1922) *Gravitation Versus Relativity: a Non-Technical Explanation of the Fundamental Principles of Gravitational Astronomy and a Critical Examination of the Astronomical Evidence cited as a Proof of the Generalized Theory of Relativity* (New York/London: Putnam, 1922). Poor cita i risultati di Miller a p. 264.

⁴⁶ Miller scrisse alla fine del 1922: “I agree with everything that he [Poor] says and feel that he has stated the situation regarding the Relativity Theory better than any one else”, Miller to Gano Dunn, *loc. cit.*

A parte Poor, però, il mondo scientifico statunitense non sembrò interessarsi al piccolo effetto trovato da Miller. Molto probabilmente, la maggior parte degli scienziati statunitensi fu influenzato dalle affermazioni di Hale e di Walter S. Adams (1876-1956), che diventerà direttore del *MWO* l'anno successivo, i quali erano convinti che Miller avesse confermato il risultato nullo. Alla fine del 1922, Miller cominciò a contrastare, nella corrispondenza privata, sia le sue precedenti affermazioni, sia le frasi di Adams riguardanti il presunto risultato nullo. Questo fatto porta a chiedersi cosa abbia indotto Miller ad un cambio di opinione così deciso rispetto alla supposta realtà dell'*ether-drift* osservato.

Dall'analisi di differenti documenti, sembrerebbe che i possibili fattori alla base di questo considerevole cambio siano tre:

1. Secondo Shankland, furono le discussioni avute con Lorentz nell'aprile del 1922, quando il fisico teorico olandese tenne delle lezioni al *Case*, ad essere lo stimolo fondamentale. Come mostrerò meglio nel Cap. 6, Shankland mostrerà una certa tendenza ad enfatizzare l'interesse provato da altri importanti fisici verso il lavoro di Miller, per cui non penso che possa essere considerata una fonte attendibile per questo tipo di problematica.
2. Come dichiarato dallo stesso Miller, potrebbe essere stata la più approfondita analisi dei dati compiuta nel 1922. Miller aveva, infatti, rianalizzato i dati di entrambe le sessioni del 1921 e aveva dedotto che le osservazioni di dicembre erano in sostanziale accordo con quelle di aprile.⁴⁷
3. Esiste una terza possibile motivazione, mai espressa nella storiografia sul caso Miller, ossia la pubblicazione e la lettura del libro di Poor che concedeva una notevole rilevanza alla possibile scoperta dell'*ether-drift* compiuta da Miller.

La terza ipotesi è proposta in questa sede perché esiste una certa coincidenza temporale tra la pubblicazione del libro e il cambio manifestato da Miller nella corrispondenza privata, e perché costui mostrava di essere in profonda sintonia con le affermazioni di Poor sulla relatività. Miller, infatti, vedeva nelle parole di Poor una reazione positiva da una parte della comunità scientifica che concordava sulla difesa di alcune visioni epistemologiche in opposizione alle teorie della relatività. Qualunque fosse la motivazione più significativa,

⁴⁷ Ibid., e telegramma Miller a Adams, 3 gennaio 1923, *HL*, *WAP*, box 8, fol. 46.802.

Miller, all'inizio del 1923, mostrò senza reticenze la speranza che i suoi dati potessero confutare le teorie della relatività.

Le differenti conclusioni espresse da Miller in diverse sedi causò, probabilmente, molta confusione presso la comunità scientifica statunitense nella comprensione dei risultati di Miller. La confusione riguardava anche il valore quantitativo di questo supposto *ether-drift*: in alcune lettere, Miller scrisse di aver osservato uno spostamento di frange compatibile con il 20-30% del valore aspettato, mentre in altre comunicazioni espresse una percentuale molto inferiore, intorno al 10%. Tale differenza nei valori proposti da Miller condusse Adams a chiedergli in maniera esplicita di dichiarare un valore quantitativo da scrivere nel resoconto annuale delle ricerche condotte al *MWO*.

Dopo il suo cambio d'opinione circa la realtà dell'effetto di *ether-drift* osservato, Miller riprese il suo lavoro sperimentale a Cleveland. Non esiste nessun resoconto pubblicato di queste osservazioni e le frasi di Miller su di esse appartengono ad un periodo successivo alla sua analisi finale. Nel più volte citato Miller (1933), lo sperimentatore affermò che gli esperimenti di Cleveland di questo periodo “*proved that under the conditions of actual observation, the periodic displacements could not possibly be produced by temperature effects*”.⁴⁸ Altre informazioni possono essere ricavate dalla sua corrispondenza privata per comprendere meglio il processo delle ricerche di *ether-drift* e la relazione di queste con la ricezione della relatività negli USA.

Gli anni 1922-23 furono molto significativi per l'accettazione di della teoria della relatività generale negli USA. Nel 1922, infatti, Campbell aveva compiuto un'altra spedizione per osservare il presunto spostamento dei raggi di luce nei pressi del Sole, confermando le precedenti conclusioni di Eddington e, quindi, le predizioni compiute da Einstein. Le osservazioni di Campbell produssero una profonda sensazione presso la comunità scientifica statunitense, la quale stava aspettando, dagli astronomi connazionali, l'ultima parola riguardo alle affermazioni di Eddington.

Meno di un anno dopo, un altro evento interno alla comunità astronomica statunitense si risolse a favore della teoria della relatività generale: l'astronomo Charles Edward St. John (1857-1935), dello staff del *MWO*, cambiò radicalmente la propria opinione riguardo all'interpretazione delle sue osservazione sulle linee spettrali del Sole confermando

⁴⁸ Miller (1933), *op. cit.*, p. 220.

pubblicamente il valore di *red-shift* gravitazionale predetto da Einstein.⁴⁹ St. John, in questo modo, risolse a favore della teoria di Einstein l'ultimo test che era ancora indeciso nel 1923. Alla fine del 1923, la percezione del mondo scientifico era che la teoria della relatività generale aveva trovato importanti conferme sperimentali da parte di scienziati scrupolosi, alcuni dei quali non avevano mostrato nessun pregiudizio positivo in favore della relatività prima di compiere le osservazioni.

Chi, invece, non accettava tale teoria e contestava i criteri scelti nelle interpretazioni degli esperimenti succitati stava cercando altre evidenze sperimentali che contrastassero con le previsioni della teoria della relatività, ristretta o generale. Proprio in questo contesto, i confusi dati di Miller divennero una speranza per un altro scienziato ideologicamente avverso alle teorie di Einstein, ossia Arvid Reuterdaahl, professore di fisica alla *Catholic University of St. Thomas*.

Miller scrisse a Reuterdaahl di aver lavorato tutta l'estate del 1923 all'eliminazione dei fattori di disturbo ed era convinto di aver dimostrato che l'effetto non poteva dipendere dalle condizioni di temperatura.⁵⁰ Alla fine del 1923 Miller iniziò a progettare un'altra serie di osservazioni con la convinzione che l'apparato non mostrava effetti dipendenti dalla temperatura, che l'*ether-drift* cresceva con l'altitudine e, soprattutto, che il suo lavoro era apprezzato da un gruppo scientifico avverso alla relatività.

Miller credeva che a questo gruppo appartenessero molti fisici statunitensi. Crelinsten vede una differenza sostanziale, se non un aperto conflitto tra due comunità spazialmente separate: gli scienziati della comunità degli USA dell'ovest, nella quale erano comprese le due importanti istituzioni astronomiche del *MWO* e del *Lick Observatory* e il *Caltech*, erano favorevoli alle teorie della relatività, mentre gli scienziati statunitensi che lavoravano negli USA dell'est erano, per la maggior parte, contro Einstein.

Questa visione è senza dubbio una semplificazione, ma è vero che, nel 1923, la relatività fu al centro di molte dispute culturali, a dispetto dell'eccezionale valore delle sue verifiche sperimentali, dove "eccezionale valore" va inteso nel suo significato storico: negli USA il merito delle succitate verifiche sperimentali era dato dal fatto che esse venivano da astronomi statunitensi che possedevano una profonda autorevolezza presso la loro comunità

⁴⁹ Vedere Crelinsten (2006), *op. cit.* Per un'accurata analisi della conversione di St. John vedere Hentschel, K. (1993) "The Conversion of St. John: A Case Study on the Interplay of Theory and Experiment", *Studies in Context*, 6 (1993): 137-94.

⁵⁰ Miller a Reuterdaahl, 13 dicembre 1923, O'Shaughnessy-Frey Library, *ARP*, box 4, fol. 33.

scientifico senza alcun pregiudizio positivo verso le teorie di Einstein. Molti dei principali difensori statunitensi della teoria della relatività generale, negli anni '20, non erano, infatti, esperti degli aspetti matematici della teoria, ma solo delle sue verifiche sperimentali, per es. Hale, Campbell, St. John e Adams.

All'inizio del 1924, Miller espose a Reuterdaahl le speranze che le sue successive osservazioni avrebbero confutato la relatività con la dimostrazione dell'esistenza di un effetto di *ether-drift*. La relazione tra Miller e Reuterdaahl non è di secondaria importanza. Reuterdaahl mandò molte lettere pubblicate sul *New York Times* con l'esplicito obiettivo di attaccare le teorie della relatività o, meglio, un atteggiamento della comunità scientifica che l'autore chiamava "*Einsteinism*".⁵¹ Miller espresse a Reuterdaahl un certo apprezzamento per sue critiche:

*Your letter in the New York Times is certainly very specific and convincing. There seems to be a mass of evidence against Einsteinism, which is supported by very definite instances of error. These have not been answered, so far as I can learn. I think too, judging from my observations at meetings of the American Physical Society, that the number of physicists who are willing to speak against Relativity is rapidly growing.*⁵²

Il comportamento di Miller verso Poor e Reuterdaahl dimostra che, fin dalla fine del 1922, egli si legò con quella parte della comunità scientifica statunitense che aveva la ferma intenzione di confutare le teorie della relatività. Allo stesso tempo, però, egli era un eminente membro della comunità scientifica statunitense che ricopriva importanti posizioni istituzionali e adottò un approccio pubblico più prudente rispetto a quello degli scienziati di cui sembrava condividere le opinioni anti-relativiste.

Altri scienziati statunitensi, più coinvolti con gli sviluppi della matematica, sembravano non condividere le speranze di Miller verso gli esperimenti di *ether-drift*. Un esempio di tale atteggiamento si trova riassunta nella frase del matematico George David Birkhoff (1884-1944):

⁵¹ La profonda avversità di Reuterdaahl verso la persona di Einstein piuttosto che verso la sua teoria è dimostrata da molti suoi scritti, di cui il più noto è Reuterdaahl, A. "Einsteinism: his fallacies and frauds", *University of St. Thomas Special Collection, O'Shaughnessy-Frey Library, Arvid Reuterdaahl Papers (ARP)*, pubblicato on-line in <http://content.clic.edu/u/?reuterdaahl.257> (visionato il 20 settembre 2010). Vedere anche Moatti, A. (2007) *Einstein, un siècle contre lui* (Paris: Odile Jacob, 2007).

⁵² Miller a Reuterdaahl, 13 dicembre 1923, *loc. cit.*.

[I] cannot help hoping, out of a mere desire that a serious theoretical dilemma be avoided, that these results (of the future Ether-Drift experiments) shall be completely confirmatory of those originally obtained by Michelson and Morley (a null result).⁵³

L'atteggiamento di Birkhoff può essere rappresentativo perché egli mostrò di non nutrire una simpatia personale verso Einstein, ma comprendeva che la teoria della relatività ristretta stava diventando uno strumento fondamentale per lo sviluppo della fisica e che non esisteva una teoria alternativa della stessa portata. È molto probabile che la speranza di Birkhoff fosse condivisa da una larga parte della nuova generazione dei fisici statunitensi che stavano iniziando ad utilizzare le formule della teoria della relatività ristretta nelle loro ricerche quotidiane.

Dal punto di vista sperimentale, Miller era ancora fermo perché stava esitando sulla scelta del luogo dove effettuare le successive ripetizioni dell'esperimento. All'inizio del 1924, egli stava cercando una località più elevata del *MWO* convinto com'era che l'altitudine fosse l'elemento in grado di mostrare l'effetto in maniera più evidente. Nel maggio 1924, però, Miller si decise ancora una volta di tornare sul Mount Wilson con l'intenzione di lasciare lì l'interferometro per sei mesi e condurre l'esperimento in diversi periodi dell'anno alle medesime condizioni.⁵⁴

⁵³ A riportare questa frase di Birkhoff è lo stesso Miller in una lettera a Reuterdahl: Miller a Reuterdahl, 14 gennaio 1924, in O'Shaughnessy-Frey Library, *ARP*, box 4, fol. 33.

⁵⁴ Miller a Adams, 21 maggio 1924, *HL*, *WAP*, box 8, fol. 46.802; e Miller a Reuterdahl, 11 giugno 1924, O'Shaughnessy-Frey Library, *ARP*, box 4, fol. 33.

5.4. Il risultato positivo di Miller e la prima fase del dibattito (1924-26)

5.4.1. L'annuncio del risultato positivo al convegno della NAS (aprile 1925)

Miller tornò a Mount Wilson nell'agosto 1924 dopo aver eseguito altre osservazioni a Cleveland usando la luce del Sole per migliorare il proprio strumento.⁵⁵ Lo sperimentatore statunitense scelse un nuovo posto all'interno del territorio appartenente al *MWO* e intraprese le osservazioni con la convinzione che tutte le cause di disturbo erano state rimosse e che un qualsiasi effetto “*would certainly have to be considered as real*”.⁵⁶

Nell'articolo del 1933 Miller affermò, su tale sessione delle osservazioni, che “*the effects were shown to be real and systematic, beyond any further question*”.⁵⁷ Al contrario, nel dicembre 1924, dopo aver eseguito esaurienti calcoli sull'*ether-drift* atteso nei diversi mesi dell'anno, Miller concluse: “*I can say nothing about the results excepting that there seems to be nothing in the observations that is inconsistent with the expected Drift*”.⁵⁸ La forza delle asserzioni sulla stessa serie di osservazioni, nei due diversi resoconti, è differente in maniera manifesta. Alla fine del 1924, infatti, Miller stava ancora cercando di “*reconcile the observed effects with the accepted theories of the ether and the presumed motions of the earth in space*”.⁵⁹

Nel marzo 1925, Miller era sicuro dell'esistenza dell'effetto di *ether-drift*, ma non esisteva alcuna teoria dell'etere che potesse spiegare i suoi dati. Iniziò, così, a cercare nuovi dati in diversi periodi dell'anno con la speranza che alcune regolarità sperimentali avessero potuto indicare il possibile moto della Terra nell'etere. I calcoli teorici, in congiunzione con l'analisi delle precedenti osservazioni, portarono Miller a ritenere che l'effetto di *ether-drift* sarebbe stato massimo all'inizio di aprile e proprio in tale periodo furono compiuti gli esperimenti successivi, tra il 27 marzo e il 10 aprile del 1925. Ancora una volta, Miller trovò uno spostamento di frange regolare, ma non nel modo e nella quantità che stava cercando. I nuovi dati dimostravano solamente che le “*presumptions as to the absolute motion of the earth, upon which these calculations were based, were invalid*”.⁶⁰

⁵⁵ Adams a Miller, 28 giugno 1924; e telegramma Miller a Adams, 28 luglio 1924, *HL, WAP*, box 8, fol. 46.802.

⁵⁶ Miller (1933), *op. cit.*, p. 221.

⁵⁷ *Ibid.*

⁵⁸ Miller a Adams, 8 dicembre 1924, *HL, WAP*, box 8, fol. 46.802.

⁵⁹ Miller (1933), *op. cit.*, p. 221.

⁶⁰ *Ibid.*, p. 222.

Pochi giorni dopo, Miller fece una relazione su queste osservazioni in occasione del convegno della *NAS*. Tale resoconto cominciò con la storia degli esperimenti MM a partire dal 1881, quando Michelson lo ideò e compì per la prima volta a Potsdam, fino alle sue ultime osservazioni appena eseguite. Miller utilizzò tale introduzione storica per portare all'attenzione dell'auditorium il fatto che tale esperimento non aveva mai ottenuto un risultato perfettamente nullo. Miller, infatti, sottolineò che l'azimut apparente dipendeva dall'orario in cui erano compiute le osservazioni, a causa della rotazione terrestre, e che i suoi predecessori non avevano mai considerato tale variazione solo perché si aspettavano un effetto di *ether-drift* di gran lunga superiore. Miller poteva, così, affermare che la procedura utilizzata dai precedenti esecutori dell'esperimento li aveva condotti a un'analisi sbagliata dei dati e all'erronea accettazione del risultato nullo.

Miller continuò la sua premessa storica collegando la pubblicazione dell'articolo di Einstein del 1905 agli esperimenti compiuti da lui e Morley nello stesso anno, come se i principi su cui era stata basata la teoria della relatività ristretta fossero derivati direttamente dal risultato nullo di tali osservazioni. La struttura del ragionamento di Miller e la sua introduzione storica erano finalizzate ad accrescere le implicazioni dei suoi nuovi esperimenti, poiché l'esperimento MM assumeva il significato di *experimentum crucis* tra la teoria della relatività ristretta e le teorie dell'etere. L'affermazione conclusiva contenuta nella relazione di Miller dell'aprile del 1924 fu:

[Le osservazioni compiute al *MWO*] *lead to the conclusion that there is a positive displacement of the interference fringes, as would be produced by a relative motion of the earth and the ether at this observatory, of approximately ten kilometres per second, being one third of the orbital velocity of the earth.*⁶¹

Tale risultato costringeva Miller a cercare una spiegazione per la differenza tra i dati osservati al *MWO* e quelli di Cleveland, che fu trovata nell'ipotesi di un etere trascinato dalla superficie terrestre di una quantità che decresceva con l'altitudine. Questo trascinamento parziale dell'etere faceva sì che, sulla cima del Mount Wilson, il moto della Terra nell'etere, costituito dalla sommatoria del moto orbitale e moto di rotazione terrestre

⁶¹ Miller, D. C. (1925a) "Ether-drift Experiments at Mount Wilson", *Science*, 61 (1925): 617-21, p. 621.

in congiunzione con il moto cosmico del Sole, si palesasse con una velocità di 10 km/s nel piano dell'interferometro.

Miller, però, nel momento in cui diede tale resoconto davanti alla cospicua platea della *NAS*, non aveva ancora trovato un moto assoluto che potesse spiegare tutti i suoi dati, senza considerare la nota difficoltà di rendere conto, con la teoria del trascinamento dell'etere, degli altri fenomeni conosciuti, in particolare l'aberrazione stellare.

Miller non era un fisico teorico e pare non abbia mai cercato di comprendere le basi della teoria della relatività, sia ristretta, sia generale. Anche la teoria di Lorentz non rientrava nella sua rappresentazione del mondo fisico. Egli, infatti, era stato educato all'interno della vecchia scuola delle teorie dell'etere e credeva in un etere meccanico che fosse il reale supporto delle vibrazioni della luce come l'aria era il necessario supporto delle onde sonore. All'interno di questo quadro concettuale, egli poteva solo considerare i suoi dati come una prova dell'esistenza di un *ether-drift*, ossia di un moto assoluto della Terra nell'etere, ma le sue mancanze conoscitive dal punto di vista teorico non gli permisero di calcolare un possibile moto terrestre che potesse rendere conto di essi.

Miller, quindi, preferì sottolineare i risultati sperimentali, ossia che l'effetto era reale e persistente in ogni sessione delle osservazioni compiute fin dal 1921, che le variazioni di temperatura non avevano nessuna relazione con l'effetto visionato e che nessuna correzione era stata fatta sui valori osservati, senza alcuna omissione o valutazione dei dati. Miller, inoltre, enfatizzò il fatto che durante le osservazioni “*neither the observer nor the recorder can form the slightest idea as to whether any periodicity is present, much less as to the direction or amount of such periodicity*”.⁶²

L'ultima affermazione dimostra che Miller temeva le reazioni della comunità scientifica alle sue conclusioni. Le ragioni di tale atteggiamento vanno da ricercarsi all'interno della tradizione scientifica statunitense. Per prima cosa, la maggiore autorità scientifica nel campo degli esperimenti ottici di precisione era Michelson che aveva interpretato i propri esperimenti MM con un risultato nullo, perciò molti fisici statunitensi ritenevano che un possibile *ether-drift* non potesse essere osservato mediante esperimenti ottici. L'autorevolezza di Michelson era così grande presso la comunità scientifica statunitense che coloro i quali non accettavano le teorie della relatività stavano cercando di contrastare la loro accettazione senza contestare il risultato nullo dell'esperimento MMX.

⁶² Miller (1925a), *op. cit.*, p. 620.

Nello stesso convegno della *NAS*, inoltre, due resoconti di altrettanti esperimenti si erano dimostrati favorevoli alla teoria della relatività generale: l'esperimento di Michelson-Gale era giunto alla sua conclusione nello stesso periodo mostrando un effetto Sagnac completo, mentre un telegramma di Adams affermò che le sue osservazioni sul *red-shift* di Sirius B confermavano le predizioni di Einstein.

In tale difficile situazione, Miller aveva deciso, perciò, di rafforzare il valore dei suoi risultati con considerazioni metodologiche e dedicò la maggior parte dei suoi sforzi a rigettare le possibili critiche sulla validità dei dati ricavati dai suoi esperimenti.

La sua tattica si dimostrò eccellente: a dispetto delle lacune teoriche nella sua relazione e del risultato di importanti esperimenti contemporanei favorevoli alla teoria della relatività generale, ci fu una reazione considerevole da parte della comunità scientifica statunitense. I giornali, inoltre, ampliarono tale clima dando rilievo alle conclusioni di Miller, affermando che, dopo la sua relazione, si scatenò un serrato dibattito al convegno della *NAS*, e riportando la frase di Silberstein: "*relativity theory is dead*".⁶³

5.4.2. Il dibattito successivo al convegno

Subito dopo gli annunci di Miller al convegno della *NAS*, Silberstein pubblicò la dichiarazione che le osservazioni di Miller erano "*entirely antagonistic to the Einstein relativity theory, which [...] could not be adapted to the results of Prof. Miller by any conceivable modifications*".⁶⁴ Silberstein considerava il risultato annunciato da Miller una prova a favore della teoria dell'etere trascinato comprimibile di Stokes-Planck, che aveva già proposto per spiegare i risultati delle osservazioni di Eddington del 1919. Il risultato dell'esperimento di Michelson-Gale costituiva una difficoltà per questa sua teoria, ma Silberstein cercò di superarla ipotizzando che la Terra non trascinasse apprezzabilmente l'etere nel suo moto di rotazione.

⁶³ "Scientists Debate Recent Tests Made of Einstein Theory", *Washington Post*, 29 aprile 1925. Vedere anche "Strikes A Blow Against Relativity", *The New York Times*, 29 aprile 1925; Buel, W. S. "Clevelander Bombs Einstein Theory", *Cleveland Plain Dealer*, 29 aprile 1925, "Local Man Proves Ether Drifts, Refuting Einstein", *Cleveland Times*, 6 maggio 1925.

⁶⁴ Silberstein, L. (1925a) "D. C. Miller's Recent Experiments, and the Relativity Theory", *Nature*, 115 (1925): 798-99, p. 798.

L'articolo di Silberstein anticipò perfino quelli di Miller e fu, così, il primo utilizzo dei risultati di Miller del 1925 contro le teorie della relatività in una rivista scientifica.⁶⁵ Dopo tale pubblicazione, la rivista *Nature* divenne il terreno in cui si affrontarono le diverse interpretazioni dei dati di Miller. Eddington fu il primo scienziato a criticare, sulla stessa rivista, le affermazioni di Silberstein. Nella risposta dell'astronomo britannico, si manifestò ancora il tema dell'importanza dell'autorevolezza nelle procedure implicite applicate dagli scienziati. Le affermazioni di Miller, infatti, avevano trovato una considerevole risonanza nei quotidiani e nelle discussioni personali, ma non nella letteratura scientifica, così Eddington apprezzò l'approccio scientifico di Silberstein.

Dopo l'introduzione, in cui Eddington ringraziava Silberstein per il suo tentativo d'inserire i risultati di Miller in una teoria fisica, furono rese evidenti tutte le falle di tale teoria. Le critiche di Eddington si basavano sul fatto che un *ether-drift* il cui valore dipendesse dall'altitudine, era confutato dalle osservazioni astronomiche compiute quotidianamente. L'ipotesi di un etere trascinato in quantità differente a seconda dell'altezza avrebbe implicato, infatti, una differenza tra le osservazioni astronomiche compiute al *MWO* e quelle realizzate a livello del mare, cosa che non accadeva. Le osservazioni astronomiche, inoltre, erano diventate, nel momento in cui Eddington scriveva, molto più precise dell'esperimento interferometrico inventato da Michelson. Eddington concluse la sua breve risposta affermando che era necessario aspettare i dettagli delle osservazioni di Miller, ma che "*it is invading a field in which the facts have long been established by delicate observations, and it is difficult to regard it as a serious competitor*".⁶⁶ In un'altra comunicazione, Eddington espresse la convinzione che la "*confirmation [compiuta da Adams] of the Sirius B red-shift*" era "*of much bigger scientific importance*".⁶⁷ Silberstein rispose poco dopo, sulla stessa rivista, che gli argomenti di Eddington sarebbero stati invalidati se l'etere fosse stato perfettamente irrotazionale.⁶⁸

Poco tempo dopo il dibattito pubblico tra Silberstein ed Eddington, il direttore di *Science News*, Slosson, scrisse ad Einstein affermando che anche coloro che erano convinti della validità delle teorie della relatività non erano capaci di rendere conto del risultato di Miller.

⁶⁵ Miller pubblicò due articoli scientifici sulle osservazioni dell'aprile 1925 tra giugno e luglio 1925: rispettivamente Miller (1925a), *op. cit.* a giugno; e Miller, D. C. (1925b) "Ether Drift Experiments at Mount Wilson", *Nature*, 116 (1925): 49-50.

⁶⁶ Eddington, A. S. (1925) "Ether-drift and the Relativity Theory", *Nature*, 115 (1925): 870.

⁶⁷ Slosson a Einstein, 26 giugno 1925, *loc. cit.*

⁶⁸ Silberstein, L. (1925b) "Ether Drift and the Relativity Theory", *Nature*, 116 (1925): 98.

Slosson chiese, perciò, ad Einstein di rispondere direttamente alle affermazioni di Silberstein e, in particolare, di spiegare “*how far Professor Miller’s experiments, if completely confirmed by subsequent investigations, would invalidate either the general or the special theories of relativity*”.⁶⁹

La risposta di Einstein a Slosson fu pubblicata in un breve articolo insieme ad altri commenti di Silberstein ed Eddington nel luglio 1925. La prima frase di Einstein apparsa nell’articolo fu:

*If Dr. Miller’s results should be confirmed [...] then the special relativity theory, and with [sic] the general theory in its present form, falls. Experiment is the supreme judge.*⁷⁰

Tale asserzione, nel modo in cui Slosson la posizionò all’interno dell’articolo, ebbe una notevole influenza sul rilievo che gli esperimenti di Miller ebbero nelle seguenti discussioni sulla relatività.

Collegando il giudizio di Einstein alle richieste fatte da Slosson nella lettera precedente, appare chiaramente che il primo stava solo rispondendo a una domanda specifica del secondo, mentre non riteneva l’esperimento così rilevante. L’altra frase pubblicata di Einstein, infatti, non lascia dubbi d’interpretazione:

*No theory exists outside the relativity theory and the similar Lorentz theory which, except for the Miller experiment, explains all the known phenomena up to date.*⁷¹

Le due asserzioni, però, potevano essere e furono mal interpretate in quanto portatrici di un messaggio ambiguo. Nella prima, Einstein concesse all’esperimento di Miller il ruolo di *experimentum crucis* contro la teorie della relatività ristretta e generale, mentre la seconda chiariva che non esisteva nessuna teoria alternativa che poteva competere con la teoria della relatività ristretta o la, equivalente, teoria di Lorentz.

Nel 1925 Einstein non pubblicò nient’altro sugli esperimenti di Miller, così è necessario riferirsi alla sua corrispondenza privata per cercare di comprendere quale fosse la sua attitudine verso di essi all’epoca. Da questa appare chiaramente che Einstein era interessato

⁶⁹ Slosson a Einstein, 26 giugno 1925, *loc. cit.*

⁷⁰ “The Relativity Theory and the Ether Drift”, *Science News*, 62 (1925), viii.

⁷¹ *Ibid.*

al problema, ma che non credeva che i risultati di Miller avessero niente a che fare con un *ether-drift*. In particolare, sembra che Einstein condividesse appieno le critiche espresse da Eddington.⁷²

Nel settembre del 1925, Einstein propose una possibile spiegazione, che chiamò “*trivial*”, dei risultati di Miller grazie ad una differenza di temperatura di $1/10^\circ$. Il calcolo di Einstein era molto semplice: partendo dal fatto che l'indice di rifrazione dell'aria è dell'ordine di 10^{-4} risulta che una differenza di temperatura di 10^{-3} porta alla differenza di 10^{-7} in due percorsi ottici perpendicolari. Questo valore rendeva conto perfettamente delle osservazioni di Miller, e Einstein riteneva che potevano esserci ragioni sistematiche per questa piccola differenza di temperatura.⁷³

Subito dopo aver effettuato questo calcolo, Einstein mandò una lettera a Miller, proprio mentre questi era impegnato in ulteriori osservazioni presso il *MWO*. Miller non rispose alla lettera di Einstein fino al maggio dell'anno successivo, perché si prese il tempo per poter completare sia le osservazioni, sia i calcoli successivi.⁷⁴ Miller mandò, così, la sua risposta quando era completamente sicuro dei propri risultati e del fatto che una spiegazione dovuta alla temperatura era impossibile.

La corrispondenza di Einstein del periodo mostra anche altre reazioni agli annunci di Miller. Paul Sophus Epstein (1833-1966), del *Caltech*, informò lo stesso Einstein che, nell'istituzione nella quale lavorava, si esprimeva un deciso scetticismo verso gli annunci di Miller.⁷⁵ In ottobre Einstein venne a conoscenza di un'altra critica teorica, mossa da Lorentz: un'interpretazione di *ether-drift* dei dati di Miller non poteva rendere conto della variazione di azimut di 30° , perché la somma algebrica dei componenti est-ovest degli spostamenti di frangia lungo un giorno siderale avrebbe dovuto essere zero, contrariamente a quanto rilevato da Miller.⁷⁶

⁷² Einstein a Ehrenfest, 18 agosto 1925, *CPAE* 10 109; Einstein a Millikan, 13 luglio 1925; e Einstein a Millikan, 1 settembre 1925, Pasadena, *Caltech* Archives, Papers of Robert Andrews Millikan (*PRM*), fol. 39.7.

⁷³ Einstein a Ehrenfest, 18 settembre 1925, *CPAE* 10 112.

⁷⁴ Nella lettera di Einstein, andata persa, egli insisteva che “*the variation of $1/10^\circ$ in the temperature of air in the light path in the arms of the interferometer would produce a displacement of the fringes of the amount observed*” come riporta Miller in Miller a Einstein, 20 maggio 1926, *CPAE* 17 274. La segretaria di Einstein, Helen Dukas, e R. S. Shankland fecero alcuni sforzi per recuperare la lettera di Einstein negli anni '60, ma senza successo, concludendo che essa era da ritenersi definitivamente persa. Dukas a Shankland, 6 marzo 1963, *CPAE* 17 275; Shankland a Dukas, 12 marzo 1963, *CPAE* 17 276; e Shankland a Dukas, 22 maggio 1963, *CPAE* 17 277.

⁷⁵ Epstein a Einstein, 25 luglio 1925, *Caltech*, Papers of Paul Sophus Epstein (*PPE*), fol. 3.34.

⁷⁶ Ehrenfest informò Einstein delle critiche di Lorentz nella lettera: Ehrenfest a Einstein, 16 ottobre 1925, *CPAE* 10 110.

A dispetto dello scetticismo di Einstein e di altri fisici, espressi nella corrispondenza privata, la frase di Einstein pubblicata su *Science News* e il suo interesse contribuirono ad accrescere la rilevanza degli esperimenti di Miller nella percezione della comunità scientifica statunitense. Gli esperimenti di Miller, infatti, continuarono ad essere un problema dibattuto all'interno della comunità scientifica statunitense nel 1925.

La controversia continuò sulla rivista *Nature*: in luglio, Miller pubblicò un proprio articolo che mostrava due piccole, ma significative, differenze dalla relazione fatta nell'aprile dello stesso anno:

- 1) Miller citò direttamente la teoria di Silberstein come la possibile spiegazione dei suoi risultati;
- 2) Miller rese conto dell'effetto collegato al giro completo dell'interferometro. Con le sue parole tale effetto era “*a necessary geometrical result of the adjustments of mirrors' when fringes of finite width were used*”.⁷⁷ Nella relazione di aprile, Miller aveva completamente ignorato tale effetto e, in luglio, diede la spiegazione sopra riportata senza calcoli, presentandolo come un'evidenza sperimentale data dal fatto che esso svanisce con frange d'infinita larghezza.

Dopo tale articolo, due outsider entrarono nel dibattito: l'ingegnere italiano Giovanni Giorgi (1871-1950) e il matematico olandese David van Dantzig (1900-1959). Entrambi chiesero una ripetizione degli esperimenti di Miller anche se partivano da punti di vista opposti. Mentre Giorgi difese dalle critiche di Eddington la teoria dell'etere trascinato proposta da Silberstein, van Dantzig affermò che il risultato di Miller non riguardava la teoria della relatività ristretta perché gli esperimenti MM dovevano essere considerati nel quadro teorico della teoria della relatività generale a causa della rotazione terrestre.⁷⁸

Il primo autorevole fisico teorico statunitense che sviluppò l'argomento di van Dantzig, proponendo una spiegazione dei risultati di Miller all'interno della teoria della relatività generale, fu William Francis Gray Swann (1884-1962).⁷⁹ Costui propose un ragionamento sulla differenza tra le due teorie della relatività negli esperimenti sulla superficie terrestre

⁷⁷ Miller (1925b), *op. cit.*, p. 50.

⁷⁸ Giorgi, G. (1925) “Ether Drift and Relativity”, *Nature*, 116 (1925): 132, Van Dantzig, D. (1925) “The Miller Effect and relativity”, *Nature*, 116 (1925): 465.

⁷⁹ Swann, W. F. G. (1925a) “The Relation of the Restricted to the General Theory of Relativity and the Significance of the Michelson-Morley Experiment”, *Science*, 62 (1925): 145-49.

affermando esplicitamente che la sua ricerca aveva preso spunto dai risultati di Miller. Lo stesso anno, Swann pubblicò anche un calcolo in cui dimostrava che l'etere di Stokes-Planck era, in ogni caso, incompatibile, con i valori di *ether-drift* trovati da Miller a Mount Wilson.⁸⁰ Nelle sue pubblicazioni, perciò, Swann diede credito agli esperimenti di Miller, ma cercò di introdurli nel programma di ricerca relativistico. Tali discussioni del 1925 sono una prova che la comunità scientifica statunitense non mise da parte i risultati di Miller, ma la maggior parte degli scienziati non prese loro come una confutazione della teoria della relatività ristretta.

A parte Silberstein gli altri scienziati che interpretarono pubblicamente i risultati di Miller come una confutazione delle teorie di Einstein furono Poor e Curtis.⁸¹ Secondo Crelinsten, costoro erano collegati in una sorta di coalizione anti-relativista, la quale includeva altri astronomi statunitensi quali Thomas Jefferson Jackson See (1866-1962) e John A. Miller. Poor, in particolare, considerava gli esperimenti di Miller la prova più convincente contro la relatività e cercò di collegarli alle proprie critiche. Il legame di D. C. Miller con questa parte della comunità astronomica statunitense non è del tutto chiara, ma è certo che i suoi risultati furono utilizzati in decisi attacchi verso le teorie della relatività e che Miller apprezzò tale utilizzo.

Questa era la complessa situazione dopo gli annunci di Miller dell'aprile del 1925. Nessuno dei resoconti storici, citati nel Cap. 2, può essere, quindi, utilizzato per descrivere il comportamento della comunità scientifica statunitense. Come abbiamo visto dagli esempi sopra riportati, ci furono almeno tre differenti reazioni agli annunci di Miller: una reazione anti-relativista, secondo la quale i dati di Miller confutavano completamente i principi alla base della relatività, una reazione relativista che chiameremo *forte*, la quale riteneva che i dati di Miller non avessero niente a che fare con l'*ether-drift*, una reazione relativista *debole* di coloro i quali diedero credito ai risultati di Miller e cercarono di trovare una strada per rendere conto di essi all'interno della teoria della relatività generale. In ogni caso, l'atteggiamento più diffuso e largamente condiviso fu di aspettare fino a che nuovi esperimenti MM non fossero stati eseguiti per confermare o confutare le conclusioni di Miller.⁸²

⁸⁰ Swann, W. F. G. (1925b) "The Stokes-Planck Theory and the Michelson-Morley Experiment" *Nature*, 116 (1925): 785.

⁸¹ Vedere Crelinsten (2006), *op. cit.*, p. 277.

⁸² Vedere, per esempio, Adams a Miller, 5 giugno 1925, *HL, WAP*, box 8, fol. 46.802.

5.4.3. La conferma del risultato positivo al convegno della AAAS (dicembre 1925)

Miller realizzò questi nuovi esperimenti nello stesso luogo tra agosto e settembre del 1925. L'astronomo Gustav Strömberg (1882-1962), appartenente allo staff del *MWO*, lo aveva avvisato di non eseguire le sue osservazioni con in mente un predeterminato moto della Terra nell'etere.⁸³ Strömberg aveva compiuto delle ricerche sulle velocità radiali delle stelle e aveva scoperto una direzione preferenziale di tali moti che poteva indicare la velocità della Terra nello spazio assoluto. L'astronomo svedese aveva suggerito, perciò, di spiegare gli inaspettati risultati di Miller utilizzando il valore del moto assoluto che egli aveva dedotto dalle sue osservazioni delle stelle.

Miller aveva sviluppato una sempre maggiore convinzione nella reale esistenza dell'effetto e accettò il suggerimento di Strömberg di compiere osservazioni in differenti parti del giorno e in diversi periodi dell'anno per dedurre il moto assoluto della Terra dai dati osservati, senza riferirsi a precedenti teorie.⁸⁴ Dopo questa sessione di esperimenti, Miller lavorò intensamente con l'obiettivo di raggiungere delle conclusioni da portare al convegno congiunto dell'*APS*, di cui era presidente, e dell'*AAAS*, il quale si sarebbe tenuto alla fine del dicembre 1925.

Alcuni giorni prima di questo convegno, Miller scrisse ad Adams che egli aveva trovato un moto del sistema solare di 195 km/s verso un apice con ascensione retta 240° e declinazione $+74^\circ$.⁸⁵ Questo moto non concordava con le ipotesi di moto assoluto formulato da Strömberg e questo costituiva un problema per l'accettabilità delle sue conclusioni.

Nella lettera, Miller affermava di essere fermamente convinto che l'effetto di *ether-drift* era reale e di non aver dubbi sul fatto che avrebbe espresso tale convinzione al convegno una decina di giorni dopo. Questa lettera risulta essere un documento particolarmente interessante per i propositi della presente tesi, perché da essa è possibile dedurre che:

- 1) Miller non ebbe tempo di comparare l'ultima riduzione dei dati con quelle delle precedenti osservazioni, il che significa che egli si stava pronunciando sicuro dell'esistenza e del valore del moto assoluto solo sulla base delle ultime osservazioni, senza una corroborazione completa;
- 2) egli stava compiendo un intenso e veloce lavoro per presentare una conclusione al convegno, ma dieci giorni prima di questo, non aveva raggiunto alcuna certezza sul valore

⁸³ Miller a Adams, 21 maggio 1925, *HL*, *WAP*, box 8, fol. 46.802.

⁸⁴ Miller a Adams, 9 luglio 1925, *HL*, *WAP*, box 8, fol. 46.802.

⁸⁵ Miller a Adams, 19 dicembre 1925, *HL*, *WAP*, box 8, fol. 46.802.

del presunto *ether-drift*. Egli, infatti, scrisse il valore numerico di 12 km/s che, però, cancellò per sostituirlo con un meno significativo 8 km/s;

3) il valore sperimentale dell'*ether-drift* era 1/13 dell'ipotizzato moto assoluto e Miller si mostrava ancora convinto del trascinamento dell'etere da parte della Terra;

4) Silberstein credeva ancora nella possibilità di sistemare la teoria dell'etere senza invalidare le teoria dell'aberrazione stellare;

5) Miller aveva già pianificato una nuova sessione di osservazioni da tenersi al *MWO* nell'inverno del 1926.

Solo otto giorni dopo questa lettera, immediatamente prima della sua pubblica relazione al convegno di Kansas City, Miller modificò le sue precedenti conclusioni e mandò ad Adams i nuovi calcoli del moto terrestre: velocità di *ether-drift* osservata a Mount Wilson di 10 km/s, velocità assoluta della Terra calcolata in 200 km/s verso un apice con ascensione retta 17 ore e declinazione 65°. ⁸⁶ Questi ultimi calcoli erano in accordo con i dati dell'aprile del 1925 e, cosa ancora più importante, erano estremamente prossimi ai valori calcolati da Strömberg in base alle osservazioni delle velocità radiali delle stelle. Potrebbe essere interessante chiedersi cosa accadde tra il 18 e il 27 dicembre del 1925 in grado di modificare le conclusioni di Miller. È vero che Miller stava lavorando molto intensamente sui dati ricavati dalle sue osservazioni, ma non fu lui a trovare la soluzione finale. Evidenze documentali mostrano che fu il lavoro di Jason John Nassau (1893-1965), del *Department of Mathematics and Astronomy* alla *Case School*, a portare a tali cambiamenti. ⁸⁷

Grazie all'aiuto di Nassau, il 29 dicembre Miller poté presentare la relazione "*The Significance of the Ether-Drift Experiments of 1925 at Mt. Wilson*", come presidente uscente dell'*APS*, con un calcolo finale chiaro del moto assoluto della Terra. ⁸⁸ In tale resoconto, Miller affermò che tutti gli esperimenti MM eseguiti precedentemente avevano l'obiettivo di testare qualche particolare teoria dell'etere. La risposta a queste specifiche domande fu

⁸⁶ Telegramma Miller a Adams, 27 dicembre 1925, *HL, WAP*, box 8, fol. 46.802.

⁸⁷ L'aiuto fondamentale di Nassau è dimostrato dal fatto che Miller gli diede 200 \$ del premio ricevuto dall'*AAAS* per la sua comunicazione. Riguardo a ciò, Miller scrisse a Nassau: "*I am fully conscious of my deep obligation to you for assistance in solving the Ether-Drift problem. It would be impossible for me to have presented a report at Kansas City if you had not come to the rescue in the splendid way you did in the last few days, including the work of Christmas Day*". Miller a Nassau, 5 gennaio 1926, e Miller a Nassau, 23 febbraio 1926, *CWRUA*; Jason John Nassau Papers, 19 I N2(JNP), box 7.

⁸⁸ Questa relazione fu pubblicata l'anno seguente in Miller, D. C. (1926) "The Significance of the Ether-Drift Experiments of 1925 at Mt. Wilson", *Science*, 63 (1926): 433-43.

sempre negativa, ma, secondo lui, era sempre “*persisted a constant and consistent small effect which has not been explained*”.⁸⁹

Tra le due sessioni del 1925, Miller aveva compiuto un notevole cambio metodologico: egli stava ora cercando di analizzare i dati senza nessuna teoria predefinita sul moto terrestre con l’obiettivo di derivare tale moto direttamente dai risultati sperimentali. La relazione di Miller del dicembre 1925 esplicitò questo cambio metodologico come la reale novità alla base delle scoperte ivi riportate, perché gli esperimenti MM non avevano mai dato un risultato veramente nullo.

Se si analizza l’articolo di Miller, questo nuovo approccio metodologico, dichiarato nella relazione, non risulta completamente veritiero. Miller, infatti, utilizzò molte assunzioni sulla relazione tra gli esperimenti di *ether-drift* e il moto assoluto, le quali non erano sotto il giudizio sperimentale. Queste assunzioni giocarono un ruolo fondamentale nell’interpretazione dei dati così come nella scelta delle caratteristiche dell’apparato sperimentale. Vedremo in seguito queste assunzioni sia esplicite che implicite in dettaglio. Miller espresse chiaramente che il suo nuovo approccio faceva sì che gli esperimenti di *ether-drift* risultassero “*the most trying and fatiguing, as regard physical, mental, and nervous strain*” di qualunque altro lavoro Miller avesse svolto nella ricerca scientifica.⁹⁰

Egli si dedicò così assiduamente a tale lavoro, difficile e faticoso, perché era sicuro di aver trovato qualcosa di grande importanza. Questo qualcosa non era, evidentemente, legato alla semplice ricerca del valore del moto assoluto della Terra, ma alla confutazione della relatività. Il calcolo del valore del presunto moto assoluto non era, infatti, nelle capacità dello scienziato Miller che si appoggiò al lavoro di altri astronomi per riuscire a dare un senso razionale ai suoi dati.

I suoi risultati sperimentali spinsero Miller a concludere che egli aveva trovato uno spostamento di frange periodico rispetto al tempo siderale, e che non era possibile spiegarlo con i termini dipendenti dal fattore temperatura. Miller raggiunse quest’ultima conclusione con una linea di ragionamento che partiva dal fatto che l’effetto trovato era periodico ogni mezzo giro dell’interferometro e ogni giro era effettuato in un tempo di 20 secondi, così Miller poteva affermare che:

⁸⁹ Ibid., p. 437.

⁹⁰ Ibid.

*Any temperature effect, or any disturbing cause, which is not regularly periodic in each twenty seconds over an interval of fifteen minutes would largely be cancelled out in the process of averaging. The periodic effect remaining in the final average must be real.*⁹¹

Miller utilizzò la spiegazione sopra riportata per la posizione dello spostamento massimo, ma non per la quantità, che poteva essere modificata da vari effetti di disturbo. Miller sottolineò, inoltre, il fatto che i dati ricavati nelle osservazioni compiute a Mount Wilson nel 1925 erano molto più numerose di quelli di tutti gli altri esperimenti MM eseguiti in precedenza. In questo modo, Miller stava esprimendo la prima assunzione metodologica: l'enorme quantità dei dati da lui raccolti rendeva i suoi risultati più validi di quelli dei predecessori, il che implicava la realtà delle sue conclusioni.

Per rafforzare il valore delle sue affermazioni Miller mostrò, per la prima volta, i diagrammi dei suoi risultati, i quali indicavano una chiara periodicità rispetto al tempo siderale. Il fatto che la direzione e la grandezza dell'*ether-drift* osservato non dipendessero dal tempo locale, ma da quello siderale, fu una delle aggiunte più considerevoli rispetto alla comunicazione di aprile. L'altro fu che non vi era alcun cambio evidente nelle osservazioni compiute in diverse stagioni. Miller usò questo risultato per dimostrare che non vi era disaccordo tra i suoi esperimenti e quello MMX. L'assenza di una qualsiasi variazione di *ether-drift* nelle diverse stagioni implicava che la velocità orbitale della Terra non aveva alcuna ripercussione sull'effetto osservato e Miller, per rendere conto di questo fenomeno, calcolò che la velocità nello spazio doveva essere maggiore di 200 km/s. Questo valore, molto superiore a quello della velocità orbitale, rendeva quest'ultima impercettibile negli esperimenti a Mount Wilson, dov'era stato osservato un vento d'etere di soli 10 km/s per qualche inspiegata ragione.

Miller non possedeva alcuna teoria compiuta con la quale fosse possibile interpretare questa ridotta velocità osservata a Mount Wilson. Egli ipotizzò, così, che la Terra trascinasse l'etere e che questo trascinamento spostasse anche l'azimut del moto di circa 45°. In questo modo, contrariamente al suo proposito di non fare nessuna assunzione sul moto assoluto della Terra e di derivarlo direttamente dai dati, Miller fu costretto a ipotizzare ben due differenti trascinamenti dell'etere, uno per la velocità ridotta e uno per lo spostamento di azimut, per poter interpretare i dati come dovuti all'effetto di *ether-drift*. Tali assunzioni avevano un

⁹¹ Ibid., p. 438.

loro senso solo se connesse alle teorie dell'etere luminifero del XIX secolo e avevano un ruolo simile al richiamo di Silberstein della teoria di Stokes-Planck che, infatti, Miller citò come una probabile spiegazione. Tale ipotesi venne, però, fatta *en passant* senza alcuna discussione.

Dopo aver collegato i suoi risultati all'etere di Stokes, Miller affermò che vi erano chiare evidenze che l'*ether-drift* trovato a Mount Wilson non fosse così differente da quello osservato a Cleveland. Questo significava che il trascinamento dell'etere non si modificava significativamente con l'altitudine, almeno non fino all'altezza del Mount Wilson. Questa conclusione costituiva un cambiamento significativo rispetto ai precedenti annunci di Miller e una negazione delle conclusioni sulle quali Eddington aveva basato le sue iniziali critiche. Le ragioni di questo radicale cambiamento non risultano affatto chiare dalla lettura dei documenti pubblicati e non. Si può solamente dedurre che Miller iniziò a pensare a tale possibilità già dal settembre 1925, prima cioè di aver fatto i necessari calcoli ed è probabile che in esso giocarono un ruolo decisivo proprio le critiche di Eddington.⁹²

Alla fine della sua comunicazione, per poter spiegare un *ether-drift* di questo tipo, Miller propose, anche, la possibilità di una leggera modifica della contrazione di Lorentz-Fitzgerald senza assumere, perciò, alcun trascinamento dell'etere.

Riassumendo, nella relazione del dicembre 1925, Miller affermò chiaramente che le sue osservazioni potevano essere spiegate solo con un *ether-drift* di 10 km/s periodico rispetto al tempo siderale. Per quello che riguardava la ricerca del comportamento fisico dell'etere che potesse spiegare i suoi dati, però, lo stesso report aggiunse più confusione che chiarimenti. Miller non riuscì a trovare un comportamento credibile senza aggiungere diverse ipotesi *ad hoc* sul trascinamento dell'etere o su contrazioni fisiche dei corpi in direzione del moto. In questo modo, il piccolo spostamento di frange osservato da Miller poteva essere usato solo come una possibile confutazione della teoria della relatività ristretta, ma non come una prova a favore di una qualche teoria concorrente.

Cionondimeno, gli sforzi sperimentali di Miller gli fecero vincere il premio annuale di 1.000 \$ indetto dall'*AAAS* per la migliore relazione del 1925. Come notato da Swenson, la giuria del premio era costituita da noti scienziati, alcuni dei quali erano esperti nello sviluppo delle teorie fisiche, tra cui il fisico Karl T. Compton. Possiamo ritenere, perciò, tale premio una prova che, presso la comunità scientifica statunitense, gli esperimenti di Miller raggiunsero

⁹² Epstein a Einstein, 19 settembre 1925, *Caltech, PPE*, fol. 3.34.

all'inizio del 1926 un punto di estrema importanza e che la loro spiegazione era una questione aperta ritenuta fondamentale per gli sviluppi della fisica.

5.5. La reazione ai risultati di Miller

5.5.1. La campagna stampa

La stampa ebbe un ruolo considerevole sia nella diffusione che nella comprensione pubblica degli annunci di Miller del dicembre del 1925, così come nella ricezione scientifica degli stessi. Un giornalista scientifico, David Dietz di Cleveland, fu addirittura il primo a comunicare i risultati di Miller ad Einstein. In un cablogramma, Dietz chiese ad Einstein di commentare l'affermazione di Miller di aver osservato un effetto dovuto all'*ether-drift*. Questo cablogramma fu inviato in giorno di Natale del 1925, quattro giorni prima dell'inizio del meeting di Kansas City, in un momento in cui Miller stava ancora lavorando alacremente per cercare di comprendere il significato dei propri dati.⁹³ Molto probabilmente, Nassau aveva trovato un moto che avrebbe potuto spiegare i dati di *ether-drift* di Miller proprio nel giorno di Natale. La conoscenza repentina da parte del giornalista potrebbe indicare una stretta correlazione tra Dietz e Miller, dimostrata anche dal fatto che il primo continuò a supportare, con articoli giornalistici, le affermazioni del secondo contro la relatività negli anni seguenti.⁹⁴ Einstein non rispose alla richiesta di Dietz, ma lo stesso giorno scrisse all'amico Michele Besso (1873-1955) una lettera in cui ripeté la sua convinzione che i risultati di Miller fossero una conseguenza delle variazioni di temperatura ed affermò che non li aveva mai presi in seria considerazione.⁹⁵

La stampa ebbe un ruolo considerevole anche nell'accrescere in maniera veloce la fama dei risultati di Miller, ancor prima che essi venissero resi pubblici. Ci furono, infatti, almeno tre articoli giornalistici che anticiparono gli annunci sensazionali che Miller avrebbe fatto al convegno contro la relatività.⁹⁶ Uno di questi articoli fu particolarmente apprezzato dallo stesso Miller.⁹⁷ Il suo titolo "*Earth's Flight Through the Ether*" ci fornisce una possibile spiegazione del perché: l'autore si mostrava sicuro che Miller avesse trovato il valore del

⁹³ Dietz scrisse ad Einstein: "*president Miller American physical society announces discovery of ether drift says quote my work annuls second postulate Einstein theory stop please cable collect two hundred work opinion press rates*", telegramma Dietz a Einstein, 25 dicembre 1925, *CPAE* 17 266.

⁹⁴ Dietz pubblicò numerosi articoli sugli esperimenti di Miller considerati come una scoperta contraria alla relatività. Vedere la *press review* di Miller conservata in *CWRUA*, Papers of Dayton C. Miller (*PDM*), box 4.

⁹⁵ Einstein a Besso, 25 dicembre 1925, in A. Einstein e M. Besso (1979), *Correspondance 1903-1955* (Paris: Hermann, 1979), pp. 127-8.

⁹⁶ "Einstein Theory Born on Heights", *Cleveland Plain Dealer*, 24 dicembre 1924; "Case School Scientific Discovery", *Jefferson Ohio Gazette*, 19 dicembre 1925; "Earth's Flight Through Ether", *Cleveland News*, 1 dicembre 1925, *Press review* di Miller, *CWRUA*, *DMP*, box 4.

⁹⁷ Miller a Trautman, 7 dicembre 1925, *Press review* di Miller, *CWRUA*; *DMP*; box 4.

moto della Terra attraverso l'etere. Questo articolo locale stava cercando di creare un interesse verso il problema e, dopo gli annunci pubblici di Miller, Dietz poté scrivere l'articolo con il deciso titolo "*Einstein Theory Blast*".⁹⁸ Le parole di Dietz sottolinearono il significato anti-relativistico della scoperta di Miller con l'affermazione: "*Scientists gathered here consider Miller's findings the deadliest blow which has ever been dealt the theory of relativity*". L'articolo di Dietz riferì anche la risposta del presidente dell'*AAAS* Michael I. Pupin (1858-1935) in questi termini:

*Dr. Miller's work is of the most importance. The world of science has known Dr. Miller for the last 35 years as one of the most careful and skilful researchers in the world. His findings, if confirmed, mean that we must throw overboard the first half of the Einstein theory.*⁹⁹

Dietz era, come già detto, un fervente seguace delle conclusioni di Miller, ma la sua visione non era poco comune nel periodo immediatamente seguente la fine del 1925. La stampa statunitense diede una risonanza così grande alla scoperta di Miller e all'affermazione che questa confutasse le teorie di Einstein che essa fu percepita come l'evento più importante del convegno del dicembre 1925. Il premio conferito dall'*AAAS* non fece che accrescere questa opinione, cosicché è difficile affermare che il mondo scientifico non prendesse i risultati di Miller seriamente in quel momento.¹⁰⁰

Molti scienziati, al contrario, stavano dando loro un considerevole possibilità di essere un test fondamentale per il futuro della fisica anche se continuarono a utilizzare l'espressione "*if confirmed*", come fece anche Pupin nella frase sopra citata. Sembrerebbe così, che la relazione di Miller non ebbe un effetto capace di modificare l'attitudine della comunità scientifica statunitense verso i suoi risultati, secondo la quale ripetizioni dell'esperimento MM compiute da altri sperimentatori erano necessarie per poter testare direttamente le sue conclusioni.

⁹⁸ Dietz, D. "Einstein Theory Blast", *Citizens Cairo Illinois*, 29 dicembre 1925.

⁹⁹ Ibid., tale espressione fu ripetuta da Dietz in un altro articolo: "Theory Pushed by Einstein is Given Setback", giornale sconosciuto, ma molto probabilmente si tratta di *Cleveland Plain Dealer*; Press review di Miller, *CWRUA*; *DMP*, box 4.

¹⁰⁰ "Finds Our Universe Speeding to Dragon", *New York Times*, 30 dicembre 1925, p. 6.

5.5.2 Il dibattito teorico nel 1926

La prima di queste ripetizioni chieste dalla comunità scientifica statunitense fu compiuta dallo stesso Miller nel febbraio del 1926 sempre nella stessa posizione sul Mount Wilson. Tale esperimento confermò le precedenti osservazioni di Miller. Nel frattempo altre ripetizioni si stavano organizzando negli USA e in Europa che furono compiute tra il giugno del 1926 e la metà del 1930, nessuna delle quali, però, mostrò lo stesso effetto.

Contemporaneamente agli sviluppi sperimentali ci fu un dibattito teorico che mostra ulteriori elementi del problema legato agli annunci di Miller e alla peculiarità dell'attitudine statunitense verso di essi. L'impressione che l'esperimento continuasse ad essere *sub judice* è rafforzata da un articolo di Lodge scritto all'inizio del 1926. L'autorevole fisico britannico credeva fermamente nell'esistenza dell'etere, ma non utilizzò i risultati di Miller con l'obiettivo di rafforzare le sue convinzioni, piuttosto egli cercò di separare il risultato nullo dell'esperimento MMX, considerato giusto, dal problema della realtà dell'etere.¹⁰¹ Il fatto che Lodge non abbia neanche citato i risultati di Miller in tale articolo mostra la minor considerazione di cui questi godevano fuori degli USA.

Nel 1926, comunque, l'utilizzo del risultato di Miller come prova del moto assoluto fu molto limitato anche negli USA. Strömberg fu l'unico a scrivere sul moto cosmico trovato da Miller nell'articolo sulla distribuzione asimmetrica delle velocità radiali delle stelle osservata dall'autore. Tale asimmetria aveva condotto l'astronomo del *MWO* all'ipotesi di un moto cosmico con la velocità di 300 km/s verso un apice con coordinate $\alpha=307^\circ$ e $\delta=+56^\circ$, molto simili agli ultimi valori annunciati da Miller. Ad ogni modo, Strömberg concluse tale articolo con una minuziosa lista delle difficoltà in cui incappava un'interpretazione basata sull'*ether-drift* dei dati osservati da Miller. La più rilevante di queste difficoltà era ritenuta la "*predominant westerly deflexion of the 'ether-drift'*", la stessa difficoltà già evidenziata da Lorentz l'anno precedente.¹⁰²

La rivista *Nature* continuò ad offrire uno spazio considerevole alle discussioni sul significato dell'esperimento di Miller nel 1926. Nella stessa rivista, infatti, Lodge riaffermò il suo scetticismo verso una spiegazione basata sull'*ether-drift* di tali esperimenti e ne suggerì, anch'egli, una più plausibile basata sulle variazioni di temperatura.¹⁰³

¹⁰¹ Lodge, O. (1926a) "Scientific Worthies: XLIV. – Albert Abraham Michelson", *Nature*, 117 (1926): 1-6 p. 6.

¹⁰² Strömberg, G. (1926) "Miller's Ether Drift Experiment and Stellar Motions", *Nature*, 117 (1926): 482-83, p. 483.

¹⁰³ Lodge, O. (1926b) "On Prof. Miller's Ether Drift Experiment", *Nature*, 117 (1926): 854.

Miller rispose alla critica di Lodge nel numero seguente di *Nature* riaffermando che gli esperimenti MM non avevano mai fornito un risultato veramente nullo, ma solo negativo rispetto ai moti aspettati, e che lui stesso aveva fatto molte migliaia di osservazioni per poter testare altre possibili cause senza trovare altra spiegazione accettabile che quella dipendente dal moto nell'etere.¹⁰⁴

Un mese più tardi apparve una critica molto seria all'interpretazione di Miller da parte del teorico austriaco Hans Thirring (1888-1976).¹⁰⁵ Secondo questi, l'effetto trovato da Miller doveva essere attribuito a circostanze locali, data la grande irregolarità degli spostamenti di frangia misurati e la predominanza della direzione nord-ovest nella variazione diurna dell'effetto, lo stesso problema evidenziato da Lorentz e Strömberg. L'articolo di Thirring mostrava chiaramente che i risultati sperimentali di Miller erano incompatibili con ogni possibile *ether-drift* in una direzione assoluta e che la decisione di Miller di ridurre i dati rispetto al tempo siderale era incongrua. Per concludere le sue critiche, Thirring affermò che esistevano altri esperimenti più sensibili di quello MM come test per rivelare un eventuale *ether-drift*, per es. l'esperimento Trouton-Noble, il cui risultato negativo doveva essere considerato convincente (vedi par. 3.13). Il fisico sperimentale tedesco Tomaschek, inoltre, aveva ripetuto tale esperimento ad un'altezza di circa 3,5 km sopra il livello del mare confermando il risultato nullo.¹⁰⁶

Nel ragionamento di Thirring possiamo osservare una caratteristica costante delle discussioni teoriche concernenti le osservazioni di Miller. Da un lato, Thirring dimostrava che esistevano insuperati problemi teorici all'interno dell'interpretazione basata sull'*ether-drift* dei risultati di Miller; dall'altro, lo scienziato austriaco faceva riferimento ad esperimenti di *ether-drift* di diverso tipo che erano incompatibili con le conclusioni di Miller. Lo stesso Einstein aveva usato argomentazioni identiche, in un articolo pubblicato nel gennaio 1926 dal quotidiano tedesco *Vossische Zeitung*, con l'obiettivo di contrastare in modo diretto le affermazioni di Miller.¹⁰⁷

¹⁰⁴ Miller, D. C. (1926b) "Ether Drift Experiments", *Nature*, 117 (1926): 890.

¹⁰⁵ Thirring, H. (1926) "Prof. Miller's Ether Drift Experiments", *Nature*, 118 (1926): 81-2.

¹⁰⁶ Tomaschek, R. (1925) "Über Versuche zur Auffindung elektrodynamischer Wirkungen der Erdbewegung in groben Höhen I", *Annalen der Physik*, 76 (1925): 743-56.

¹⁰⁷ Einstein, A. (1926) "Meine Theorie und Millers Versuche", *Vossische Zeitung*, 19 gennaio 1926. Questo articolo fu scoperto da Hentschel e pubblicato nella sua interezza in Hentschel, K. (1996) "Einstein's Attitude Towards Experiments: Testing Relativity Theory 1907-1927", *Studies on History and Philosophy of Science*, 23 (1992): 593-624.

In questo brevissimo resoconto, Einstein aveva anche ripetuto l'affermazione pubblicata l'anno precedente sulla contraddizione insuperabile tra le teorie della relatività e i risultati di Miller, ma le irregolarità nelle osservazioni dello statunitense e l'esperimento di Tomaschek venivano qui utilizzati per sostenere in maniera chiara, che l'effetto trovato da Miller non aveva niente a che fare con un *ether-drift*.

Einstein concluse il suo breve articolo con un'ultima argomentazione per contrastare le affermazioni di Miller che risulta, però, più peculiare da un punto di vista storiografico. Einstein riprese le prime critiche mosse da Eddington basate sull'idea che un *ether-drift* dipendente dall'altitudine fosse estremamente improbabile. Questa critica sembrerebbe mostrare che Einstein non conoscesse le ultime conclusioni di Miller, espresse nel dicembre del 1925. Epstein lo aveva informato del cambio di punto di vista di Miller già nel settembre 1925 e non è chiaro il perché Einstein continui a riferirsi alla vecchia ipotesi.¹⁰⁸ Einstein, probabilmente, considerava questi cambi un'ulteriore conferma della debolezza delle argomentazioni di Miller, ma nel gennaio 1926 non sapeva che questi aveva espresso pubblicamente la nuova versione dell'effetto di *ether-drift*. Visto che le nuove affermazioni di Miller furono pubblicate solo nell'aprile del 1926, Einstein non ne conosceva ancora i particolari.

Anche l'uso delle evidenze sperimentali mostra che Einstein si stava riferendo alla vecchia ipotesi di un trascinamento dell'etere che decresceva con l'altitudine. Lo storico della scienza Hentschel sottolinea il fatto che Einstein, quando nomina gli esperimenti di Tomaschek, non si riferisce ai suoi esperimenti MM con la luce proveniente dalle stelle, che diede anch'esso un risultato negativo, ma alla ripetizione dell'esperimento di Trouton-Noble.¹⁰⁹ La ragione di questa citazione è che Einstein stava comparando un esperimento di *ether-drift* in altitudine con uno simile nella caratteristica dell'altezza sul livello del mare perché era ancora convinto che Miller stesse spiegando i dati ottenuti sul Mount Wilson con un *ether-drift* dipendente dall'altitudine.

Il fatto che Einstein si stesse riferendo ad un'interpretazione di Miller oramai superata creò una certa confusione negli USA sulla relazione tra gli esperimenti di Miller e le teorie della relatività perché l'articolo di Einstein venne tradotto in inglese e pubblicato su alcuni

¹⁰⁸ Epstein a Einstein, 19 settembre 1925, *loc. cit.*

¹⁰⁹ Tomaschek, R. (1923) "Über den Michelsonversuch mit Fixsternlicht", *Astronomische Nachrichten*, 219 (1923): 301-6. Vedere Hentschel (1996), *op. cit.*, p. 607.

quotidiani locali.¹¹⁰ Per comprendere meglio l'atteggiamento di Einstein possiamo riferirci ad una lettera cancellata diretta a Tolichus, l'editore dell'articolo del gennaio 1926. Nella lettera, mai spedita, Einstein non prendeva una posizione così forte come quella poi pubblicata, e le critiche all'interpretazione di Miller erano differenti. La conclusione di questa lettera cancellata era che altri esperimenti erano necessari per chiarire la questione una volta per tutte.¹¹¹

Alla fine, come abbiamo visto, Einstein preferì affermazioni molto differenti, soprattutto nella forza con cui si rigettava il possibile significato dell'esperimento di Miller contro le teorie della relatività. Non è possibile capire con certezza cosa accadde tra la prima copia e quella poi pubblicata. Una possibilità è, però, che una lettera del fisico francese relativista André Metz, spedita proprio in quei giorni, abbia spinto Einstein a dare opinioni più decise sugli esperimenti di Miller. Metz, infatti, scrisse che c'era molto clamore tra gli anti-relativisti a causa delle dichiarazioni di Einstein, pubblicate su *Science News* l'anno precedente, che la conferma dei risultati di Miller avrebbe confutato entrambe le teorie della relatività.¹¹² È possibile che la lettera di Metz abbia raggiunto Einstein proprio mentre costui stava completando la propria lettera a Tolichus, conducendolo ad affermare in maniera netta che egli non credeva che i risultati di Miller dipendessero dall'*ether-drift*.

Questa scelta non rimase senza effetti perché Miller lesse nei quotidiani statunitensi la cruda frase di Einstein "*There exists, however, in my view, practically no possibility that Prof. Miller is right*".¹¹³ Questa frase, scritta su un quotidiano e senza giustificazioni approfondite, potrebbe aver accresciuto il desiderio di Miller di confutare la relatività e di difendere la sua abilità come osservatore. A maggio dello stesso anno, Miller rispose direttamente ad Einstein con una lettera nella quale lo statunitense continuò a difendere la sua competenza ripetendo che egli aveva testato l'effetto di temperatura e che questo non poteva essere la causa dell'effetto trovato. Il nucleo del ragionamento di Miller su questo

¹¹⁰ Tolichus, C. "Einstein is ready to bet on his theory", quotidiano ignoto, 16 gennaio 1926; e "Einstein Bets Miller is Wrong", *Cleveland Plain Dealer*, 16 gennaio 1926, Press review di Miller, *CWRUA, DMP*, box 4. Il fatto che questi articoli siano presenti nell'archivio di Miller tra gli articoli di giornali conservati dallo stesso Miller fa capire che questi era perfettamente a conoscenza delle opinioni di Einstein.

¹¹¹ Copia cancellata della lettera Einstein a Tolichus, 11 gennaio 1926, *CPAE* 17 268-1.

¹¹² Metz a Einstein, 8 gennaio 1926, in Einstein, A. (1989) *Ouvres Choises 4 - Correspondances Français : Letters Choises et présentées par Michel Biezunski* (Paris : Editions du SEUIL-Editions du CNRS 1989), p. 212.

¹¹³ Tolichus (vedi nota 110).

punto era che un effetto dovuto alla temperatura sarebbe stato cancellato nella media delle lunghe serie di osservazioni.¹¹⁴

Dopo aver ricevuto la lettera di Miller, Einstein scrisse a Lorentz che gli esperimenti di Miller erano veramente interessanti anche se egli continuava a non vedere alcuna ragione per interpretare i loro risultati come se questi fossero dovuti ad un *ether-drift*. Nella stessa lettera, poi, Einstein affermò che stava aspettando di vedere quali sarebbero state le conclusioni di altre ripetizioni effettuate da altri fisici sperimentali.¹¹⁵ Le espressioni utilizzate da Einstein in questa lettera sono difficilmente comprensibili perché egli aveva ripetutamente affermato di non aver mai preso i risultati di Miller in seria considerazione, ma la lettera di Miller e l'interesse di Lorentz avevano, forse, creato in lui dei dubbi. L'unica altra spiegazione possibile è che Einstein non volesse essere troppo duro con tali esperimenti conoscendo il fatto che Lorentz era l'unico fisico teorico europeo a considerare gli esperimenti di Miller di una certa rilevanza dal punto di vista teorico.¹¹⁶ Molti altri teorici europei erano molto più scettici di lui nel periodo compreso tra il primo annuncio di Miller, nell'aprile del 1925, e le prime ripetizioni con risultato negativo nell'agosto-settembre del 1926. Tra questi spiccano i nomi di Max von Laue (1879-1960), Max Planck, Paul Ehrenfest (1880-1933), Metz, Epstein, Emil Cohn (1854-1944), J. Weber e Max Born (1882-1970), tutti contrari all'interpretazione data da Miller.¹¹⁷

La situazione negli USA era differente e tipo diverso di risposta teorica arrivò da Leigh Page (1884-1952) e M. Sparrow, i quali proposero una sottile modifica della teoria della relatività sia ristretta che generale, assumendo che lo spazio fosse anisotropo. I due autori concludevano il loro articolo affermando che a causa di tale anisotropia spaziale le trasformazioni di Lorentz non potevano valere in maniera esatta, come Swann aveva suggerito l'anno precedente, spiegando in questo modo l'effetto trovato da Miller.¹¹⁸

¹¹⁴ Miller a Einstein, 20 maggio 1926, *loc. cit.*

¹¹⁵ Einstein a Lorentz, 22 giugno 1926, *CPAE* 16-608.

¹¹⁶ Einstein a Millikan, 1 settembre 1925, *loc. cit.*

¹¹⁷ Questi nomi appaiono nella corrispondenza di Einstein contenuta nel fol. Miller, *CPAE*. Von Laue e Planck sono citati nella lettera Einstein a Lorentz, 22 giugno 1926, *loc. cit.*; Ehrenfest esprime il suo scetticismo in Ehrenfest a Einstein, 16 ottobre 1925, *loc. cit.*; Metz in Metz a Einstein, 8 gennaio 1926, *loc. cit.*; Epstein esprime il suo scetticismo in Epstein a Einstein, 19 settembre 1925, *loc. cit.*; Cohn a Einstein, 11 settembre 1925, *CPAE* 17 263; Weber a Einstein, 23 dicembre 1925, *CPAE* 23 284; la moglie di M. Born, inoltre, scrisse ad Einstein che il marito si era stupito dell'inaffidabilità dello strumento di Miller dopo la sua visita al *MWO*: Hedi Born a Einstein, 11 aprile 1926, in Einstein, A., Born H., e Born, M. (1973) *Scienza e vita, lettere 1916-1955* (Torino: Einaudi, 1973), p. 107

¹¹⁸ Page, L., e Sparrow, M. (1926) "Relativity and Miller's Repetition of the Michelson-Morley Experiment", *Physical Review*, 28 (1926): 384-91.

Nello stesso periodo, Miller stava continuando ad insistere sul significato fondamentale del suo risultato con un'altra relazione portata al convegno dell'*APS* tenutosi nell'aprile del 1926. La perseveranza di Miller diede lo spunto per un dibattito sulla relatività, tenutosi nel maggio dello stesso anno presso l'*Indiana University*, tra Robert Daniel Carmichael (1879-1967), Harold Davis, William Duncan MacMillan (1871-1948) e Mason E. Hufford, i primi due favorevoli alle relatività e gli altri contrari ad essa.

I risultati annunciati da Miller avevano rafforzato le argomentazioni degli scienziati che si opponevano alla relatività perché li consideravano una netta confutazione delle teorie di Einstein. Lo spazio dedicato agli esperimenti di *ether-drift* di Miller, durante tale dibattito, fu enorme. Questi vennero, infatti, usati come l'unica evidenza sperimentale contraria alle teorie della relatività perché, secondo Hufford, non era possibile “*to attribute these results to experimental or other errors*”.¹¹⁹

Davis e Carmichael contestarono l'interpretazione anti-relativistica dei risultati di Miller con argomenti molto simili a quelli resi pubblici da Thirring pochi mesi prima. Davis, per esempio, fece notare che il moto conosciuto della Terra non si accordava con i dati trovati da Miller e che il nuovo moto cosmico proposto dallo sperimentatore statunitense era stato scelto arbitrariamente senza alcun accordo con la distribuzione di materia nell'universo. Dopo le critiche teoriche al calcolo del moto cosmico di Miller, Davis nominò la ripetizione dell'esperimento di Trouton-Noble compiuta da Tomaschek, per contrastare l'ipotesi di un *ether-drift* che aumentasse con l'altitudine. Davis stava reiterando, così, lo stesso errore già compiuto da Einstein e da Thirring; si stava, cioè, riferendo alla precedente interpretazione di Miller delle proprie osservazioni. Davis, inoltre, considerò la possibilità che Miller avesse trovato un effetto reale, dovuto al moto terrestre, ma che non potesse essere usato contro la teoria della relatività ristretta perché bisognava tener conto degli effetti della accelerazione dovuto alla rotazione terrestre.¹²⁰ La comunicazione di Davis era un confuso sommario di argomenti già pubblicati altrove da diversi autori che contestavano la valenza anti-relativistica degli esperimenti di Miller ed è lacunosa in quanto si riferisce, anch'essa, ad un'interpretazione ormai superata dallo stesso Miller.

L'altro relatore a favore della relatività, Carmichael, affermò esplicitamente che l'esperimento di Miller era di considerevole importanza, ma che non poteva dire nulla

¹¹⁹ Hufford, H. T. “Is the Experimental Evidence Conclusive?”, in Carmichael et al. (1927) *A Debate on the Theory of Relativity* (Chicago/London: Open Court, 1927): 64-89, p. 75.

¹²⁰ Davis, H. T. “The Experimental Verification of Relativity” in *Ibid.*, pp. 90-116.

contro i principi sui quali Einstein aveva basato le sue teorie. La motivazione di tale affermazione risiedeva nel fatto che i risultati di Miller potevano essere dovuti all'effetto della massa terrestre, in altre parole Carmichael stava accennando alla possibilità di una spiegazione relativistico-generale dell'effetto. Un tale atteggiamento era lo stesso già tenuto da Swann, Page e Sparrow ed era tipico tra i fisici statunitensi che erano impegnati nel programma di ricerca relativistico. Tale attitudine non sembra trovare similitudini con gli atteggiamenti dei teorici europei.

L'altra evidente differenza fu che l'uso dei risultati di Miller contro le teorie della relatività fu maggiore negli USA che in Europa. Queste differenti caratteristiche della risposta statunitense erano già presenti nelle reazioni ai primi annunci di Miller del 1925, ma, nel 1926, sembrarono definirsi maggiormente.

I documenti che ho analizzato e gli altri studi compiuti sulla ricezione statunitense della relatività portano a supporre tre cause principali tra loro interconnesse per queste differenze. Prima di tutto, negli USA non era inusuale ritenere i principi della teoria della relatività ristretta una generalizzazione induttiva del risultato nullo dell'esperimento MMX e, per questo, l'esperimento di Miller era ritenuto un *experimentum crucis* da molti scienziati.¹²¹

La seconda ragione è di tipo sociologico. Miller era un autorevole membro della comunità scientifica degli USA, era considerato un osservatore abile e preciso e, soprattutto, era ritenuto un esperto degli esperimenti di *ether-drift*. In particolare, egli ricopriva il ruolo di presidente dell'*APS* quando annunciò i suoi risultati nel 1925. Il ruolo autorevole di Miller all'interno della comunità scientifica statunitense ebbe come conseguenza il considerevole credito di cui i suoi risultati godettero nel dibattito statunitense sulle teorie della relatività. Legata a questa ragione di natura sociologica troviamo l'ultima causa possibile: all'interno della comunità scientifica statunitense gli esperimenti di Miller ebbero una notevole fama a causa della campagna stampa che insistette sul significato anti-relativista di tali esperimenti in molti articoli tra il 1925 e il 1926.

Un ulteriore elemento che potrebbe aver influito sul peso dei risultati di Miller nel mondo scientifico statunitense fu che questi furono annunciati in due meeting ai quali erano presenti gli esponenti di differenti discipline. La maggior parte di questi non aveva una

¹²¹ Questo modo di considerare la teoria della relatività ristretta una generalizzazione del risultato nullo dell'esperimento MM fu espressa da Millikan in Millikan, R. A. (1949) "Albert Einstein on His Seventieth Birthday", *Reviews of Modern Physics*, 21 (1949): 343-45. Lo storico della scienza Holton sottolineò che questo punto di vista era notevolmente diffuso. Vedere Holton, G. (1969) "Einstein, Michelson and the 'crucial' experiment", *Isis*, 60, (1969): 133-97, p. 133.

precisa conoscenza degli sviluppi della fisica teorica, così la platea fu colpita dalle espressioni dell'autorevole Miller.

5.6. Le altre ripetizioni dell'esperimento MM e il ruolo di Michelson (1926-30)

5.6.1. L'esperimento di Piccard e Stahel sul pallone aerostatico in Europa (1926)

Il dibattito tenutosi all'*Indiana University* mostra che la comunità scientifica statunitense del periodo aveva ancora una posizione teorica ambigua verso i risultati degli esperimenti di Miller e che regnava un certa confusione rispetto al loro significato ed alla loro veridicità.

Alla fine del dibattito, i due principali contendenti, MacMillian e Carmichael si mostrarono d'accordo sulla necessità di altre ripetizioni dell'esperimento MM per poter decidere tra la teoria della relatività ristretta e una teoria basata sull'etere, cosa che appare quasi in contraddizione con alcune delle argomentazioni utilizzate dai relativisti. In tale confuso approccio, sembra che, ancora una volta, l'esperimento MM fosse considerato un *experimentum crucis* tra la teoria della relatività ristretta e le teoria dell'etere. Così, gli scienziati statunitensi che s'interessarono agli esperimenti di Miller furono d'accordo sulla necessità di altre ripetizioni compiute da altri osservatori. Perfino Einstein si dimostrò decisamente interessato a tali ripetizioni, poiché il suo approccio epistemologico lo portava alla convinzione che l'esperimento MM avrebbe dovuto dare un risultato esattamente nullo.

I primi a pianificare una ripetizione del genere furono Epstein e Millikan al *Caltech*, fin dal luglio 1925, ed Einstein pose un certa attenzione verso questo progetto fin dall'inizio.¹²²

Una relazione molto più significativa, però, Einstein la ebbe con un'altra ripetizione dell'esperimento MM, compiuto nel continente nel quale viveva. Nel settembre 1925, lo scienziato svizzero Auguste Antoine Piccard (1884-1962) aveva proposto ad Einstein un possibile esperimento MM su un pallone aerostatico in modo da poter controllare le conclusioni di Miller ad una più elevata altitudine.¹²³ La folta corrispondenza del periodo tra Piccard e Einstein dimostra che il secondo diede un sostegno diretto alla realizzazione dell'idea del primo.¹²⁴ Le lettere di raccomandazione di Einstein, infatti, permisero di ottenere dei fondi da istituzioni europee ed un aiuto dalle autorità tedesche per potere completare il difficile esperimento ideato da Piccard. Oltre a questo aiuto istituzionale,

¹²² Epstein a Einstein, 19 settembre 1925, *loc. cit.*

¹²³ Piccard a Einstein, 21 settembre 1925, *CPAE* 19 211.

¹²⁴ Piccard a Einstein, 20 novembre 1925, *CPAE* 19 214; Piccard a Einstein, 14 ottobre 1925, *CPAE* 19 212; e Piccard a Einstein, 21 ottobre 1925, *CPAE* 19 213.

Einstein diede anche qualche consiglio scientifico per evitare gli effetti di temperatura, che egli riteneva ancora i responsabili dei risultati positivi di Miller.¹²⁵

Alla fine del luglio del 1926, Piccard e il suo assistente Stahel riuscirono a realizzare l'esperimento, la cui conclusione fu che la velocità di *ether-drift* all'altezza raggiunta dal pallone era inferiore al limite di precisione, calcolato in 9 km/s. Piccard comunicò immediatamente il risultato a Einstein che lo considerò una verifica del risultato nullo.¹²⁶

Piccard e Stahel pubblicarono il loro risultato ad agosto con una conclusione leggermente differente rispetto a quella scritta a Einstein: lo spostamento di frange, se esisteva, era dello stesso ordine dell'errore sperimentale, corrispondente ad una velocità di circa 7 km/s, ma questo valore non poteva essere usato per confutare il valore di *ether-drift* espresso da Miller.¹²⁷

Piccard aveva proposto l'esperimento nel settembre del 1925, quando l'intero mondo scientifico, compreso Einstein, pensava ancora che l'altitudine di Mount Wilson costituisse la differenza tra i risultati di Miller e le osservazioni precedenti. Tra la proposta dell'esperimento di Piccard e la sua realizzazione passarono dieci mesi a causa delle difficoltà nella costruzione dell'apparato e dell'attesa per le giuste condizioni meteorologiche, cosicché l'esperimento fu eseguito quando già Miller aveva cambiato radicalmente e pubblicamente la propria opinione sulla connessione tra *ether-drift* ed altitudine.¹²⁸ Lo sfasamento temporale tra la teoria che Piccard voleva verificare e le ultime conclusioni di Miller rese le sue osservazioni inconcludenti: le difficoltà di misurazione non permisero né di confermare né di confutare il valore di *ether-drift* trovato da Miller.

La prima ripetizione dell'esperimento MM dopo le affermazioni di risultato positivo di Miller permetteva, così, solo di affermare che l'*ether-drift*, se esisteva, non variava con l'altitudine, una conclusione che Miller aveva già accettato alla fine del 1925.

¹²⁵ Piccard a Einstein, 7 marzo 1926, *CPAE* 19 215; e Einstein a Piccard, 14 marzo 1926, *CPAE* 19 216.

¹²⁶ Piccard a Einstein, 30 luglio 1926, *CPAE* 19 220; Einstein a Millikan, 8 gennaio 1927, *Caltech, PRM*, fol. 39.7. Gli esperimenti furono fatti a due altitudini, 2500 m e 4500m, sopra il livello del mare.

¹²⁷ Piccard, A., e Stahel, E. (1926) "L'expérience de Michelson, réalisée en ballon libre", *Comptes Rendus*, 183 (1926): 420-21.

¹²⁸ Piccard a Einstein, 15 maggio 1926, *CPAE* 19 218; e Piccard a Einstein, 23 giugno 1926, *CPAE* 19 219.

5.6.2. *Gli esperimenti MM del Caltech (1926-27)*

Nello stesso periodo due altre ripetizioni si stavano compiendo negli USA: lo staff del *Caltech* stava continuando a lavorare all'esperimento che Epstein aveva annunciato ad Einstein l'anno precedente, mentre il direttore del vicino *MWO* aveva chiesto a Michelson di ripetere egli stesso un esperimento MM. Per comprendere perché due istituzioni statunitensi così vicine, spazialmente e organizzativamente, intrapresero lo stesso programma sperimentale è necessario approfondire i dettagli di queste ripetizioni.

Epstein e Millikan avevano pianificato la ripetizione dell'esperimento MM poco dopo il primo annuncio di Miller di aver trovato un risultato positivo perché essi erano molto scettici rispetto alle affermazioni del fisico di Cleveland e al suo incomprensibile cambio d'ipotesi circa la relazione tra altitudine ed effetto osservato. Il *Caltech* aveva, inoltre, all'interno del proprio staff un giovane ricercatore di fisica sperimentale, il cui lavoro appariva congeniale a tale programma di ricerca. Roy J. Kennedy aveva, infatti, proposto nel 1922 un altro esperimento di *ether-drift* basato sui principi dell'ottica con l'obiettivo di testare la trasformata temporale di Lorentz in maniera indipendente da quelle spaziali.¹²⁹

Nel momento in cui Kennedy propose tale esperimento, stava lavorando al *Palmer Physical Laboratory* a Princeton, ma sembra che non compì l'esperimento in tale istituzione. All'inizio del 1924, Kennedy vinse una sovvenzione per compiere il suo esperimento come *National Research Fellow* e chiese al direttore del *MWO* il permesso di compierlo sul Mount Wilson.¹³⁰ Adams non acconsentì alla richiesta di Kennedy ritenendo che il *MWO* non fosse idoneo per il tipo di esperimento proposto. Kennedy, però, insisté con due forti motivazioni per compiere l'esperimento al *MWO*:

*First, many physicists have objected to the results of experiments (among them Michelson's) carried out at so low an altitude that the ether is possibly dragged along with the earth's surface. If such an entraining effect exists, it must be less at the elevation of your observatory than at any other suitable place in this country. Second the average university laboratory is subject to the vibration from nearby railways, machine-shops, etc. Such disturbances are presumably minimized at Mount Wilson.*¹³¹

¹²⁹ Kennedy, R. (1922) "Another Ether-Drift Experiment", *Physical Review*, 20 (1922): 26-33.

¹³⁰ Kennedy a Hale, 2 maggio 1924, *HL, WAP*, fol. 38 650. Kennedy mandò la lettera a Hale perché ancora convinto che fosse lui il direttore del *MWO*, quando in realtà tale carica era già da due anni posseduta da Adams. La corrispondenza sull'argomento poi proseguì tra Adams e Kennedy.

¹³¹ Kennedy a Adams, 25 luglio 1924, *HL, WAP*, fol. 38 650.

Adams continuò a rispondere in maniera negativa alle argomentazioni di Kennedy, ma, dopo alcuni scambi epistolari, trovò una possibile soluzione: Kennedy avrebbe potuto chiedere a Millikan di compiere i suoi esperimenti al *Norman Bridge Laboratory* del *Caltech*. Questo avrebbe reso più semplice un eventuale trasporto dell'apparato sul Mount Wilson nel caso si fosse reso necessario compiere l'esperimento ad una più elevata altitudine.¹³² Nell'atteggiamento di Adams verso la richiesta di Kennedy troviamo alcuni elementi che possiamo ritenere emblematici: per prima cosa, Adams chiese un'opinione a Michelson prima di rispondere alla proposta di Kennedy e, cosa ancora più rilevante, rifiutò di accogliere gli esperimenti di Kennedy nello stesso periodo in cui accettava di ospitare la ripetizione degli esperimenti di Miller. Questo secondo elemento non sfuggì a Kennedy che ne chiese spiegazione, al che Adams si difese affermando che Miller aveva chiesto la possibilità di compiere altri esperimenti al *MWO* dopo molti tentativi a Cleveland, i quali avevano rese necessarie ulteriori osservazioni ad altezze elevate.

La risposta di Adams non fu molto convincente ed è probabile che una motivazione più vera risiedesse nella differenza tra lo *status* di Miller e quello di Kennedy all'interno della comunità scientifica statunitense: il primo era un eminente ed esperto membro di tale comunità, mentre il secondo era un giovane *National Research Fellow* al suo primo esperimento. Adams, con ogni probabilità, riteneva che fosse un rischio supportare a livello logistico il lavoro del giovane Kennedy su queste basi e propose la mediazione di iniziare i lavori nel vicino *Caltech*.¹³³

La risposta di Adams è illuminante anche da un punto di vista teorico in quanto dimostra la profonda confusione che regnava presso la comunità scientifica statunitense rispetto al soggetto degli esperimenti di *ether-drift*. Il ragionamento di Adams, infatti, appariva in qualche modo irrazionale. Nel 1924 Miller chiese di poter ripetere gli esperimenti nel *MWO* perché ancora convinto che l'*ether-drift* dipendesse dall'altitudine e questo implicava che anche Kennedy avrebbe dovuto compiere i suoi esperimenti alla stessa altezza per trovare un qualche *ether-drift*. Sembra, perciò, che la risposta di Adams non si basasse su basi teoretiche.

¹³² Adams a Kennedy, 31 luglio 1924, *HL*, *WAP*, fol. 38 650.

¹³³ Adams a Kennedy, 19 luglio 1924, *HL*, *WAP*, fol. 38 650.

Ad ogni modo, la mediazione compiuta da Adams permise a Kennedy d'intraprendere il lavoro al *Caltech* dall'autunno del 1924, ma costui non completò l'esperimento per cui aveva ricevuto la *fellowship*. I risultati annunciati dal Miller nell'aprile del 1925 condussero Millikan a cambiare l'esperimento sul quale Kennedy doveva lavorare. Il direttore del *Caltech* riteneva, infatti, che prima di allestire esperimenti di *ether-drift* di tipo differente, sarebbe stato necessario controllare le conclusioni di Miller sugli esperimenti MM.

Kennedy, perciò, cominciò la progettazione di un esperimento MM con un apparato più sensibile tra l'estate e l'autunno del 1925. Il lungo lavoro di preparazione permise a Kennedy di realizzare l'esperimento solo nel settembre del 1926. I risultati di questo esperimento furono comunicati immediatamente dopo al convegno di settembre della *NAS* e furono pubblicati a novembre sulle *Publications of NAS*.¹³⁴

Kennedy iniziò la sua relazione con una critica all'eccessiva grandezza dell'interferometro di Miller. Un percorso ottico di 65 metri implicava il fatto che una leggera differenza di pressione o temperatura tra i due bracci dell'interferometro avrebbe potuto portare ad un effetto della grandezza osservata, interpretato da Miller come dovuto all'*ether-drift*. Lo strumento di Kennedy possedeva, invece, un percorso ottico di circa 4 metri interamente racchiuso in una struttura metallica sigillata contenente elio alla pressione atmosferica. In questo modo, Kennedy aveva ottenuto uno strumento di considerevole sensibilità, ma la sua procedura mostrava anche che il suo punto di partenza era molto diverso da quello di Miller. Kennedy cercò di accrescere la sensibilità dello strumento con l'eliminazione di qualsiasi elemento di disturbo, mentre Miller eliminò qualsiasi fattore che potesse alterare artificialmente le condizioni ambientali per poter osservare l'*ether-drift* nell'aria libera. L'approccio di Miller era basato espressamente sull'assunzione che gli effetti dovuti a cause differenti dal reale *ether-drift* sarebbero poi stati eliminati con la media un elevato numero di misure. La teoria alla base degli esperimenti di Kennedy e di Miller era la stessa, com'era identico l'effetto che i due fisici stavano cercando, mentre la loro metodologia era sostanzialmente differente. Questa differenza riguardava un'ipotesi teorica sull'etere: mentre Miller riteneva che le pareti di una stanza potessero trascinare l'etere contenuto al loro interno, Kennedy ideò un esperimento in cui tale ipotesi non veniva presa in nessuna

¹³⁴ Kennedy, R. J. (1926) "A Refinement of the Michelson-Morley Experiment", *Publications of the National Academy of Sciences*, 12 (1926): 621-29.

considerazione, probabilmente perché era considerata implausibile in base ad altre motivazioni.

Gli accorgimenti di Kennedy nelle sezioni ottiche del suo interferometro e nei test per controllare l'occhio dell'osservatore resero il suo esperimento estremamente preciso. Kennedy, inoltre, aveva l'obiettivo dichiarato di controllare un'ipotesi molto specifica, ossia l'*ether-drift* in una determinata direzione dello spazio, coincidente con quello trovato da Miller. Poiché Kennedy sapeva che Miller aveva abbandonato l'ipotesi della dipendenza dell'*ether-drift* dall'altitudine, egli compì le sue prime osservazioni al *Norman Bridge Laboratory* a Pasadena. L'apparato di Kennedy era in grado di mostrare uno spostamento di frange grande un quarto dell'effetto trovato da Miller, ma il fisico non osservò alcuno *shift* dipendente dall'orientazione dello strumento. Egli ritenne, così, che non fosse necessario prendere la media di un certo numero di osservazioni. Per evitare le possibili critiche che l'effetto potesse realmente dipendere dall'altitudine, anche se Miller non proponeva più questa ipotesi, Kennedy compì ulteriori osservazioni sul Mount Wilson, ma "*here again the effect was null*".¹³⁵

Il fatto che i risultati di Kennedy trovarono spazio solo sulle *Publications of NAS* fece sì che questi non ebbero un'immediata notorietà. Tale esperimento era, però, ritenuto estremamente accurato dallo staff del *Caltech* che non ritenne necessario proseguire le osservazioni con lo stesso strumento, nonostante la scarsa notorietà del suo risultato. Si decise, perciò, di provare a migliorare ulteriormente lo strumento prima di successive osservazioni. La ripetizione con un apparato ancora più preciso venne eseguita da K. K. Illingworth un anno dopo e i suoi risultati vennero pubblicati sulla nota rivista *Physical Review*.¹³⁶ L'apparato era essenzialmente lo stesso utilizzato da Kennedy, con alcune migliorie nel percorso ottico che permettevano di mostrare un presunto *ether-drift* maggiore di 1 km/s. Ancora una volta non fu osservato alcuno spostamento di frange dipendente dall'orientazione dello strumento. Diversamente da Kennedy, Illingworth fece l'esperimento solo a Pasadena e pubblicò anche i dati e non solo le conclusioni. Secondo lo sperimentatore

¹³⁵ Ibid., p. 628.

¹³⁶ Illingworth, K. K. (1927) "A Repetition of the Michelson-Morley Experiment Using Kennedy's Refinement", *Physical Review*, 30 (1927): 692-96.

le sue osservazioni erano decisamente in contraddizione con quelle di Miller e ribadivano il risultato sostanzialmente nullo dell'esperimento MMX.¹³⁷

A dispetto dell'ottima sensibilità dei loro strumenti, gli esperimenti di Kennedy e Illingworth non furono sufficienti a fermare il dibattito sull'*ether-drift* trovato da Miller. Tali esperimenti, inoltre, non sono molto citati nella letteratura contemporanea, a differenza di Miller, le cui osservazioni vengono a volte nominate come la più estensiva serie di misure dell'esperimento MM.¹³⁸ La ragione di questa scarsa rilevanza degli esperimenti compiuti al *Caltech* non è molto chiara e sembra che il lavoro di Michelson ebbe un'influenza decisamente maggiore sul rigetto definitivo dei risultati di Miller da parte della comunità scientifica statunitense.

5.6.3 Il ruolo di Michelson

Negli anni '20, all'interno della comunità scientifica statunitense, Michelson era la voce più autorevole nel campo degli esperimenti ottici di *ether-drift*. Le ragioni principali dell'autorevolezza di Michelson in questo campo erano principalmente due. Primo, era l'inventore dell'esperimento MM e, in secondo luogo, la sua abilità sperimentale aveva fatto sì che fosse il primo statunitense a vincere il premio Nobel per la Fisica. L'esperimento MMX era ritenuto una delle evidenze sperimentali fondamentali che avevano portato alla nascita della teoria della relatività ristretta e, per tale ragione, era considerato uno dei lavori più significativi nella carriera di Michelson. Costui, com'è noto, non apprezzava, però, le conseguenze teoriche del suo famoso esperimento. Egli, infatti, non accettò mai il rigetto del concetto di etere come sostegno necessario alla propagazione della luce.

A dispetto della rilevanza di questo esperimento, Michelson non lo ripeté mai prima del 1926 e non è semplice comprendere perché egli aveva lasciato la sua ripetizione a Morley e Miller all'inizio del XX secolo. Ci sono poche e indirette fonti per cercare di capire il

¹³⁷ Alcuni anti-relativisti contemporanei non sono d'accordo con l'interpretazione di risultato nullo dei dati di Illingworth. Vedere, per es., Munera, H. A. (1998) "Michelson-Morley Experiments Revised: Systematic Errors, Consistency Among Different Experiments, and Compatibility with Absolute Space", *Apeiron*, 5 (1998): 37-54. Un commento alle analisi anti-relativiste contemporanee va oltre i propositi del mio resoconto storiografico. È qui sufficiente affermare che tali analisi non hanno una considerevole rilevanza presso la comunità scientifica contemporanea.

¹³⁸ Vedere, per es., Jenkins, F. A., e White, H. E. (1950) *Fundamentals of Optics* (2nd ed., New York/Toronto/London: McGraw-Hill, 1950), p. 398; Van Name, F. W. (1952) *Modern Physics: Developments of the Twentieth Century* (New York: Prentice-Hall, 1952), p. 84; Richtmyer, F. K. (1934) *Introduction to Modern Physics* (2nd ed., New York: McGraw-Hill, 1934), p. 715. Per approfondimenti vedere par. 2.3.2.

comportamento di Michelson, ma la loro combinazione permette un'interpretazione abbastanza precisa delle sue motivazioni.

Da uno sguardo d'insieme alla sua carriera scientifica è possibile formulare una prima ipotesi. Il suo approccio ai problemi sperimentali, infatti, rimase invariato nel corso degli anni e mostra che egli fu un fisico dotato di straordinaria curiosità, che desiderava imbattersi in sfide sempre nuove e che preferiva la creazione di nuovi metodi sperimentali piuttosto che la ripetizione di un lavoro già fatto. L'atteggiamento di Michelson sembra essere questo anche nel caso dell'esperimento MM.

Come rimarcato da Miller e molti altri anti-relativisti, l'esperimento MMX non fu mai ripetuto in altre stagioni, anche se questa ripetizione era in programma per poter stabilire se ci fosse qualche compensazione inattesa dovuta al moto cosmico del Sole. Morley e Miller riesumarono questo programma di ricerca quindici anni più tardi, mentre Michelson preferì, invece, creare un nuovo tipo di esperimento, il cui obiettivo era l'osservazione della possibile dipendenza dall'altitudine dell'*ether-drift*.¹³⁹ Anche in questo caso Michelson ottenne un risultato nullo: se la Terra trascinava l'etere con sé, il suo esperimento dimostrava che questo trascinamento era della stessa quantità per molti chilometri sopra il livello del mare (vedi par. 3.11). Dopo che gli esperimenti di Morley-Miller furono eseguiti, Michelson non li nominò mai nella letteratura scientifica, ma dalla corrispondenza privata è evidente che lui aveva capito da Morley che questi avevano confermato il risultato nullo e che il leggero spostamento di frange osservato dipendeva dai cambi di temperatura (vedi par. 5.3.1).

Il ruolo di Michelson nella storia degli esperimenti di Miller divenne centrale nuovamente nel 1920, quando fu chiamato a giudicare la proposta dell'ultimo di ripetere l'esperimento MM presso il *MWO*. Richiamo qui l'opinione di Michelson già riportata altrove: la possibilità di trovare un *ether-drift* era così scarsa che egli non vedeva alcuna ragione di spendere la cifra necessaria.

L'attitudine scettica di Michelson è evidente anche nella contraddittoria relazione che ebbe con l'esperimento di Michelson-Gale, che iniziò a progettare l'anno seguente. Dato che in questo esperimento una conferma del valore pieno dell'effetto Sagnac era in accordo sia con la teoria della relatività generale, sia con la teoria dell'etere stazionario, Michelson non

¹³⁹ Michelson, A. A. (1897) "The Relative Motion of Earth and Ether", *The American Journal of Science*, 3, (1897): 475-78.

comprendeva l'importanza di eseguire una tale verifica. Come abbiamo visto, nel 1921 Silberstein aveva proposto un tale esperimento, riprendendo la proposta di Michelson del 1904, con la speranza che esso avrebbe ottenuto un effetto parziale o nullo, in accordo con la teoria dell'etere trascinato e in netta opposizione alla teoria della relatività generale, ma Michelson non credeva in questa possibilità. Il primo premio Nobel per la Fisica statunitense, a dispetto della mancanza di fiducia sulla rilevanza di un tale esperimento, usò la sua influenza per trovare i fondi necessari e lavorò su di esso per circa quattro anni sia al *MWO* che alla *University of Chicago*, un atteggiamento molto diverso rispetto a quello mostrato verso l'esperimento proposto da Miller.¹⁴⁰

Ancor prima che Miller annunciasse di aver trovato un *ether-drift*, Michelson e Gale avevano osservato un effetto dovuto alla rotazione terrestre in pieno accordo con la teoria della relatività generale e in netta opposizione alla teoria dell'etere trascinato. Una teoria di quest'ultimo tipo era l'unica che potesse rendere conto del valore di *ether-drift* trovato da Miller, per cui i risultati dei due esperimenti furono subito percepiti come antitetici. Questa percezione fu accresciuta dal fatto che i risultati di entrambi i lavori sperimentali furono presentati al convegno della *NAS* tenutosi nell'aprile 1925, dopo il quale l'esperimento di Michelson-Gale fu spesso utilizzato per confutare le conclusioni di Miller.¹⁴¹ Nel periodo tra il 1925 e il 1930, infatti, l'esperimento di Michelson-Gale continuò ad essere tra i fenomeni sperimentali più citati contro l'interpretazione di Silberstein dei dati di Miller.¹⁴² L'esperimento di Michelson-Gale ebbe, quindi, un ruolo considerevole nel contrastare, nell'immediato, il significato anti-relativista dei risultati di Miller.

L'atteggiamento di Michelson verso gli esperimenti MM fu, però, ancora più rilevante nella successiva e definitiva messa da parte dei risultati di Miller presso la comunità scientifica statunitense. I resoconti della vita di Michelson mostrano quanto egli fosse convinto del

¹⁴⁰ Michelson fece le prime misure al *MWO* nel 1921, ma egli pubblicò i risultati finali solo nell'aprile del 1925 dopo aver cambiato la località dove compiere l'esperimento dal Mount Wilson a Clearing nell'Illinois. L'inizio dei lavori su questo esperimento è attestato dalla lettera Hale a Miller, 26 luglio 1921, *AIP, HP*, roll 93, mentre l'articolo dell'esperimento fu pubblicato, in breve, in Michelson, A. A. e Gale, H. G. (1925) "The Effect of the Earth Rotation on the Velocity of Light", *Nature*, 115 (1925): 566.

¹⁴¹ La campagna stampa contribuì ad accrescere la confusione con resoconti paradossali del risultato dell'esperimento Michelson-Gale. Per un esempio significativo vedere "Michelson Proves Einstein Theory", *New York Times*, 9 gennaio 1925, p. 2; citato anche in Swenson (1972), *op. cit.*, p. 208.

¹⁴² Gli altri due erano il fenomeno dell'aberrazione stellare e la ripetizione dell'esperimento di Trouton-Noble in altitudine di Tomaschek (vedere par. 5.5).

fatto che l'esperimento MMX avesse ottenuto un risultato corretto e che non esistesse alcuna possibilità che un esperimento ottico mostrasse il moto relativo tra Terra ed etere.¹⁴³

Il mondo scientifico si aspettava, d'altronde, una sua opinione sul lavoro di Miller dopo che questi ebbe annunciato l'esistenza di un reale *ether-drift*. Lo stesso Einstein desiderava conoscere i pensieri di Michelson al riguardo, ma lo sperimentatore statunitense preferì mantenere il riserbo e l'unico commento che fece in conversazioni personali era che Miller non stava cambiando in maniera sufficiente le condizioni sperimentali.¹⁴⁴

Nell'anno in cui Miller annunciò pubblicamente di aver trovato un effetto corrispondente all'*ether-drift*, Michelson aveva appena cominciato il progetto sperimentale di rifinire la misura della velocità della luce con il sostegno economico della *CIW* e della *University of Chicago*, un lavoro che lo impegnò fino al momento della sua morte avvenuta nel 1931.

I suoi collaboratori per questo esperimento erano Francis G. Pease, appartenente allo staff del *MWO*, e Fred Pearson, assistente di Michelson alla *University of Chicago*.

Il progetto sperimentale sulla nuova misurazione della velocità della luce prevedeva che tali osservazioni venissero fatte nei pressi del Mount Wilson e costituì l'occasione perché Michelson cominciasse, nel 1926, la ripetizione dell'esperimento MM con l'aiuto degli stessi collaboratori. I tre scienziati riuscirono a compiere le prime misure preliminari del nuovo esperimento MM nel giugno del 1926 in Pasadena, ancor prima che Kennedy compisse le proprie osservazioni, ma pubblicarono il resoconto di queste, come delle future, osservazioni solo tre anni più tardi.

Tra giugno ed agosto del 1926, Michelson lavorò al *MWO* ad entrambi i progetti sperimentali della nuova misura della velocità della luce e della ripetizione dell'esperimento MM, ma ci sono molte evidenze che l'autorevole fisico non li considerasse allo stesso livello come rilevanza scientifica. Prima di tutto, nella sua corrispondenza di questo periodo non si trova nessuna menzione dell'esperimento MM, mentre discusse in maniera persistente le nuove misurazioni della velocità della luce.¹⁴⁵ L'unico riferimento alle misure preliminari dell'esperimento MM si trova in una nota manoscritta che Michelson diede a Hale o Adams, nella quale si affermava: "*the 'Ether drift' experiments finished with*

¹⁴³ Vedere, per es., Lemon, H. B. (1936) "Albert Abraham Michelson: The Man and the Man of Science", *American Physics Teacher*, 4 (1936): 1-11.

¹⁴⁴ Epstein a Einstein, 19 settembre 1925, *loc. cit.*; Einstein a Millikan, 13 luglio 1925, *loc. cit.*

¹⁴⁵ Vedere la corrispondenza di Michelson in Albert A. Michelson Papers (*AMP*), Annapolis, *US Naval Academy (USNA)*, *Nimitz Library Special Collection and Archives Division*.

decidedly negative results – probably zero displacement but certainly less than one thirtieth of that which Miller found'.¹⁴⁶

Questa nota è senza data, ma è possibile dedurre che vi sono solo due ipotesi di datazione accettabili. La prima è che questa fu scritta nel 1925, dopo gli annunci di Miller di aprile. In questo caso, le parole di Michelson si riferiscono all'esperimento MMX e confermano che egli considerava il suo risultato decisamente nullo, in opposizione alle affermazioni di Miller. La nota porta a supporre che Michelson stesse rispondendo a una specifica domanda proveniente dalla direzione del *MWO* concernente gli annunci di Miller. La seconda ipotesi è che Michelson abbia scritto tale nota dopo i risultati preliminari del giugno 1926. Se tale congettura fosse corretta, Michelson stava chiaramente esponendo che egli considerava tali misurazioni una conferma del risultato nullo.

In ogni caso sembra che, dopo il giugno 1926, Michelson si sia dedicato completamente alle misurazioni della velocità della luce, tralasciando gli sviluppi dell'altro esperimento. Quest'ultima affermazione sarebbe confermata anche da una lettera che Adams spedì a Michelson nel novembre del 1926, poco tempo dopo l'annuncio del risultato nullo dell'esperimento di Kennedy. In tale lettera, Adams afferma:

*I believe you will get some good days for the Jacinto tests, but the other work is still more important. I understand that Kennedy got zero effects, but have not heard the details. But what the scientific world wants is your final word on the subject.*¹⁴⁷

Sembra da queste parole che Michelson non considerasse la propria ripetizione dell'esperimento MM più necessaria dopo il risultato nullo ottenuto da Kennedy. Adams, comunque, appare fortemente interessato alla continuazione di questo progetto sperimentale partendo dall'idea che il mondo scientifico voleva che a compiere la ripetizione definitiva dell'esperimento MM fosse il più autorevole Michelson. Le espressioni utilizzate da Adams in tale lettera sono fortemente indicative della rilevanza del lavoro di Michelson presso la comunità scientifica statunitense.

¹⁴⁶ Nota manoscritta senza data in *HL, WAP*, box 46, fol. Michelson 1925. La nota è nel folder del 1925, ma esiste anche la possibilità che sia stato un errore di catalogazione. Michelson scrisse questa nota su un pezzo di carta di un hotel di Pasadena, impiegata anche nella comunicazione di un'altra nota datata ed indirizzata ad Hale che riguardava la misurazione della velocità della luce: Michelson a Hale, 27 agosto 1926, *USNA, AMP*, box 1.

¹⁴⁷ Adams a Michelson, 24 novembre 1926, *USNA, AMP*, box 1 [enfasi di Adams].

A parte le motivazioni scientifiche, è possibile che l'interesse di Adams nella continuazione dell'esperimento di Michelson sull'*ether-drift* avesse anche ragioni istituzionali. Il direttore del *MWO*, infatti, aveva iniziato a chiedere fondi alla *CIW* per costruire il nuovo apparato di Michelson prima della comunicazione di Kennedy.¹⁴⁸ Adams ricevette la comunicazione da parte di Merriam della risposta positiva da parte della *Executive Committee* della *CIW* proprio in novembre, alcuni giorni prima della succitata lettera a Michelson.¹⁴⁹ La prossimità temporale tra la comunicazione di Merriam e la lettera di Adams porta a ritenere che il direttore del *MWO* fu motivato anche da meccanismi istituzionali complessi nel suo esortare Michelson di considerare la ripetizione dell'esperimento MM importante tanto quanto la misura della velocità della luce. Adams stava pianificando le attività del *MWO* sulla base della rilevanza scientifica dei diversi argomenti ed aveva già scelto l'esperimento MM come parte del programma di ricerca.

Michelson, però, continuò a mostrare una scarsa motivazione personale accompagnata da pesanti difficoltà nella costruzione dell'apparato. Michelson aveva pensato di costruire un interferometro con l'Invar, ma cominciò le misure preliminari con un apparato fatto di acciaio ordinario, sia perché era difficile trovare l'Invar, sia perché Miller aveva anch'egli usato uno strumento costruito con semplice acciaio.¹⁵⁰ Dopo le osservazioni preliminari di giugno, Pease contattò la *Crucible Steel Company of America* per una fornitura di Invar, ma non poté eseguire l'ordine fino alla decisione di finanziamento della *Executive Committee* della *CIW*.¹⁵¹ Come abbiamo visto, la comunicazione della risposta positiva arrivò solo nel novembre del 1926, ma Michelson non compì immediatamente gli ulteriori passi per la costruzione dell'apparato perché riteneva che l'esperimento di Kennedy avesse chiuso la questione definitivamente.

Michelson continuò ad essere molto esitante sul modo di costruire il nuovo interferometro fino alla metà del 1927. Prima della sua decisione finale su questo argomento, il *MWO* organizzò una conferenza sul tema dell'esperimento MM nel febbraio del 1927, approfittando della contemporanea presenza a Pasadena di Michelson e di Lorentz. Gli altri quattro scienziati presenti a questa conferenza furono Miller, Kennedy, Epstein, il quale riportò un resoconto della ripetizione dell'esperimento di Trouton-Noble realizzata al

¹⁴⁸ Adams a Merriam, 27 settembre 1926; Adams a Merriam, 20 settembre 1926, *HL*, *WAP*, box 41.

¹⁴⁹ Merriam a Adams, 15 novembre 1926, *HL*, *WAP*, box 41.

¹⁵⁰ Pease a Mathews, 12 luglio 1926, *HL*, Francis G. Pease Papers (*FPP*), box 3, fol. misc. corr. II.

¹⁵¹ Pease a Mathews, 18 ottobre 1926, *HL*, *FPP*, box 3, fol. misc. corr. II.

Caltech da Chase, e il professore della *University of California* E. R. Hedrick, il quale portò una comunicazione sul calcolo ottico dell'esperimento MM. L'articolo che contiene tutti i resoconti e le successive discussioni di questa conferenza fu pubblicato quasi due anni più tardi. Questo risulta una delle fonti primarie più citate concernenti gli esperimenti di Miller e le altre ripetizioni dell'esperimento MM, ma è spesso riportata senza una contestualizzazione storica delle affermazioni in essa contenute. All'inizio del 1927, Michelson non aveva ancora potuto formarsi un'idea chiara sul proprio strumento, Kennedy aveva già compiuto il suo esperimento ottenendo un risultato nullo, e Miller aveva compiuto molte migliaia di osservazioni che, secondo lui, dimostravano l'esistenza di un *ether-drift* di circa 10 km/s sul Mount Wilson.

Alla fine della conferenza sembra che ognuno fosse rimasto convinto delle proprie posizioni, non per questo la conferenza non ebbe alcune conseguenze significative e non vi si trovano chiare indicazioni di alcune problematiche storiografiche. Michelson annunciò che egli stesso avrebbe compiuto una ripetizione, ma che i risultati sarebbero stati disponibili dopo diversi mesi.¹⁵² Egli, inoltre, ripeté la sua stima nel confronti dell'esperimento di Kennedy e confermò pubblicamente il suo pensiero: "*had I known earlier of the beautiful and ingenious apparatus of Mr. Kennedy, I probably should not have undertaken my experiments now going in the same form*".¹⁵³ Miller rispose difendendo la valenza dei suoi risultati e ripetendo le sue ultime conclusioni e, in particolare, chiarendo che l'effetto di *ether-drift* non dipendeva dall'altitudine.

Una comunicazione particolarmente interessante risulta essere quella del fisico teorico Epstein. Per prima cosa costui discusse gli esperimenti di Piccard sul pallone e, in seguito, considerò le ripetizioni dell'esperimento di Trouton-Noble compiute da Tomaschek e, più recentemente, da Chase. Tutti questi esperimenti non mostrarono alcun *ether-drift*, ma Epstein calcolò che il loro limite di precisione non permetteva il loro utilizzo contro le conclusioni di Miller. Epstein, come abbiamo visto, aveva ripetuto diverse volte, in comunicazioni private, di essere molto scettico riguardo alle affermazioni di Miller, ma se ci si fermasse alla lettura della sua comunicazione sembrerebbe che le stia difendendo rispetto ad altre evidenze sperimentali. Epstein riuscì, in questo caso, a separare le sue convinzioni personali dal giudizio razionale e matematico sui limiti di precisione sperimentali, ma le sue

¹⁵² Michelson et al. (1928) "Conference on the Michelson-Morley Experiment: Held at the Mount Wilson Observatory Pasadena California, February 4 and 5, 1927", *Astrophysical Journal*, 63 (1928): 341-402, p. 345.

¹⁵³ *Ibid.*, p. 393.

parole ebbero paradossalmente l'effetto di accrescere la sicurezza di Miller verso i propri risultati.

Anche le parole di Lorentz contribuirono a creare l'immagine di una grande valenza delle osservazioni di Miller. Il fisico teorico olandese non solo affermò che difficilmente poteva esistere alcun dubbio che Miller avesse osservato un reale spostamento delle frange, ma chiese anche uno studio teorico per una miglior comprensione dell'effetto dovuto al giro completo dell'interferometro. Lorentz, però, ribadì che il dato di Miller relativo allo spostamento verso ovest della media degli azimut in un giorno siderale poteva essere difficilmente spiegato con una teoria dell'etere.

Non è semplice comprendere se Lorentz sperasse realmente che i risultati di Miller potessero resuscitare il concetto di etere. Da un lato, egli sottolineava che questi potevano essere molto importanti, dall'altro, li riteneva inspiegabili. Durante la discussione, però, Lorentz continuò a difendere la possibilità che potesse essere formulata una teoria dell'etere che spiegasse i dati di Miller. Lorentz si mostrò, infatti, in disaccordo con l'affermazione di Michelson che un trascinamento dell'etere capace di rendere conto di quei dati era implausibile perché era così grande che doveva per forza di cose decrescere con l'altitudine in un modo osservabile. Lorentz rispose a questa critica di Michelson osservando che esistevano, in via teorica, molti possibili eteri che potevano rendere conto dei risultati di Miller, come per esempio l'etere di Stokes-Planck.

Riassumendo, la conferenza del 1927 non chiuse affatto la questione; al contrario, le dichiarazioni pubbliche di Epstein e Lorentz portarono ad ulteriori esplorazioni dell'argomento dal punto di vista sperimentale. Questa conferenza diede, infatti, un ulteriore impulso al lavoro di Michelson e portò alla ripetizione compiuta da Illingworth dell'esperimento di Kennedy. Abbastanza curiosamente l'articolo sulla conferenza fu pubblicato solo nel dicembre del 1928, dopo che ulteriori esperimenti avevano confermato il risultato nullo. Prima del dicembre del 1928, infatti, Illingworth aveva migliorato il risultato nullo dell'esperimento di Kennedy, Piccard e Stahel avevano compiuto un altro esperimento MM sulla cima del Monte Rigi confermano un risultato nullo e Chase aveva accresciuto la sensibilità del suo apparato in modo tale che questo aveva dimostrato che l'*ether-drift*, se esisteva, doveva essere inferiore a 3 km/s.¹⁵⁴ Nell'articolo pubblicato ci fu, quindi, un

¹⁵⁴ Piccard, A., e Stahel, E. (1927) "L'absence du vent d'éther au Rigi", *Comptes Rendus*, 185 (1927): 1198-200.

fortissimo contrasto tra le parole dei relatori, in particolare Epstein, e i risultati sperimentali aggiunti nelle note, tutte in accordo con la teoria della relatività ristretta.

Prima di questa pubblicazione, anche l'esperimento di Michelson-Pease-Pearson aveva raggiunto delle conclusioni, ma queste furono pubblicate solo alcuni mesi dopo e non furono, perciò, inserite nell'articolo sulla conferenza. Pease e Pearson avevano, infatti, continuato il lavoro sull'esperimento di *ether-drift* cercando di superare i problemi tecnici che continuarono ad essere presenti fino a metà agosto del 1927.¹⁵⁵ Dopo che questi furono definitivamente risolti, Pease riuscì a compiere altre osservazioni preliminari presso l'*optical shop* del *MWO* nell'inverno del 1927, per poi realizzare una lunga serie di esperimenti tra dicembre del 1927 e marzo del 1928.¹⁵⁶ Pease comunicò che i dati da lui raccolti mostravano solo una piccola frazione dello spostamento osservato da Miller, ma che "*the form of curve seemed to be rather persistent*".¹⁵⁷ Nel marzo del 1928, Pease mandò i dati a Michelson, che si trovava a Chicago. La risposta di Michelson mostra che questi non aveva alcun dubbio sul significato dei dati raccolti da Pease:

*Just received your curious and interesting graphs which seem to me to indicate rather clearly temperature effects. I am enclosing a resume of your observations and they seem to indicate, without any doubt, a negative result agreeing with the result of the observations we took last year.*¹⁵⁸

A parte queste dichiarazioni, il cui significato è privo di ambiguità, l'atteggiamento di Michelson è ulteriormente chiarito dal fatto che la corrispondenza tra lui e Adams di questo periodo riguarda quasi esclusivamente l'altro esperimento, ossia la nuova misurazione della velocità della luce, e che passarono solo pochi giorni tra la lettera di Pease e la risposta di Michelson.

Michelson considerava questa parte dell'esperimento completato e propose un miglioramento dell'apparato con la finalità di evitare gli effetti dovuti alla temperatura

¹⁵⁵ Corrispondenza tra Pease e Mathews della *Crucible Steel of America* sul tema dell'Invar, *HL, FPP*; box 3, fol. misc. corr. II. Questa corrispondenza si concluse quando Pease fece l'ordine definitivo in Pease a Mathews, 15 agosto 1927. I problemi tecnici legati all'esperimento di Michelson-Pease-Pearson sono ben descritti in Swenson (1972), *op.cit.*

¹⁵⁶ I dati raccolti da Pease sono tutti conservati in "Notebook of ether-drift Data", *HL, FPP*; box 5.

¹⁵⁷ Adams a Michelson, 27 dicembre 1927, *USNA, AMP*, box 1.

¹⁵⁸ Michelson a Pease, 23 marzo 1928, *USNA, AMP*, box 1.

prima di procedere con ulteriori misure, ma sembra che egli non fece alcuno sforzo per velocizzare la costruzione del nuovo apparato. Secondo lui, probabilmente, i dati presi da Pease a Mount Wilson e, indipendentemente, da Pearson a Chicago, erano sufficienti per concludere che non esisteva alcun effetto del tipo previsto in base alle conclusioni di Miller. Nel novembre dello stesso anno, infatti, senza che fossero state compiute ulteriori osservazioni, Michelson riconfermò di aver trovato un risultato nullo nella sua ripetizione dell'esperimento MM al convegno del *Journal of the Optical Society of America (JOSA)* e, solo pochi mesi dopo, le riviste scientifiche *JOSA* e *Nature* pubblicarono gli articoli conclusivi sull'esperimento di Michelson-Pease-Pearson.

I due articoli erano molto brevi, non contenevano nessun dato e solo una veloce descrizione dell'apparato. Essi, inoltre, risultano assolutamente identici tranne per una strana differenza nella conclusione numerica. Nell'articolo pubblicato su *Nature* nel gennaio del 1929, gli autori scrivevano “*the results gave no displacement as great as one fifteenth of that to be expected on the supposition of an effect due to a motion of the solar system of three hundred kilometres per second*”, mentre nell'articolo pubblicato sul *JOSA*, due mesi dopo, la quantità diventa “*one-fiftieth*”.¹⁵⁹

Un altro dettaglio peculiare di questi due articoli era che Michelson e i suoi collaboratori preferirono non riferirsi direttamente agli esperimenti di Miller, ma piuttosto al moto cosmico previsto da Strömberg utilizzato da Miller per spiegare i suoi dati come dovuti all'*ether-drift*. Tale scelta generò una certa confusione perché i dati di Miller si accordavano al moto di Strömberg solo grazie ad alcune modifiche fondamentali, come per esempio l'ipotesi di un trascinamento dell'etere pari a 19/20 della sua quantità. In questo modo i dati pubblicati da Michelson non risultavano in modo limpido come una confutazione dell'*ether-drift* di 10 km/s trovato da Miller.

Il fatto che Michelson non si sia riferito direttamente agli esperimenti di Miller porta a chiedersi come mai egli fu così ambiguo nelle sue pubblicazioni, quando la sua opinione privata su di essi fu sempre espressa con particolare chiarezza. È possibile trovare delle possibili risposte a tale domanda nella corrispondenza privata compresa tra il 1929 e il 1930. Come abbiamo visto, il 2 novembre del 1928, Michelson annunciò al convegno del *JOSA* che i suoi risultati erano in accordo con la teoria della relatività ristretta. Egli non

¹⁵⁹ Michelson, A. A., Pease, F. G., e Pearson, F. (1929a) “Repetition of the Michelson-Morley Experiment”, *Nature*, 123 (1929): 88; e Michelson, A. A., Pease, F. G., e Pearson, F. (1929b) “Repetition of the Michelson-Morley Experiment”, *Journal of Optical Society of America*, 18 (1929): 181-82, p. 182.

aveva alcun dubbio sulla validità dei suoi risultati sperimentali, anche se manteneva viva la speranza di riconciliare le teorie della relatività con l'esistenza dell'etere.¹⁶⁰

Alcuni giorni dopo *Nature* chiese un articolo riguardante la sua ripetizione dell'esperimento MM.¹⁶¹ Michelson mandò immediatamente una comunicazione molto breve che risulta essere identica a quella poi pubblicata su *Nature*. Egli mandò lo stesso resoconto anche per le *Contributions Series of the MWO*. L'editore di tale pubblicazione, Frederick Hanley Seares (1873-1964), replicò che i pochi fogli inviati da Michelson avrebbero potuto andare bene per la rivista *Nature*, ma che, per le *Contribution*, avrebbe preferito ricevere un articolo più lungo che contenesse una descrizione dettagliata dell'apparato e un resoconto completo dei metodi di osservazione e di riduzione.¹⁶² Seares desiderava questi ampliamenti alla comunicazione soprattutto “*in view of the widespread publicity given Miller's conclusions*”.¹⁶³

Miller stava, infatti, ripetendo di aver trovato un reale *ether-drift* in numerosi convegni, quotidiani ed in alcune pubblicazioni scientifiche.¹⁶⁴ L'intensità con cui Miller pubblicizzava la sua scoperta contrastava con l'indifferenza di Michelson, così Adams e Seares cercarono di spronare Michelson a pubblicare un resoconto più accurato del suo esperimento di *ether-drift* eseguito in collaborazione con il *MWO* e la *University of Chicago*. Adams non scrisse direttamente a Michelson, ma preferì discutere il problema con Henry G. Gale, stretto collaboratore di Michelson alla *University of Chicago*. La loro corrispondenza chiarisce bene la loro differente attitudine verso i risultati di Miller e la ripetizione di Michelson, e forniscono un esempio rilevante della loro ricezione da parte della comunità scientifica statunitense. I pensieri di Adams sono da lui espressi senza necessità di commenti nella prima lettera che egli scrisse a Gale:

¹⁶⁰ “Holds Light Test Supports Einstein”, *New York Times*, 3 novembre 1928, p. 21.

¹⁶¹ Telegramma Adams a Michelson, 24 novembre 1928, *USNA*, AMP, box 1; telegramma Seares a Michelson, 23 novembre 1928, *HL*, Frederick Hanley Seares Papers (*SP*), box 12; e Pease a Mathews, 12 luglio 1926, *HL*, *FPP*; box 3, fol. misc. corr. II.

¹⁶² Seares a Michelson, 28 novembre 1928, *HL*, *SP*, box 3.

¹⁶³ *Ibid.*

¹⁶⁴ Miller aveva continuato a compiere esperimenti a Cleveland e a pubblicare i suoi risultati a conferma dell'*ether-drift* e del moto cosmico del Sole. Vedere, per es., Miller, D. C. (1930) “Ether Drift Experiments in 1929 and other Evidence of Solar Motion”, *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 24 (1930): 82-4; “Miller Challenges Einstein: Explains Ether Drift Research and Function of the Interferometer”, *The Case Alumnus*, dicembre 1929, pp. 10-12; “Dr. D. C. Miller Declares Ether Drift Found; Reports Experiments Contradicting Einstein”, *New York Times*, 24 ottobre 1929.

*[Michelson had] never received the credit he should for this very fine piece of work; in fact, a good many people know little or nothing about it. In view of the way in which Dayton Miller is running up and down the country exploiting his own results and those of no one else, I think it is high time that Michelson put his measurements into print.*¹⁶⁵

La replica di Gale è, se possibile, ancora più interessante. Gale affermava, infatti, che le misure di Michelson “*were pretty sketchy and hurried*” e che era necessario eseguire una più elaborata serie di misurazioni perché dubitava fortemente che Miller potesse essersi ingannato in maniera così sistematica. Nonostante questa concessione al risultato trovato da Miller, Gale si mostrava convinto che una nuova, accurata e completa, serie di misurazioni avrebbe portato ancora alla conferma del risultato nullo.¹⁶⁶ Adams confermò di aver ben compreso che Michelson “*did not have his heart very much in the investigation*”; d’altro canto, sia Pease che Pearson avevano eseguito molte osservazioni, che il direttore del *MWO* desiderava vedere riunite per poter pubblicare un articolo più completo.¹⁶⁷

Gale cercò di spiegare il comportamento di Michelson riguardo ai suoi ultimi esperimenti di *ether-drift* esprimendo il sospetto che “*Michelson may feel that his statement that the residual effect was less than 1/20 of that predicted by Miller’s theory ought to be sufficient without publishing the observations*”.¹⁶⁸ Dopo questo scambio di opinioni, Adams continuò il suo proposito di ottenere un articolo completo in cui i risultati dell’esperimento di Michelson-Pease-Pearson venissero mostrati in maniera esauriente con una lettera mandata direttamente a Michelson, nella quale egli insistette utilizzando le stesse argomentazioni già espresse a Gale:

*The total amount of material [of Michelson, Pease and Pearson] is considerable and the evidence furnished by them impressive. In view of Dayton Miller’s rather exasperating statements on this subject I should like to see your work published in sufficient detail to cut the ground from under him.*¹⁶⁹

¹⁶⁵ Adams a Gale, 3 gennaio 1930, *USNA, AMP*, box 1.

¹⁶⁶ Gale a Adams, 9 gennaio 1930, *USNA, AMP*, box 1.

¹⁶⁷ Adams a Gale, 16 gennaio 1930, *USNA, AMP*, box 1.

¹⁶⁸ Gale a Adams, 21 gennaio 1930, *HL, WAP*, box 46, fol. Michelson 1930-32.

¹⁶⁹ Adams a Michelson, 27 gennaio 1930, *HL, WAP*, box 46, fol. Michelson 1930-32.

Sfortunatamente non è stato possibile trovare negli archivi la risposta di Michelson e non è neanche chiaro se questa fu mai scritta. Alla fine fu St. John che intraprese il compito di scrivere un resoconto degli esperimenti di *ether-drift* di Michelson-Pease-Pearson per una comunicazione che portò al convegno della *NAS* dell'aprile 1930. Michelson, appena seppe del proposito di St. John, si mostrò veramente felice che qualcun altro si prendesse “*this trouble*”, mostrando ancora una volta il suo rapporto d'indifferenza verso tali esperimenti.¹⁷⁰ St. John utilizzò gli stessi dati che erano alla base dei due articoli pubblicati precedentemente sugli esperimenti di Michelson-Pease-Pearson e li inserì in una relazione il cui proposito era mettere insieme tutti i dati sperimentali a favore della teoria della relatività, ristretta e generale.¹⁷¹ A differenza degli articoli precedenti, però, St. John collegò direttamente i dati degli esperimenti di Michelson-Pease-Pearson a quelli di Miller e mostrò in modo esplicito che non vi era alcun accordo tra di essi. St. John utilizzò questi esperimenti, in congiunzione con il precedente esperimento di Kennedy, per dimostrare che Miller era in errore, cosicché le teorie della relatività potessero considerarsi in accordo con la totalità degli esperimenti compiuti negli USA tra il 1919 e il 1930. Secondo St. John, gli esperimenti di Miller erano gli unici in disaccordo con tali teorie, ma, dato che nessuna delle molte ripetizioni aveva confermato lo stesso effetto, si poteva concludere che i risultati di Miller non fossero dovuti all'*ether-drift*.

Prima del convegno di aprile, St. John andò a Chicago con l'obiettivo di discutere il suo resoconto degli esperimenti di Michelson-Pease-Pearson direttamente con Michelson e Pearson. Entrambi apprezzarono il lavoro di St. John e non proposero alcun cambio. Nelle conversazioni tra Michelson e St. John, il primo disse al secondo che il fatto di non aver menzionato Miller negli articoli pubblicati nel 1929 fu intenzionale. Nella lettera in cui St. John parla di questo avvenimento, non si esprime chiaramente il motivo per cui Michelson evitò di citare Miller, ma da affermazioni indirette sembrerebbe che a spingere Michelson sia sta il desiderio di non attaccare direttamente la competenza di Miller come fisico sperimentale, ma solo la teoria con la quale spiegava i suoi risultati.¹⁷²

¹⁷⁰ Michelson a Adams, 5 aprile 1930, *HL, WAP*, box 46, fol. Michelson 1930-32. Adams chiese il permesso perchè St. John facesse questo resoconto nella lettera Adams a Michelson, 26 marzo 1930, *HL, WAP*, box 46, fol. Michelson 1930-32.

¹⁷¹ Un resoconto allargato di questa comunicazione fu pubblicata due anni più tardi in St. John, C. (1932) “Observational Basis of General Relativity”, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 44 (1932): 277-95.

¹⁷² St. John a Adams, 23 aprile 1930, *HL, WAP*, fol. 59.1032.

Dalle lettere che ho riportato in questa sede è possibile formarsi un'idea precisa del comportamento di Michelson nei confronti del problema dell'*ether-drift* negli anni '20 e capire perché fu così ambiguo nelle pubblicazioni. La comunità scientifica statunitense si aspettava l'ultima parola da parte di Michelson nei confronti dell'esperimento di cui era stato l'ideatore, ma non sembra che questi fosse realmente interessato a tale lavoro per diverse ragioni di carattere differente:

- 1) Michelson non sembra aver avuto mai dubbi circa il fatto che il risultato nullo dell'esperimento MMX fosse valido.
- 2) Michelson espresse il fatto di non apprezzare la metodologia di Miller e non sembra aver mai considerato i suoi risultati come credibili.
- 3) egli credeva che il risultato di Kennedy fosse sufficiente a chiudere definitivamente l'argomento dal punto di vista sperimentale.
- 4) egli era impegnato nelle nuove misurazioni della velocità della luce, che riteneva un programma di ricerca più importante della parallela ripetizione dell'esperimento MM.

Da questo panorama sembra che la comunità scientifica statunitense abbia fatto pressioni sull'autorevole scienziato perché questi ripetesse un esperimento nel quale non pare riponesse nessun interesse personale. La necessità da parte della comunità scientifica statunitense del giudizio autorevole di Michelson si contrappose al comportamento di Michelson che, invece, sembra non abbia fatto molti sforzi in questa direzione. Sembra, per cui, che queste siano state le motivazioni per la supposta ambiguità di Michelson, in unione con il desiderio di non attaccare in modo diretto la competenza di Miller come sperimentatore.

5.7. Il definitivo rigetto dei risultati di Miller negli anni '30

La corrispondenza che ho riportato nel paragrafo precedente tra Adams e Gale rivela alcuni degli atteggiamenti della comunità scientifica statunitense verso questo problema. Informazioni ancora più significative possono essere dedotte dalla corrispondenza di St. John, il quale fu il personaggio che maggiormente s'impegnò a contrastare pubblicamente le affermazioni di Miller contro la relatività nel 1930. Nello stesso anno, Miller aveva cominciato a collegare i suoi risultati alle critiche verso il modo in cui Campbell aveva interpretato le osservazioni dell'eclissi solare del 1922 a favore della teoria della relatività generale. In questo periodo, Miller sembrava essere molto vicino ad alcuni ferventi anti-relativisti, come Poor, Curtis e See. St. John scrisse la sua comunicazione sulle basi sperimentali della relatività proprio per contrastare la loro campagna contro anti-relativistica. Si ebbe così che, al convegno di Washington, Miller e St. John si trovarono ad essere i due principali contendenti su questo tema.

Dai resoconti privati, sembra che la conclusione di questo scontro sia stata a favore di St. John. Questi affermò che le teorie della relatività potevano contare su molti risultati sperimentali, mentre esisteva una spiegazione razionale dei risultati di Miller come dovuti ad errori sistematici dello strumento. St. John scrisse in alcune lettere che gli uomini che contavano accettarono la sua spiegazione. Gli scienziati inclusi nella lista di St. John erano così autorevoli che la loro opinione è fortemente indicativa di quale fosse l'inclinazione della comunità scientifica statunitense verso i problemi collegati agli esperimenti MM.¹⁷³ In particolare, St. John descrisse in maniera molto cruda il pensiero della comunità scientifica verso gli esperimenti di Miller: “[Miller] *is in a tragic position, and that the only thing for him to do is to reconstruct his instrument and find out for himself that he has been wrong*”.¹⁷⁴

Il 1930 segnò anche la conclusione degli altri lavori sperimentali sugli esperimenti di MM con autorevoli affermazioni a favore del risultato nullo. Lo stesso anno, infatti, Pease pubblicò un resoconto più completo delle osservazioni compiute presso il *MWO* nell'inverno 1927-29, nel quale dimostrò che non fu osservato alcun effetto regolare del tipo

¹⁷³ Crelinsten (2006), *op. cit.*, p. 311.

¹⁷⁴ St. John a Campbell, 2 maggio 1930, citato in *ibid.*, p. 311. Una frase molto simile si trova in St. John a Adams, 6 maggio 1930, *HL, WAP*, fol. 59.1032.

visionato da Miller, e il fisico tedesco Joos compì un nuovo esperimento MM con risultato nullo a Jena.¹⁷⁵

A dispetto del loro contrasto scientifico, St. John iniziò ad essere dispiaciuto per Miller perché lo riteneva così ostinato da non seguire il consiglio dei colleghi di ricostruire l'interferometro e fare ulteriori osservazioni con il nuovo apparato.¹⁷⁶ L'immagine che si ricava dalle parole di St. John è forse la più chiara rispetto alla posizione di Miller in questo periodo: uno scienziato molto rispettato appartenente alla vecchia scuola di pensiero che considerava in modo ostinato di aver trovato un reale effetto di *ether-drift* contrario alle opinioni largamente accettate della comunità scientifica di cui era un membro eminente.

Miller continuò ad analizzare i suoi dati fino al 1933, anno in cui pubblicò il suo articolo più esauriente ed esteso con la proposta di una nuova ipotesi di moto cosmico del sole, calcolato per spiegare le proprie osservazioni.¹⁷⁷ In quaranta pagine, Miller fece un accurato resoconto storico, descrisse minuziosamente tutte le migliorie apportate all'apparato tra il 1902 al 1924, riaffermò che l'*ether-drift* poteva essere l'unica spiegazione accettabile dell'effetto periodico osservato, e mostrò il calcolo del nuovo apice del moto assoluto derivato dai suoi dati.

Lo sperimentatore propose anche una possibile spiegazione del perché i successivi esperimenti MM non avessero mostrato lo stesso effetto, ossia il fatto che gli apparati utilizzati possedevano una copertura troppo massiccia od opaca (comprese le mura delle stanze), una procedura considerata non corretta nel caso di etere trascinato dalla materia. Miller, inoltre, diede risalto al fatto che lui era stato l'unico dei diversi sperimentatori che si cimentarono nell'esperimento MM a compiere osservazioni "*of such extent and such continuity*".¹⁷⁸ Miller stava utilizzando una regola metodologica che rese esplicita alcune righe più in basso con queste parole:

*Any lack of precision in making a single reading is fully compensated by the large number of readings and by the use of an interferometer of longer light-path and therefore of greater initial sensitivity.*¹⁷⁹

¹⁷⁵ Pease, F. G. (1930) "Ether Drift Data", *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 42 (1930): 197-202; e Joos, G. (1930) "Die Jenaer Wiederholung des Michelsonversuchs", *Annalen der Physik*, 7 (1930): 385-407.

¹⁷⁶ St. John a Adams, 23 aprile 1930, HL, WAP, fol. 59.1032.

¹⁷⁷ Miller (1933), *op. cit.*

¹⁷⁸ *Ibid.*, p. 240.

¹⁷⁹ *Ibid.*

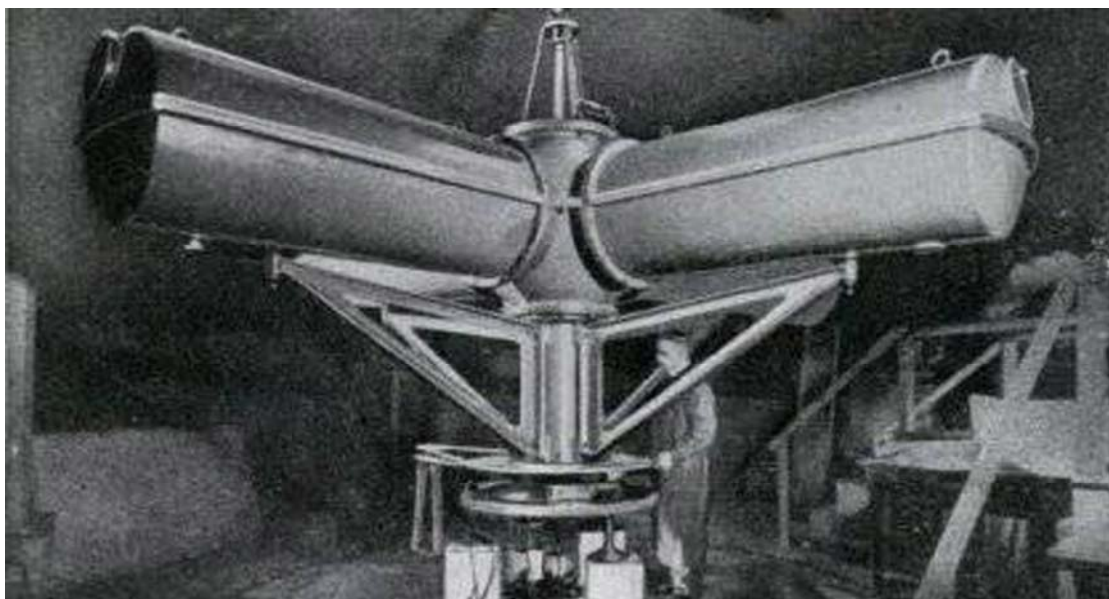


Figura 5.4. Immagine totale dell'interferometro utilizzato da Joos nel 1930. In Joos (1930), *loc. cit.*, p. 396.
Per concessione di *Annalen der Physik*.

L'approccio metodologico di Miller era profondamente diverso da quello utilizzato, esplicitamente o implicitamente, dagli altri scienziati, in particolare da Kennedy e Joos, i quali cercarono di ottenere una maggiore accuratezza nelle misure con strumenti costruiti in modo tale da eliminare il più possibile effetti indesiderati, come quello dovuto agli effetti della temperatura (vedi fig. 5.4). Questa differenza diede origine ad un deciso scambio di opinioni tra Joos e Miller pubblicato, anch'esso, sulla rivista *Nature*. In queste brevi comunicazioni Joos giustificava l'utilizzo di una copertura metallica in base al fatto che la differenza di $1/500^\circ$ tra le due braccia dell'interferometro sarebbe stato sufficiente a produrre un effetto del tipo e del valore osservato da Miller sul Mount Wilson. Joos riteneva, inoltre, che sia l'esperimento di Sagnac, sia la sua ripetizione compiuta da Michelson e Gale si opponessero all'ipotesi di Miller di un etere trascinato da una copertura troppo opaca o dalle mura del laboratorio.

Il criterio metodologico che Joos rese esplicito nella scelta delle condizioni migliori per effettuare un esperimento MM, può essere sintetizzato in questo modo: poiché nessuna teoria poteva essere provata o confutata da un singolo esperimento si doveva “*draw conclusions from the whole experimental material*” e la totalità del materiale sperimentale allora conosciuto rendeva molto improbabile l'esistenza di un trascinamento dell'etere del

tipo ipotizzato da Miller.¹⁸⁰ Miller rispose rifiutando per l'ennesima volta una spiegazione dell'effetto da lui trovato che si basasse sulle condizioni di temperatura con lo stesso argomento precedentemente utilizzato: le variazioni di temperatura non potevano essere così regolari da spiegare in maniera corretta la periodicità dei dati da lui registrati.¹⁸¹

Il lungo e accurato articolo di Miller del 1933 fece, comunque, risorgere alcune dubbi sull'interpretazione relativista dei risultati degli esperimenti di *ether-drift*. Un esempio di questo può essere visto nella reazione del noto e influente Gale, il quale considerò questo articolo “*too good to be ignored*” e propose ad Adams un'altra ripetizione dell'esperimento con l'utilizzo dell'apparato costruito da Joos.¹⁸²

La reazione di Gale può essere considerata un esempio dell'incomprensione che continuava a regnare all'interno della comunità scientifica statunitense verso le affermazioni di Miller. Quest'ultimo non accettava le conclusioni di Joos sulla base del fatto che l'apparato del fisico tedesco avesse una copertura troppo massiccia ed opaca, perciò il ragionamento di Gale di accettare come buoni sia l'articolo di Miller che l'apparato di Joos è indice di una cattiva comprensione dei problemi posti dai due sperimentatori. Il dibattito tra Miller e Joos fu pubblicato solo dopo la lettera di Gale, ma Miller aveva già espresso le sue critiche agli altri esperimenti MM nell'articolo del 1933, e così risulta evidente che Gale non comprese questa parte dell'articolo e la sottostante teoria dell'etere trascinato dai corpi massicci e opachi. L'atteggiamento mostrato nella risposta di Adams alla proposta di Gale sembra, invece, più consistente:

*I can't say that I have as much confidence in D. C. Miller's results as many other people do. Perhaps this is because I saw many of the observations made and it seemed to me that Miller deliberately failed to make any of the technical improvements in his apparatus which were self-evident. However I am not qualified to render a very decided opinion on the subject.*¹⁸³

In accordo con questa visione, Adams ritenne che l'apparato di Joos fosse ottimo, ma rifiutò la proposta di Gale perché l'unico scienziato dello staff del *MWO* che avrebbe potuto occuparsene, ossia Pease, non aveva tempo da dedicare a queste ricerche. Detto in altri

¹⁸⁰ Joos, G. (1934) “Note on the Repetition of the Michelson-Morley Experiment”, *Nature*, 45 (1934): 114.

¹⁸¹ Miller, D. C. (1934) “Comments on Dr. Georg Joos's Criticism on the Ether-Drift Experiment”, *Nature*, 45 (1934): 114.

¹⁸² Gale a Adams, 15 gennaio 1934, *HL, WAP*, fol. 25.447.

¹⁸³ Adams a Gale, 19 gennaio 1934, *HL, WAP*, fol. 25.447.

termini, c'erano ricerche diventate più urgenti e pressanti dell'ennesima ripetizione dell'esperimento MM.

In questo modo Adams, anche se non si riteneva altamente qualificato per formulare giudizi in merito, decise di chiudere la questione per quanto riguarda il *MWO*. Mettere l'esperimento MM fuori dai programmi di ricerca significava eliminare il problema creato dai risultati di Miller. Anche se potrebbe considerarsi un caso isolato, Adams era il direttore di uno degli osservatori più importanti degli USA e del mondo, nel quale Miller aveva trovato un risultato ritenuto positivo. In effetti, l'esperimento MM non fu ripetuto fino allo sviluppo della tecnologia laser, per cui possiamo ritenere che l'atteggiamento di Adams fu largamente condiviso o condizionò la decisione, implicita o esplicita, di non considerare gli esperimenti di Miller un problema per le teorie relativiste fino agli anni '50.

A dispetto della reputazione di Miller all'interno della comunità scientifica statunitense, i suoi esperimenti di *ether-drift* non furono più considerati d'interesse negli anni '30, anche se non si era trovata una spiegazione scientifica accettabile ai suoi risultati. La comunità scientifica statunitense sembrò, così, accettare, senza ulteriori discussioni, che lo strumento di Miller fosse stato colpito da un errore sistematico, come Einstein aveva affermato fin dal 1925.

5.8. Conclusioni

Questa situazione riporta in primo piano la domanda su come e quando un esperimento trova la sua conclusione. In questo caso storico, è possibile evidenziare una complessa interconnessione di motivi sia scientifici, sia sociologici. In pochi anni, dal primo annuncio di Miller nell'aprile del 1925 al 1934, quando Adams decise di non ripetere l'esperimento, il mondo era profondamente cambiato attorno a Miller che sembrava essere rimasto rinchiuso nella sua visione del mondo. Lo sviluppo della teoria quantistica e l'accoglienza delle teorie della relatività che, negli anni '30, erano utilizzate quotidianamente come strumenti di ricerca delle nuove scuole di fisica, astronomia e cosmologia, avevano ridotto fortemente la valenza delle problematiche legate agli esperimenti di *ether-drift*.

La relatività stava diventando un programma di ricerca affermato con un elevato numero di conferme sperimentali accettate, mentre un'eventuale teoria dell'etere non aveva alcuna possibilità di evoluzione. Nessuna teoria dell'etere, infatti, era in grado di spiegare i dati di Miller e, contemporaneamente, altri esperimenti, in particolare quello di Michelson-Gale e l'aberrazione stellare.

Anche se si considerassero solo gli esperimenti di Miller, senza metterli in relazione con altri esperimenti, si trova che non fu mai esposta una spiegazione coerente del loro risultato. Miller, infatti, non fu mai capace di fornire un moto cosmico capace di rendere conto della totalità dei suoi dati, anche se provò a cambiare le caratteristiche di un possibile comportamento dell'etere più di una volta.

Nonostante la situazione teorica rendesse improbabile una valenza anti-relativista dei risultati di Miller, l'esperimento MM fu ripetuto molte altre volte tra il 1926 e il 1930, sempre con risultato inferiore alle sensibilità dello strumento, il che poteva essere percepito solo come un risultato nullo. In particolare gli esperimenti di Michelson-Pease-Pearson e di Joos sembrarono chiudere la questione definitivamente.

Quest'ultimo fatto ci porta a considerare le caratteristiche sociologiche del rigetto dei risultati di Miller negli anni '30. Come abbiamo visto nei precedenti paragrafi sembrerebbe che la comunità scientifica statunitense seguisse il giudizio della personalità autorevole in una particolare ramo della ricerca scientifica in diversi momenti nel susseguirsi degli eventi. All'inizio molti scienziati diedero credito ai risultati di Miller perché costui era un esperto sperimentatore e un eminente membro della comunità scientifica nazionale. In seguito

costoro sembrarono forzare Michelson a ripetere gli esperimenti MM, sebbene ci fossero diverse altre accurate ripetizioni e valide ragioni teoriche per concludere che gli esperimenti di Miller non potevano costituire una confutazione delle teorie della relatività. In particolare, l'atteggiamento della comunità scientifica statunitense nei confronti degli esperimenti di Kennedy è emblematico. Il loro risultato era considerato da Michelson convincente, ma essi non giocarono un ruolo rilevante all'interno del problema dell'*ether-drift*. Non è stato possibile trovare nei documenti alcuna coerente e razionale motivazione per il comportamento della comunità scientifica statunitense in questo caso.

Alcune caratteristiche irrazionali dello sviluppo della fisica vengono ulteriormente messe in luce quando si consideri l'altra domanda metodologica posta all'inizio del presente capitolo, ossia quali fossero le caratteristiche necessarie affinché un esperimento fosse considerato di tipo MM. La disputa del 1934 tra Miller e Joos evidenzia come gli autori fossero perfettamente consapevoli che le differenze tra i loro risultati dipendevano da differenze negli apparati che, a loro volta derivavano da concezioni teoriche opposte. Miller era sicuro che l'etere esistesse e che una copertura eccessiva, in opacità e in massa, avrebbe potuto impedire una corretta esperienza, mentre Joos inserì l'apparato in una struttura metallica per eliminare gli effetti di temperatura (vedi fig. 5.3-5.4). Questa differenza nelle assunzioni teoriche non è limitata alla controversia tra Miller e Joos; anche Michelson e Kennedy, infatti, non considerarono la possibilità di un etere trascinato da una schermatura pesante od opaca.

Le diversità tra le concezioni di Miller e quelle di tutti gli altri sperimentatori portò a risultati sperimentali radicalmente differenti in quello che venne considerato uno stesso esperimento. Questo problema scientifico non è triviale, perché tutti gli esperimenti qui trattati vennero nominati in base alle caratteristiche che essi avevano in comune: la teoria ottica sulla quale erano basati e le procedure sperimentali. Nessuna indagine storiografica ha, finora, messo in luce l'esistenza delle cruciali differenze che portarono a conclusioni opposte sull'esistenza dell'effetto periodico e questa mancanza ha continuato a propagare un'immagine distorta degli esperimenti di Miller.

Per concludere l'analisi degli argomenti posti in questo capitolo, il dibattito tra Joos e Miller del 1934 risulta interessante anche perché rende evidente come le idee teoriche fossero predominanti rispetto ai risultati sperimentali. Joos, come gli scienziati che ripeterono

l'esperimento MM, ritenevano la teoria dell'etere proposta da Miller non concepibile per lo sviluppo dei programmi di ricerca a loro contemporanei.

L'immagine che qui risulta ridimensiona fortemente la valenza dei risultati di Miller, che, probabilmente, trovarono accoglienza positiva negli USA, perché negli anni '20 la comunità scientifica statunitense sembrava più immatura rispetto alle più sviluppate comunità scientifiche europee e perché Miller era uno scienziato considerato accurato, la cui parola era considerata valida.

L'esperimento MM fu un esperimento complesso, nel quale relazioni dissimili tra una predeterminata teoria e i risultati aspettati portavano ad interpretazioni completamente differenti delle stesse osservazioni sperimentali. Miller, infatti, affermò sempre che l'esperimento MM non aveva mai dato un risultato esattamente nullo, perché stava ragionando sul moto cosmico e cercò di far rientrare gli esperimenti di *ether-drift* nella sua visione. Il suo lavoro sugli esperimenti di *ether-drift* ebbe una certa rilevanza perché la comunità scientifica statunitense considerava nella prima metà del XX secolo il risultato nullo dell'esperimento MM una base sperimentale fondamentale delle teorie di Einstein.

In molti libri di testo l'esperimento MM era descritto come un *experimentum crucis* in favore della teoria della relatività ristretta e Miller era, perciò, convinto che un risultato diverso dello stesso esperimento avrebbe condotto alla confutazione della teoria di Einstein. Molti eminenti studiosi hanno analizzato la storia dell'esperimento MM nello sviluppo della teoria della relatività ristretta e criticato il suo presunto ruolo di *experimentum crucis* (vedi par. 2.6.1). Senza addentrarci nei dettagli delle discussioni metodologiche circa la reale esistenza degli *experimenta crucis* nella storia della fisica, è possibile affermare che un singolo esperimento non ha mai portato alla falsificazione di una teoria in mancanza di un'altra teoria concorrente. Quest'affermazione di valenza generale, come abbiamo cercato di dimostrare in questo capitolo, sembra essere valida anche per la storia del rigetto dei risultati di Miller che furono eliminati dai programmi di ricerca senza che si fosse ottenuta una spiegazione accettabile ai loro risultati.

Capitolo 6

La nuova analisi di Shankland dei dati di Miller

6.1. Introduzione

Subito dopo l'articolo di Miller del 1933, gli esperimenti di questi apparvero in alcuni libri di testo come un fenomeno sperimentale incomprensibile fino al 1954, anno in cui Shankland e tre suoi collaboratori proposero una spiegazione accettata dalla maggioranza della comunità scientifica internazionale.¹ In aggiunta a questi testi, alcuni quotidiani, in particolare di Cleveland, continuarono a citare i risultati di Miller con l'obiettivo di dimostrare che la teoria della relatività speciale era basata su risultati sperimentali quanto meno dubbi. Al contrario, gli esperimenti di Miller non vennero più menzionati nelle riviste scientifiche, i programmi scientifici furono portati avanti assumendo che il risultato nullo dell'esperimento MM fosse un dato di fatto e la comunità scientifica considerò la teoria della relatività speciale uno strumento utile per nuove scoperte.

Questa situazione creò una separazione tra gli scienziati che usavano la teoria della relatività ristretta nel loro lavoro quotidiano e quei pochi che rafforzavano le loro argomentazioni contro la relatività usando i risultati di Miller, i quali erano rimasti irrisolti. Una delle conseguenze di questa separazione fu che gli articoli anti-relativistici non vennero più considerati di valore scientifico.² I fisici anti-relativisti cominciarono, perciò, a vedere il rigetto dei risultati di Miller una frode della nuova comunità scientifica e cercarono di sfruttare altri canali d'informazione per rendere noto il loro punto di vista.

¹ Uno dei libri più influenti e noti che diede una decisa rilevanza ai risultati di Miller fu Lindsay, R. B., e Margenau, H. (1936) *Foundations of Physics* (New York: J. Wiley & sons, 1936). La seconda edizione fu scritta dopo la pubblicazione dei risultati di Shankland, ma le asserzioni sul lavoro di Miller non subirono modifiche. Gli esperimenti di Miller sono, infatti, citati come indicanti "a genuine positive result". Gli autori di questo diffuso trattato sui fondamenti della fisica consideravano che l'intera questione del moto della Terra nell'etere fosse "still an open [question]" e affermavano decisamente che era necessario un ulteriore lavoro per risolvere questo importante problema. Ibid, (2nd ed., New York: Dover, 1957), p. 326.

² Charles L. Poor accusò in maniera esplicita e ripetuta gli editori scientifici che non accettarono i suoi articoli anti-relativistici. Vedere la corrispondenza tra Poor e J. McKenn Cattel, editore della nota rivista *Science*, Baltimore, Johns Hopkins University, Sheridan Library, Charles L. Poor Papers (CPP), fol. Cattel.

Questa contraddizione tra il silenzio delle riviste scientifiche e le numerose citazioni nei quotidiani, alcuni libri di testo di fisica, libri di storia della fisica e trattati di filosofia della scienza ebbero l'effetto di dare agli esperimenti di Miller una notevole fama come eventi circondati da un alone di mistero. In questo clima si sviluppò il passaggio di consegna da Miller a Shankland raccolti dal primo in numerose e faticose osservazioni compiute in vari anni.

6.2. Il rapporto tra Miller e Shankland (1934-41)

Secondo Shankland il fatto che i risultati raccolti al MWO fossero citati solo nella letteratura non prettamente scientifica creò un certo dispiacere a Miller negli ultimi anni della sua vita. Shankland era stato un suo studente e, in seguito, gli successe nella presidenza del *Case Physics Department*. Shankland aveva anche contribuito ad analizzare i dati di Mount Wilson per l'articolo del 1933. Negli ultimi dieci anni della vita di Miller i due sembrarono avere uno stretto legame accompagnato da esplicite attestazioni di stima.³ Questa discussione preliminare sulla relazione tra Miller e Shankland non è di secondaria importanza o aneddotica perché su di essa si basa una delle motivazioni esplicite del secondo nel riprendere i dati raccolti dal primo.

Shankland non fu solo un eminente fisico, ma il suo nome è legato a studi storici di notevole rilevanza. Le fonti più utilizzate sulla storia dell'esperimento MMX e sulle sue ripetizioni sono, insieme con l'articolo di Miller, i resoconti storici scritti dallo stesso Shankland. Le sue conversazioni con Einstein, inoltre, divennero una fondamentale fonte d'informazione sull'importanza che tali esperimenti ebbero nella sviluppo della teoria della relatività ristretta. Oltre a ciò, Shankland rilasciò un'intervista a Swenson che costituisce una fonte molto importante sul proprio lavoro e su quello di Miller.

L'uso delle fonti provenienti dalla mano o dalla voce di Shankland, nello scrivere la storia dell'analisi di questi dei dati di Miller, è una scelta metodologica che necessita alcune giustificazioni preliminari. Uno studio comparato della correlazione tra i suoi resoconti, le interviste e i documenti privati, mostra che questa è estremamente convincente, per cui sono giunto alla conclusione che le parole di Shankland sono utilizzabili per poter eseguire un'analisi storica del suo stesso lavoro con la sola clausola legata alla sua tendenza ad enfatizzare l'importanza scientifica delle proprie ricerche. Tutti i suoi studi storici, infatti, mostrano il tentativo di rendere rilevante il ruolo di Michelson nello sviluppo della teoria della relatività, sia ristretta che generale, e di dare merito al suo mentore Miller per l'estenuante e meticoloso lavoro effettuato sugli esperimenti di *ether-drift* al MWO.

³ Tutta la corrispondenza tra i due scienziati conferma questa relazione di stima, in particolare Miller scriveva: “*My interest in you and your work is very real and is supported by full confidence in your character, in your intelligence, and in your good judgement. No one could be better qualified to carry on work which has been the interest of my whole life*”, Miller a Shankland, 17 settembre 1939, per concessione del Prof. W. Fickinger. Alcuni documenti privati di Shankland non sono conservati negli archivi, ma si trovano nello studio del Prof. William Fickinger della *Case Western Reserve University*.

Dopo questa necessaria introduzione, è possibile analizzare la prima fase della storia del ruolo di Shankland, ossia il passaggio dei dati di *ether-drift* con l'occhio critico dello storico. Tornando al resoconto di Shankland di questo passaggio, questi riporta che Miller, dispiaciuto del fatto che la comunità scientifica avesse rifiutato la validità dei suoi dati, li diede a lui, poco prima di morire, dicendogli che poteva fare due cose: “*either [Shankland] could burn it up or he could analyze it*”.⁴ L'atteggiamento di Miller porta a chiedersi cosa costui stesse realmente sperando: che Shankland trovasse la fonte del segnale, o che riconfermasse la realtà dell'*ether-drift*?

Anche se non è possibile trovare una risposta conclusiva a questa domanda, tutti i documenti appartenenti all'ultimo periodo della vita di Miller dimostrano che egli continuò a credere nella giustezza della sua spiegazione e a sperare nel crollo delle teorie della relatività.⁵ Miller si mostrava anche convinto che la maggioranza dei fisici, matematici ed astronomi fossero d'accordo con la sua interpretazione. Le sue parole illustrano che egli aveva un'immagine distorta della ricezione della relatività negli USA.

La corrispondenza di Miller, però, dimostra anche che lui aveva abbandonato totalmente il lavoro sull'interpretazione dei suoi esperimenti e la battaglia contro la relatività fin dal 1935. Egli si diceva troppo anziano per questo tipo di lavoro, era troppo difficile per lui e aveva trovato “*almost impossible to get a clear idea of the full period effect*”.⁶ Nel 1935 Miller aveva fatto l'ultimo tentativo di affrontare il problema, ma Nassau non poté aiutarlo perché troppo occupato con altre ricerche. Miller cercò, allora, di ottenere l'aiuto di Shankland, perché non era capace di dare una spiegazione razionale dei suoi dati basata sul moto assoluto della Terra e sul trascinarsi dell'etere. Non esiste alcuna evidenza, comunque, che Shankland l'abbia aiutato in alcun modo. È molto probabile che anche l'ex allievo avesse altre ricerche considerate più urgenti e importanti nel 1935. Come conseguenza di queste risposte negative, Miller abbandonò il suo lavoro sugli esperimenti di *ether-drift* una volta per tutte. Nello stesso periodo altri documenti mostrano che Miller

⁴ Intervista con R. S. Shankland, “Memories of Dayton Miller”, 15 dicembre 1981, 3, *CRWUA, RSP*, 3hs55, fol. 3. Vedere anche “Oral history interview with Robert S. Shankland, 1974 August 20 and 21” rilasciata a L. S. Swenson Jr., trascritta on-line in http://www.aip.org/history/ohilist/4886_1.html (visionata il 13 maggio 2010).

⁵ Miller a G. S. Fulcher, 12 febbraio 1938, *AIP*; Gordon Scott Fulcher Papers, e Miller a Shankland, 23 gennaio 1935, per concessione del Prof. W. Fickinger; e Miller a Poor, 12 febbraio 1938, *Sheridan Library, CPP*, fol. D. C. Miller.

⁶ Miller a Shankland, 13 marzo 1935, *CRWUA, RSP*, A 08-019, fol. 1.

fosse oramai considerato, dalla propria comunità scientifica, come “*a gentleman of the old school*”.⁷

Shankland afferma che, nel periodo in cui Miller gli diede i suoi dati, già credeva nella relatività e che Miller era a conoscenza di questa divergenza di opinioni. Questa premessa serviva a Shankland per dimostrare che Miller non avesse alcun pregiudizio verso le teorie relativiste e che stesse semplicemente cercando la vera spiegazione dei suoi dati. Shankland, però, ammette anche che loro non parlarono mai chiaramente circa le loro opinioni verso la relatività e Miller pensava che la maggior parte degli scienziati statunitensi non fossero entusiasti delle eccessivamente astratte teorie della relatività. È possibile, perciò, che Miller ritenesse che Shankland condividesse le sue impressioni negative verso tali teorie. È probabile, perciò, che Miller diede i suoi dati a Shankland perché questi sarebbero potuti essere utili come confutazione delle teorie relativiste e sperando che il suo successore compisse tale passo.

⁷ Davisson a Miller, 29 maggio 1936, *CWRUA, DMP*, box 1. Nel 1936, Miller andò in pensione dopo 46 anni di servizio. L'allora presidente della *Case School of Applied Science*, William Wickenden, organizzò una cerimonia in suo onore e gli conferì la posizione di *Honorary Professor of Physics*. Il mondo scientifico statunitense rispose con un'elevata quantità di lettere di stima per il lavoro compiuto da Miller come uomo di scienza, ma in queste pochissimi si riferiscono agli esperimenti di *ether-drift*, considerati da molti un fallimento nella sua carriera.

6.3. La prima fase del lavoro di Shankland sui dati di Miller (1950-52)

Per poter meglio comprendere i diversi passi compiuti da Shankland e i suoi colleghi tra l'inizio del lavoro di analisi su tali dati e la definitiva pubblicazione dell'articolo, è necessaria una descrizione cronologica degli eventi collegati a tale analisi. Il primo fatto di una certa rilevanza in questa storia è la prima visita che Shankland fece ad Einstein nel febbraio del 1950. L'intenzione di Shankland era di conoscere il ruolo che l'esperimento MMX aveva avuto nell'origine e sviluppo della teoria della relatività ristretta direttamente dalle parole del suo creatore.

Nello stesso periodo, Shankland stava cominciando ad essere fortemente interessato alla storia dei lavori scientifici di Michelson. I motivi di questo interesse vanno cercati soprattutto nel fatto che l'esperimento MMX fu l'evento scientifico più rilevante nella storia della *Case School of Applied Science*, di cui Shankland era una delle più considerevoli figure istituzionali, e nella convinzione di questi che tale esperimento fosse stato fondamentale nel passaggio tra fisica classica e fisica relativistica, convinzione condivisa da gran parte della comunità scientifica, statunitense e non solo. Queste ragioni fecero sì che Shankland considerasse il lavoro storico sulle ricerche di Michelson un modo di dare lustro all'istituzione per la quale egli lavorava e all'intera comunità scientifica statunitense.⁸

Nel 1952 sarebbe caduto il centenario della nascita di Michelson, con la possibilità di creare una celebrazione di rilevanza nazionale a Cleveland nell'istituto che nel 1947 aveva cambiato il proprio nome in *Case Institute of Technology*. Tale occasione portò Shankland a collegare le sue ricerche storiche su Michelson con il lavoro scientifico sui dati di Miller. Questa connessione, infatti, poteva accrescere la rilevanza di una spiegazione accettabile dei risultati di Miller che non fosse in opposizione alla teoria della relatività ristretta. Tale era il dichiarato e preciso obiettivo della ri-analisi dei risultati di Miller. All'inizio del 1950, perciò, Shankland intraprese contemporaneamente l'analisi dei dati di Miller e una ricerca storica che avrebbe dovuto risvegliare l'interesse della comunità scientifica su tale argomento. Le motivazioni espresse pubblicamente da Shankland per aver deciso di intraprendere questa difficile e lunga analisi sono due:

⁸ Il primo resoconto storico scritto da Shankland sul lavoro di Michelson al *Case* fu pubblicato nel 1949: Shankland, R. S. (1949) "Michelson at Case", *American Journal of Physics*, 17 (1949): 487-90.

- 1) il profondo interesse della comunità scientifica verso le problematiche lasciate irrisolte dalla scoperta di Miller;
- 2) il desiderio di far riconoscere pubblicamente il valore scientifico dei risultati di Miller con una spiegazione in accordo con l'ormai largamente accettata teoria della relatività ristretta.

La seconda fu probabilmente una ragione vera, ma, per quanto concerne la prima, sembrerebbe che fu lui a tentare di accrescere l'interesse della comunità scientifica prima d'intraprendere il lavoro piuttosto che il contrario. Un'altra motivazione, accennata da Shankland, era di natura tecnica, ossia la possibilità di utilizzare i nuovi computer per poter meglio analizzare i dati. Shankland, inoltre, credeva realmente che l'esperimento MMX fosse stato fondamentale nello sviluppo della teoria della relatività ristretta, come dimostrano le cinque conversazioni che ebbe con Einstein e un'interessante scambio di lettere tra di essi. In occasione della celebrazione del centenario della nascita di Michelson, infatti, Shankland chiese ad Einstein se egli conoscesse il risultato dell'esperimento MMX prima del suo articolo del 1905 e se l'esperimento di Michelson-Gale ebbe una qualche rilevanza nell'accettazione della relatività generale.

La risposta di Einstein fu alquanto divergente da quella fornita nella prima intervista concessa due anni prima e nella quale aveva negato di conoscere il risultato dell'esperimento MMX prima della scrittura del suo articolo. Shankland cercò di riassumere la nuova risposta di Einstein in un breve resoconto da leggere durante la celebrazione in onore di Michelson. Shankland mandò ad Einstein la seguente frase per ottenerne l'approvazione:

I am not sure when I first heard of the Michelson experiment, or of its more precise repetition by Michelson and Morley. I was not conscious that it influenced me directly during the seven and more years that the development of the Special Theory of Relativity had been my entire life; for I had taken it for granted.⁹

⁹ Allegato alla lettera Shankland a Einstein, 27 ottobre 1952, per concessione del Prof. W. Fickinger. Tali espressioni rimasero invariate nel resoconto che Shankland pubblicò nel 1963: Shankland, R. S. (1963) "Conversations with Albert Einstein", *American Journal of Physics*, 31 (1963): 47-57, p. 55.

Queste affermazioni, però, ma non ricevettero l'approvazione di Einstein che mandò una comunicazione con affermazioni sostanzialmente differenti:¹⁰

The influence of the crucial Michelson-Morley experiment upon my own efforts has been rather indirect. I learned of it through H. A. Lorentz's decisive investigation of the electrodynamics of moving bodies (1895) with which I was acquainted before developing the special theory of relativity. Lorentz's basic assumption of an ether at rest seemed to me not convincing in itself and also for the reason that it was leading to an interpretation of the result of the Michelson-Morley experiment which seems to me artificial. What led me more or less directly to the special theory of relativity was the conviction that the electro-motoric force acting on a body in motion in a magnetic field was nothing else but an electric field. But I was also guided by the result of the Fizeau-experiment and the phenomenon of the aberration. There is, of course, no logical way leading to the establishment of a theory but only groping constructive attempts controlled by careful consideration of factual knowledge.¹¹

Dopo molti anni, Shankland si chiedeva ancora il come mai di questo cambio di versione da parte di Einstein. Shankland ripeteva, infatti, che Einstein non aveva mai menzionato la forza elettromotrice nelle conversazioni tra loro, sebbene egli fosse perfettamente a conoscenza del ruolo conferito da Einstein a tale asimmetria nell'articolo del 1905. Sembrerebbe che, nelle comunicazioni ufficiali, Einstein abbia preferito attribuire all'esperimento MM il giusto posto nell'evoluzione storica del suo pensiero, con frasi più ponderate.¹²

È mia convinzione, però, che la perplessità di Shankland non aveva motivo di esistere. L'idea che il risultato nullo dell'esperimento MMX avesse portato in maniera lineare alla creazione della teoria della relatività ristretta era una riduzione semplicistica della storia. Einstein, nella risposta a Shankland, voleva rendere palese che la teoria di Lorentz aveva già

¹⁰ L'espressione di Einstein in risposta fu: "Your resume does not correspond exactly with the thoughts I was endeavouring to express", Einstein a Shankland, 29 ottobre 1952, per concessione del Prof. W. Fickinger. Le differenti versioni date da Einstein sul ruolo avuto dell'esperimento MMX sulla creazione della teoria della relatività ristretta hanno dato luogo ad una sterile controversia. Per accurate e convincenti analisi di questo problema vedere Holton, G. (1969) "Einstein, Michelson and the 'crucial' experiment", *Isis*, 60 (1969): 133-97; e Stachel, J. (2002b) "Einstein and Michelson: The Context of Discovery and the Context of Justification", in Stachel, J. (2002a) *Einstein from 'B' to 'Z'* (Boston: Birkhäuser, 2002): 177-90.

¹¹ Einstein scrisse la sua frase in tedesco. Secondo il Prof. Fickinger la traduzione inglese fu fatta dalla segretaria di Einstein, Helen Dukas. La frase di Einstein fu citata per esteso in Shankland, R. S. (1964) "The Michelson-Morley Experiment", *American Journal of Physics*, 31 (1964): 16-35, p. 35.

¹² Shankland a Stachel, 11 gennaio 1978, per concessione del Prof. W. Fickinger.

risolto il problema creato dal risultato nullo dell'esperimento MMX nel 1895 e che furono le riflessioni sulle problematiche della teoria del fisico teorico olandese a condurlo alla creazione della teoria della relatività ristretta.

L'atteggiamento di Einstein verso la storia dell'origine della sua teoria del 1905 non è, quindi, così ambigua come potrebbe apparire ad una lettura non approfondita; Shankland, infatti, non fece mai domande dirette sull'origine della teoria della relatività ristretta, ma solo sull'influenza dell'esperimento MMX e Einstein discusse sempre questa specifica questione durante le loro conversazioni.

Nello stesso periodo, Shankland e alcuni collaboratori iniziarono la nuova analisi delle osservazioni di Miller. Il primo passo di questo lavoro fu compiuto con l'affidamento di una tesi allo studente R. L. Stearns. Shankland aveva confidato ad Einstein la sua intenzione di studiare i dati di Miller con la convinzione dichiarata che *“a thorough analysis of the observations might show that they were consistent with a null result”*.¹³ Shankland si mostrava, infatti, convinto che il piccolo risultato ottenuto da Miller era dovuto al metodo utilizzato da questi nel trattamento dei dati e, così, aveva proposto di applicare ad essi l'analisi di auto-correlazione con una scheda di calcolo che lo studente Stearns stava costruendo.

I commenti di Einstein al proposito di Shankland costituirono un importante sostegno alla prosecuzione del lavoro. Il creatore delle teorie della relatività, infatti, affermò che un lavoro del genere era di centrale importanza sulla base del fatto che sia lui, sia Lorentz *“considered Miller an excellent experimenter and thought his data must be good”*.¹⁴

Dopo aver sondato l'interesse di Einstein, Shankland dovette aspettare la conclusione del lavoro di Stearns sulla costruzione della macchina necessaria alla nuova analisi dei dati. Prima che Stearns completasse tale opera, però, il fisico teorico John Lighton Synge (1897-1995) propose una spiegazione relativistica dei risultati di Miller utilizzando una nuova teoria del moto del corpo rigido nella teoria della relatività ristretta sviluppata nello stesso periodo da G. H. F. Gardner. L'argomentazione di Synge era basata sull'assunzione che

¹³ Shankland (1963), *op. cit.*, p. 51.

¹⁴ *Ibid.*, p. 51. Shankland stesso ammise e rese pubblico che l'interesse di Einstein nell'analisi dei dati di Miller diede un considerevole impulso alla prosecuzione del lavoro. Vedere la lettera Shankland a Dukas, 3 gennaio 1972, *CPAE* 20 317.

l'esperimento MM reale non era da considerarsi in un sistema inerziale, bensì nel moto accelerato della Terra in rotazione.¹⁵

Prima di pubblicare questa nuova spiegazione dei risultati di Miller, Synge chiese a Shankland più informazioni sulla differenza tra l'apparato di Miller e quelli utilizzati da coloro che non avevano visionato alcun effetto periodico. Shankland ebbe una folta corrispondenza con Synge dall'ottobre del 1951 fino al marzo 1952, in un periodo in cui stava pianificando, con il collega Leslie L. Foldy, una più dettagliata analisi statistica delle osservazioni di Miller.¹⁶

Proprio nel mezzo di questa corrispondenza, Shankland andò da Einstein per il terzo colloquio con lo scopo di chiedere cosa questi pensasse dell'analisi di Synge. Quest'ultimo, però, avrebbe pubblicato il primo articolo su tale soggetto solo alcuni mesi dopo, perciò Einstein era all'oscuro del suo lavoro e poté rispondere alla richiesta di Shankland solo sulla base delle informazioni che l'ultimo aveva dedotto dalla corrispondenza con Synge. Ancora una volta, Einstein assicurò Shankland: la spiegazione proposta da questi per i risultati di Miller "*was a more likely explanation than Synge's*".¹⁷ Anche in questo caso, quindi, sembra che Shankland abbia avuto bisogno e ottenuto un sostegno teorico autorevole grazie alle parole incoraggianti di Einstein nella sua prosecuzione dell'analisi dei dati di Miller.¹⁸

La reazione negativa di Einstein al tentativo di Synge può anche essere utilizzata per confutare l'immagine, evidente in buona parte della letteratura anti-relativista, di uno scienziato inteso a trovare una qualunque spiegazione dei dati di Miller purché non fosse in contraddizione con la sua teoria. I criteri espressi da Einstein in questo caso, nel febbraio del 1952, sono essenzialmente identici a quelli già espressi negli anni '20. Non è possibile dire se Shankland abbia inconsciamente enfatizzato l'interesse di Einstein verso il problema della possibile spiegazione degli esperimenti di Miller, ma appare abbastanza evidente che

¹⁵ La teoria di Gardner e la sua applicazione agli esperimenti MM furono pubblicati in Gardner, G. H. F. (1952) "Rigid-Body Motions in Special Relativity", *Nature*, 170 (1952): 243; e Synge, J. L. (1952a) "Gardner's Hypothesis and the Michelson-Morley Experiment", *Nature*, 170 (1952): 243-44.

¹⁶ Synge a Nassau, 15 ottobre 1951; Shankland a Synge, 29 ottobre 1951; Synge a Shankland, 3 novembre 1951; Shankland a Synge, 8 gennaio 1952; Synge a Shankland, 11 gennaio 1952; Shankland a Synge, 21 gennaio 1952; Synge a Shankland, 5 febbraio 1952; Shankland a Synge, 28 febbraio 1952; Synge a Shankland, 8 marzo 1952; e Shankland a Synge, 21 marzo 1952, *CWRUA*; *RSP*, A 08-19, box 2.

¹⁷ Shankland (1963), *op. cit.*, p. 53.

¹⁸ Shankland chiese ad altri fisici teorici, più esperti di lui rispetto alle problematiche in questione, un commento sulla validità delle argomentazioni di Synge. La risposta di Valentine Bargmann (1908-1989) riconobbe la validità degli argomenti di Synge, ma sottolineò la necessità di attendere un articolo con maggiori dettagli per poter formulare un giudizio. Foldy a Bargmann, 10 dicembre 1951, and Bargmann a Foldy, 30 gennaio 1952, *CWRUA*; *RSP*, A 08-19, box 2.

una spiegazione del tipo proposta da Synge non rientrasse nel suo approccio epistemologico e scientifico, al contrario del lavoro di Shankland. La spiegazione alternativa di Synge e Gardner ebbe, comunque, una vita molto breve, perché un esperimento da loro proposto come rivelatore di un effetto derivante dalla loro teoria diede, alla fine dello stesso 1952, risultato nullo.¹⁹

All'inizio del 1952 Shankland venne anche a conoscenza dell'interesse di Sam Abraham Goudsmit (1902-1978), editore di *Physical Review*, verso gli strani risultati degli esperimenti di Miller. Goudsmit aveva chiesto a Eugene W. Pike, capo della sezione di fisica applicata della *Raytheon Manufacturing Company*, delucidazioni sul risultato degli esperimenti di *ether-drift* di Miller. Interessatosi all'argomento, Pike pensava che una nuova procedura per la riduzione dei dati raccolti da Miller fosse necessaria, ma con la convinzione che “*the evidence seems [...] to be heavily weighted in favour of a real provable, positive result from at least Mt. Wilson observations*”.²⁰

Per concludere questo paragrafo potrebbe essere utile un riassunto della situazione all'inizio del 1952: Shankland stava lavorando con i ricercatori del *Case Foldy* e E. F. Shrader all'analisi di autocorrelazione dei dati di Miller con l'aiuto di un computer che uno studente stava costruendo, ma non aveva ancora raggiunto alcun risultato da riportare, quando altri scienziati avevano iniziato a lavorare ad altre possibili spiegazioni, ma ebbe un importante sostegno da Einstein che apprezzava il suo approccio al problema. L'analisi autocorrezionale, però, non fece raggiungere i risultati sperati e Shankland cambiò in modo radicale la strategia con la quale affrontò il problema.

¹⁹ Ditchburn, R. W., e Heavens, O. S. (1952) “Relativistic Theory of a Rigid Body: Letter to the Editor”, *Nature*, 170 (1952): 705.

²⁰ Pike a Shankland, 9 gennaio 1952, *CWRUA, RSP*, A 08-19, box 2.

6.4. I cambi di argomentazione e la pubblicazione dell'articolo (1952-55)

Sfortunatamente non ci sono fonti dirette per comprendere cosa accadde tra l'inizio del 1952 e i primi mesi del 1954, quando lo staff che si occupava dell'analisi dei dati di Miller e i metodi utilizzati erano radicalmente differenti.

L'unica cosa certa è che Stearns completò la sua tesi nel 1952 trovando che i risultati di Miller ottenuti al *MWO* non potevano essere spiegati con il metodo di analisi autocorrezionale, per cui Shankland cambiò il metodo impiegato senza modificare l'obiettivo principale del suo lavoro.²¹ Riguardo ai cambiamenti nel team impegnato in questa ricerca, il collega Foldy aveva iniziato ad essere impegnato a problemi teorici di maggiore rilevanza e a compiere alcune ricerche lontano da Cleveland, mentre Shrader iniziò ad essere occupato pienamente dalle sue ricerche con il *betatron* del *Case*.²²

Nel frattempo, Shankland aveva continuato le sue ricerche storiche e aveva compiuto un lavoro sulla derivazione relativistica dell'esperimento di Michelson-Gale. Secondo la spiegazione largamente accettata dai fisici teorici contemporanei, l'esperimento di Michelson-Gale non può essere considerato relativista perché mostra un effetto al primo ordine di v/c . Come abbiamo visto nel capitolo precedente, l'esperimento di Michelson-Gale ha anche una possibile spiegazione non relativistica con una teoria dell'etere stazionario e, utilizzando le parole di Einstein, esso “*concerns the relativity question but [...] not insofar as relativity theory differs from Lorentz's theory based on an ether at rest*”.²³ La dichiarata ammirazione di Einstein verso tale esperimento dipese dall'ingegnosità del metodo utilizzato per poter superare la difficoltà dovuta all'impossibilità di cambiare la direzione al moto di rotazione della Terra per visionare l'effetto (vedi par. 4.3).

Come lo stesso Foldy fece notare a Shankland, l'esperimento di Michelson-Gale ebbe piuttosto un valore storico perché rese difficile l'alternativa spiegazione dell'esperimento MM di un etere trascinato dalla superficie terrestre. L'atteggiamento di Shankland verso

²¹ Stearns, R. L. (1952) “A Statistical Analysis of Interferometer Data” (MS Thesis, Case Institute of Technology, Physics Dept., 1952). I maggiormente esperti Prof. E. F. Shrader e Prof. L. L. Foldy del *Case* aiutarono il giovane Stearns nel compiere tale analisi nella sua tesi.

²² Fickinger, W. (2006) *Physics at a Research University: Case Western Reserve 1830-1990* (Cleveland, Case Western Reserve University, 2006), pp. 71-74 e 112-20.

²³ Einstein a Shankland, 17 settembre 1953, per concessione del Prof. W. Fickinger.

l'esperimento di Michelson-Gale mostra, ancora una volta, come avesse cercato di dare un'importanza eccessiva al ruolo di Michelson nell'accettazione della relatività.²⁴

Nello stesso periodo, Shankland cominciò a collaborare con S. W. McCuskey e F. C. Leone ad una nuova analisi statistica dei dati di Miller. Le macchine IBM in dotazione al laboratorio di matematica permisero di studiare tale materiale piuttosto velocemente e all'inizio del 1954, Shankland mostrava di essere sicuro di aver raggiunto una conclusione soddisfacente che riassunse con le parole: "*the small periodicities observed by Miller are due to statistical fluctuations and, to a lesser degree, to temperature conditions at Mount Wilson*".²⁵

Prima di completare la prima copia del loro articolo, i tre autori chiesero al loro collega H. G. Elrod di compiere alcuni calcoli sugli effetti dovuti alla temperatura. Visto che l'effetto di temperatura raggiunse un significato fondamentale nell'articolo poi pubblicato, è essenziale analizzare nei dettagli tale argomento. Il calcolo dell'effetto di temperatura capace di produrre un effetto del tipo trovato da Miller portava ad affermare che "*a periodic change amounting to about 0,001 °C in the air in one interferometer*".²⁶ Tale quantità dipendeva dal cambio delle lunghezze dei percorsi ottici dovuti ai diversi indici di rifrazione dell'aria a differenti temperature ed era simile alla quantità già stimata da Joos e Kennedy. Elrod, invece, si prese il compito di calcolare la dipendenza delle oscillazioni di temperatura nell'interferometro utilizzato da Miller dalla differenza di temperatura nella stanza. La conclusione di Elrod fu che, chiamando T_w la differenza di temperatura tra un muro e la media della temperatura dell'aria nella stanza, la differenza di temperatura tra i due bracci seguiva la relazione:

$$\Delta T = 0,00005 T_w \quad (6.1).^{27}$$

²⁴ Foldy a Shankland, 3 agosto 1953, *CWRUA, RSP, A 08-19, box 2*. Abbiamo già discusso il ruolo avuto dall'esperimento di Michelson-Gale in contrasto con le possibili interpretazioni anti-relativistiche dell'esperimento di Miller nel Cap. 5. Negli archivi della *CWRU* si trovano alcune pagine dell'articolo di Shankland sulla derivazione relativistica dell'esperimento di Michelson-Gale. Foldy scrisse una lettera dopo aver letto tale articolo in cui espresse i suoi dubbi che tale articolo poteva essere mal compreso perché in esso l'effetto Sagnac sembrava avere solo una spiegazione relativistica.

²⁵ Shankland a Foldy, 8 gennaio 1954, *CWRUA, RSP, A 08-19, box 2*. Foldy stava lavorando nell'*Institute for Theoretical Physics* a Copenhagen durante l'anno 1954, così costui poté aiutare i suoi colleghi del *Case* solo per corrispondenza.

²⁶ Shankland, R. S., McCuskey, S. W., e Leone, F. C. 'Prima Copia di "New analysis of the Interferometer Observations of Dayton C. Miller"', p. 6, per concessione del Prof. W. Fickinger.

²⁷ Elrod calcolò lo stesso valore in due note diverse prima che la prima copia del loro articolo fosse spedita a Foldy per commenti. Note manoscritte di Elrod del 9 febbraio 1952 e del 26 febbraio 1952, per concessione del Prof. W. Fickinger.

La prima copia dell'articolo firmato dai tre professori del *Case*, fu pronta per la fine di febbraio per essere immediatamente spedito a Foldy e Philip McCord Morse (1903-1985) per commenti. Tale scritto conteneva un'introduzione storica, una discussione dell'effetto di temperatura che poteva aver influito su una parte dell'effetto rilevato da Miller, e la nuova analisi statistica che rendeva conto di metà dell'ampiezza media della seconda armonica. Nella conclusione, gli autori affermavano:

*The present analysis shows beyond a reasonable doubt that the extensive series of observations made by Dayton C. Miller in his painstaking experiments at Mount Wilson are entirely consistent with a null result.*²⁸

Foldy criticò questa conclusione dipendente dall'analisi statistica. I suoi calcoli, infatti, portavano a conclusioni contrarie a quelle espresse nell'articolo dei suoi colleghi del *Case*: “*less than 15% of the observed amplitude probably arises from statistical fluctuation in the data*”, il che coincideva con i risultati raggiunti da Stearns con l'analisi autocorrezionale.²⁹

Foldy si disse deluso dal fatto che gli autori dell'articolo non avessero tenuto un approccio più cauto verso questo sottile e complesso argomento e suggerì di riutilizzare la rigettata analisi autocorrezionale perché rendeva maggiormente chiara la separazione tra gli effetti sistematici e quelli statistici. Foldy, infatti, era sicuro che un effetto sistematico fosse presente e un'analisi statistica migliore era necessaria per poterlo meglio definire.

Foldy apprezzò, invece, la discussione sull'effetto della temperatura perché essa poteva essere utilizzata per rendere conto dell'effetto sistematico. Alla fine di questi minuziosi e validi commenti, Foldy consigliò di approfondire lo studio delle registrazioni di temperatura di Miller per poter comparare l'ipotesi di un'influenza di tale effetto con i dati sperimentali. Shankland e i suoi collaboratori accettarono le critiche di Foldy e utilizzarono un approccio radicalmente diverso nei loro successivi riesami del soggetto. La struttura della seconda copia non subì modifiche, ma le conclusioni furono meno affermative sulla rilevanza delle fluttuazioni statistiche nell'effetto rilevato da Miller. Una frase, in particolare, rende evidente questo cambio di punto di vista:

²⁸ Shankland, R. S., McCuskey, S. W., Leone, F. C., e Kuerti, G. (1955) “New Analysis of the Interferometer Observations of Dayton C. Miller”, *Reviews of Modern Physics*, 27 (1955): 167-78, p. 16.

²⁹ Foldy, L. L. “Critical remarks apropos ‘A New Analysis of the Interferometer Observations of Dayton C. Miller’”, per concessione del Prof. W. Fickinger, scritto allegato alla lettera Foldy a Shankland, 2 marzo 1954, *CWRUA, RSP, A 08-19*, box 2.

*It is apparent that random statistical processes contribute considerably to the periodic effect when it is small but that the larger amplitudes are relatively unaffected and cannot be explained in this manner.*³⁰

Oltre a mostrare conclusioni più conservative sull'analisi statistica, il nuovo scritto conteneva anche uno studio più preciso dell'effetto di temperatura e un'indagine più dettagliata dei dati concernenti gli azimut delle osservazioni di Miller, la quale dimostrava che queste non potevano essere in accordo con un effetto cosmico, ma piuttosto con uno locale. L'assenza di un numero sufficiente di registrazioni dei dati di temperatura impediva, però, una più precisa correlazione tra i dati di Miller e la posizione del Sole.³¹

Nonostante le migliorie, anche questa versione del lavoro degli scienziati del *Case* fu esposto a critiche. Il fatto che le variazioni di temperatura fossero ora ritenute la causa più probabile dell'effetto trovato da Miller rendeva evidente che i loro calcoli portavano a conclusioni difficili da credere. Anche se il calcolo non era espresso in maniera netta, una semplice moltiplicazione mostrava che la differenza tra due muri dell'edificio nel quale Miller aveva eseguito le sue osservazioni doveva essere di 20°C, in base alla formula (6.1) ricavata da Elrod.³²

Foldy sottolineò immediatamente che una tale differenza tra la temperatura del muro e la media interna alla stanza era troppo cospicua e fu, di nuovo, contrario alle conclusioni, troppo imprecise, espresse nell'articolo. Dato che Miller aveva, infatti, studiato gli effetti di temperatura e dichiarato esplicitamente che questi non potevano essere la causa dell'effetto era necessario che Shankland e i suoi collaboratori mostrassero evidenze più chiare per essere convincenti. Le conclusioni che Foldy scrisse a Shankland furono molto nette:

³⁰ Shankland, R. S., McCuskey, S. W., e Leone, F. C. 'Seconda Copia di "New analysis of the Interferometer Observations of Dayton C. Miller"', p. 14, per concessione di Prof. W. Fickinger.

³¹ Shankland a Foldy, 25 marzo 1954, *CWRUA, RSP*, A 08-19, box 2. La seconda copia fu mandata a Foldy in allegato a questa lettera.

³² La differenza di temperatura tra i due bracci dell'interferometro in funzione della differenza di temperatura tra un muro e la temperatura media della stanza era $0,00005T_w$. La differenza tra la temperatura dei due bracci doveva essere $0,001^\circ\text{C}$ per rendere conto dell'effetto osservato da Miller. Questo significava che $0,001^\circ\text{C}=0,00005T_w$. Questa formula porta ad una differenza di temperatura $T_w=20^\circ\text{C}$.

*If I knew nothing at all about relativity (and thus had no prejudices concerning what the outcome of the experimental tests should be) I believe I would find Miller's analysis of the results more convincing than the arguments you present against this interpretation.*³³

Questa frase, però, necessita qualche delucidazione perché potrebbe essere facilmente mal interpretata. Foldy non credeva in un reale effetto di *ether-drift*, riconosceva che l'analisi di Miller non poteva spiegare la strana variazione della media degli azimut, trovava molto difficile dare credito ad un trascinamento dell'etere corrispondente al 90% della sua velocità, e riteneva che la teoria della relatività ristretta fosse ben stabilita. La frase sopra riportata non va intesa, quindi, come un argomento a favore della spiegazione basata sull'effetto di *ether-drift* dei dati di Miller, ma semplicemente come una critica alla metodologia usata da Shankland e i suoi collaboratori che portava il loro lavoro a non essere abbastanza convincente.

La capacità di Foldy di separare le sue convinzioni personali da una razionale critica alle argomentazioni usate nell'analisi dei dati di Miller, fu di notevole aiuto allo scienziato del *Case* per apportare migliorie al loro articolo. Alle critiche di Foldy si unì anche il teorico del *Case* Martin J. Klein, il quale espresse la convinzione che la differenza di temperatura era eccessiva e consigliò, inoltre, di cambiare l'ordine degli argomenti.³⁴

Prima ancora della risposta di Foldy, un altro scienziato del *Case* si era unito al gruppo di ricerca di Shankland. Tale gruppo, infatti, aveva iniziato a cercare altre possibili cause dell'effetto sistematico trovato da Miller come quelle di origine magnetica o meccanica. G. Kuerti si prese il compito specifico di indagare gli effetti di quest'ultimo tipo originati da una possibile instabilità dinamica dello strumento di Miller. Tra maggio e luglio del 1954, la spiegazione dipendente dalla magnetostrizione fu messa da parte definitivamente. Il gruppo di Shankland dimostrò, infatti, che un effetto del genere non era in accordo con la fase dell'effetto rilevato da Miller.³⁵ L'analisi meccanica, al contrario, ricevette un certo spazio nell'analisi finale, anche se secondario rispetto a quello dedicato all'effetto di temperatura.

³³ Foldy, L. L. "Remarks concerning "A New Analysis of the Interferometer Observations of Dayton C. Miller-2nd draft", 2 giugno 1954, per concessione del Prof. Fickinger [enfasi nell'originale].

³⁴ "Comments of Martin J. Klein" allegati alla copia di Shankland et al. (nota 30), per concessione del Prof. W. Fickinger. Per un resoconto del lavoro di Klein al *Case* vedere Fickinger (2006), *op. cit.*, pp. 121-22.

³⁵ Shankland a R. M. Bozorth, 15 aprile 1954; Bozorth a Shankland, 21 aprile 1954; Shankland a Bozorth, 5 maggio 1954; e Joos a Kuerti, 17 maggio 1954, per concessione del Prof. W. Fickinger. In queste lettere, la magnetostrizione era ancora considerata una possibile causa dell'effetto.

I quattro scienziati continuarono a lavorare intensamente e riuscirono a mandare un'ennesima ed ampliata versione del loro articolo a molti scienziati, nel luglio del 1954, con la richiesta di commenti prima di mandare l'articolo alla rivista *Reviews of Modern Physics* per la pubblicazione.³⁶ La struttura dell'articolo era molto differente da quella della seconda versione. Gli autori, infatti, situarono la discussione sull'analisi statistica immediatamente dopo il resoconto storico, come suggerito da Martin J. Klein. Tale paragrafo aveva l'obiettivo di dimostrare che una spiegazione dovuta al moto cosmico della Terra fosse inconsistente con i dati di Miller. L'argomento di questa sezione era sostanzialmente identico a quello già proposto da Thirring nel 1926 (vedi par. 5.5.2), ma era presentato in una forma più conveniente e portava in modo chiaro alla conclusione che una causa locale fosse quella più probabile.

Dopo la sezione sull'analisi statistica, gli autori proposero due differenti possibilità per trovare una causa consistente con le osservazioni di Miller: un effetto meccanico, studiato da Kuerti, ed uno predominante basato sulla differenza di temperatura nei percorsi ottici. La sezione dedicata all'ultima spiegazione era, ancora una volta, la più significativa e gli autori diedero molti esempi in cui tale variazione di temperatura poteva essere confermata dalle registrazioni di temperatura effettuate da Miller, come richiesto da Foldy.

Nella versione del luglio del 1954, il termine $0,00005T_w$, che avrebbe potuto portare al calcolo preciso di 20°C per la differenza di temperatura dentro la stanza, scomparve e gli effetti dovuti alla temperatura furono considerati troppo complessi da essere calcolati precisamente.³⁷ Secondo gli scienziati del *Case*, infatti, tali effetti influivano su un insieme di dati: i cambi delle densità dell'aria nei percorsi ottici, la deflessione angolare di supporti degli specchi, e l'espansione termica dell'acciaio. Oltre a questi, secondo gli autori, effetti di radiazione termica sicuramente agivano sull'interferometro durante le ore del giorno.

Gli argomenti portati a conferma della rilevanza degli effetti di temperatura, in questa versione dell'articolo, non scorrono in maniera molto fluida. Da un lato, si affermava che una differenza di temperatura di $0,001^\circ\text{C}$ tra i due bracci dell'interferometro era sufficiente a rendere conto dell'effetto osservato da Miller, dall'altro, si assumeva che il reale effetto di

³⁶ Questa versione fu, in realtà, la quarta ed è datata 7 luglio 1954. La terza versione del 2 luglio 1954 era differente solo nell'ordine in cui gli argomenti venivano esposti.

³⁷ Gli autori affermarono "*It is impossible to carry through calculations which would accurately predict the overall behaviour of the interferometer due to temperature anomalies*", Shankland, R. S., McCuskey, S. W., e Leone, F. C., 'Terza Copia di "New analysis of the Interferometer Observations of Dayton C. Miller"', p. 23, per concessione del Prof. W. Fickinger.

temperatura era troppo complesso da essere calcolato. Oltre a ciò, una notevole differenza tra la temperatura media della stanza e quella di un muro era necessaria per rendere conto della differenza di $0,001^{\circ}\text{C}$ tra le braccia dell'interferometro di Miller, ma gli autori non espressero esplicitamente il valore di tale differenza. Le registrazioni di temperatura effettuate da Miller, inoltre, non permettevano uno studio sistematico delle variazioni di temperatura durante gli esperimenti, perciò Shankland e colleghi poterono solo mostrare alcuni esempi nei quali i dati di Miller potevano essere correlati con le temperature effettivamente registrate.

A dispetto di questa confusione concernente la sezione riguardante l'effetto dovuto alle variazioni di temperatura, le reazioni dei fisici che lessero questa versione fu decisamente positiva. La maggior parte di questi, infatti, trovarono l'articolo convincente, con le sole eccezioni di Frank Watson Dyson e E. M. Thorndike.³⁸ Lo stesso Einstein mandò una lettera in cui espresse le sue buone opinioni verso il lavoro compiuto da Shankland e i suoi collaboratori:

*You have shown convincingly that the observed effect is outside the range of accidental deviations and must, therefore, have a systematic cause. You made it quite probable that this systematic cause has nothing to do with "ether-wind", but has to do with differences of temperature of the air traversed by the two light bundles which produced the bands of interference.*³⁹

Rimandando alle conclusioni l'analisi delle reazioni positive all'opera di Shankland, concentrerò ora la mia attenzione sulle critiche poste da Dyson dato che queste portarono ai cambi definitivi prima della versione finale poi pubblicata. Secondo Dyson, l'articolo dimostrava in maniera convincente che l'effetto trovato da Miller non poteva essere dovuto a un *ether-drift*, ma alle variazioni di temperatura. Tale convinzione non impedì, però, a Dyson di chiedere a Shankland un'analisi numerica più dettagliata della connessione tra le registrazioni di temperatura di Miller e i dati della seconda armonica. Una stessa differenza di temperatura tra i muri avrebbe, infatti, dovuto implicare uno stesso effetto sugli

³⁸ Non è possibile fare qui una lista completa di tutte le risposte positive ricevute da Shankland. Basti qui citare solo le personalità più rilevanti: Panofsky a Shankland, 15 novembre 1954; Byrge a Shankland, 3 agosto 1954; Kemble a Shankland, 28 ottobre 1954; Born a Shankland, 18 agosto 1954; e Margenau a Shankland, 16 settembre 1954, per concessione di Prof. W. Fickinger.

³⁹ Einstein a Shankland, 31 agosto 1954, per concessione del Prof. W. Fickinger.

spostamenti delle frange durante le osservazioni. Dyson concedeva che un possibile risultato negativo sull'esistenza di una tale correlazione non provava che l'effetto non fosse dovuto alla temperatura, ma un risultato positivo sarebbe, senza dubbio, stato considerato conclusivo a favore della spiegazione di Shankland. Dyson, quindi, concluse la sua risposta raccomandando vivamente o di compiere tale correlazione o di spiegare perché questa non fosse possibile per evitare ulteriori critiche.⁴⁰

Dopo i suggerimenti di Dyson, Shankland e i suoi collaboratori riscrissero il paragrafo dedicato all'effetto di temperatura. In seguito ad ulteriori indagini, essi trovarono qualche corrispondenza del tipo richiesto da Dyson, ma Shankland dovette ammettere che non vi erano abbastanza dati per poter fare una correlazione completa.⁴¹ Questo fu l'ultimo cambio effettuato sull'articolo. All'inizio del dicembre del 1954, Shankland mandò una versione, leggermente accorciata, dell'articolo alla rivista *Reviews of Modern Physics* dove venne pubblicato nell'aprile del 1955, pochi giorni dopo la morte di Einstein.

⁴⁰ Dyson a Shankland, 12 ottobre 1954, per concessione del Prof. W. Fickinger.

⁴¹ Shankland a Dyson, 23 novembre 1954, per concessione del Prof. W. Fickinger.

6.5. L'accoglienza dell'articolo presso la comunità scientifica

L'argomento degli autori dell'articolo era basato sul concetto di plausibilità: le variazioni dell'azimut rendevano estremamente improbabile una spiegazione cosmica come l'*ether-drift*, mentre erano in accordo con una causa locale, come il gradiente di temperatura dentro la stanza. I fisici anti-relativisti, però, non accettarono questo tipo di argomentazione. Le loro critiche erano basate sulla mancanza di completezza nella dimostrazione dell'effetto di temperatura e sul fatto che Miller aveva esplicitamente dichiarato che tale tipo di spiegazione non era accettabile.⁴² Nonostante tali critiche, l'articolo è spesso considerato l'ultima parola sulla questione degli esperimenti di Miller nella letteratura secondaria.

Sebbene fossero quattro i firmatari dell'articolo finale, è fuor di dubbio che Shankland fosse il principale scienziato implicato in questa ricerca. Egli era un amico di Miller e il suo successore accademico, ma anche uno scienziato della nuova generazione che aveva imparato ad utilizzare la teoria della relatività, quanto meno ristretta, nel suo lavoro di ricerca quotidiano. Un'analisi della sua corrispondenza fornisce degli elementi chiave per comprendere quale fosse la reazione della comunità scientifica statunitense all'articolo del 1955.

Il primo di tali elementi è l'apprezzamento per il desiderio di Shankland di riabilitare il nome di Miller. L'interpretazione di Miller delle proprie osservazioni aveva marcato in maniera negativa l'ultima parte della sua carriera. Prima di questo evento, Miller era stato un uomo di scienza largamente riconosciuto per la sua abilità come fisico sperimentale, la sua conoscenza dell'acustica, il suo servizio in molte società scientifiche e, non da meno, il suo ruolo di insegnante e divulgatore scientifico. Negli ultimi anni di vita, però, il suo nome era soprattutto legato alla battaglia contro la relatività basata su strani risultati che la maggior parte dei fisici riteneva essere dovuti ad errori sperimentali.

Il principale obiettivo dichiarato da Shankland era dimostrare che Miller aveva misurato un effetto reale, anche se questo non aveva niente a che fare con un *ether-drift*. In altre parole, il desiderio di Shankland era far riconoscere dalla comunità scientifica che Miller aveva realmente compiuto un ammirevole lavoro con le sue minuziose e faticose ricerche sul Mount Wilson e che, semplicemente, non poteva arrivare alla giusta conclusione per la mancanza di una macchina con cui analizzare i dati in modo corretto.

⁴² Vedere per es. Maurice Allais a Shankland, 10 ottobre 1955, per concessione del Prof. W. Fickinger.

Gli scienziati che avevano conosciuto Miller di persona, riconobbero e apprezzarono l'intenzione di Shankland. Eckart, per esempio, scrisse a Shankland che questi aveva compiuto “*a service to his memory*”, mentre Panofsky definì “*a labor [sic] of love*” il tempo speso in questa lunga analisi dei dati di Miller.⁴³ La lettera di Panofsky è particolarmente indicativa dell'importanza dei risultati di Miller presso la comunità scientifica statunitense alla metà degli anni '50. Secondo Panofsky “*without this [l'articolo di Shankland] Miller's results would have just remained one of the unexplained, odd results, and [nessuno] would have seriously changed his ideas about relativity on that basis*”.⁴⁴ Panofsky, inoltre, apprezzò l'introduzione storica sugli esperimenti MM. Le parole di Panofsky sembrano ben riassumere le motivazioni della buona ricezione dell'articolo degli scienziati del *Case* presso la comunità scientifica statunitense. Molte risposte, infatti, apprezzarono l'introduzione storica così come la riabilitazione di Miller, dato che l'interpretazione data da questi ai suoi esperimenti lo aveva “*linked [...] to a crowd of lesser men*”.⁴⁵

L'obiettivo di Shankland, comunque, fornì anche argomentazioni per le critiche anti-relativiste. Il tentativo di riportare alla luce l'abilità scientifica di Miller ebbe per conseguenza, infatti, un passo falso nella ricerca della giusta analisi finale. Shankland era convinto che le fluttuazioni statistiche fossero la causa dell'effetto trovato da Miller. Questa convinzione lo portò a sovrastimare questo lato della ricerca sulla quale si basò il lavoro dei suoi collaboratori per quasi quattro anni. Il tempo eccessivo dedicato all'analisi statistica lo portò a non dedicare altrettanti sforzi allo studio degli effetti di temperatura. Questo, in unione alle problematiche nel calcolo di tali effetti ebbe la conseguenza che tale argomento fosse non probante.

Gli sforzi di Shankland di attirare l'attenzione del mondo scientifico verso il suo lavoro crearono, inoltre, alcune incomprensioni sull'importanza che gli esperimenti di *ether-drift* avevano avuto nella storia delle teorie della relatività. Queste sono alcune delle

⁴³ Eckart a Shankland, 3 agosto 1954, e Panofsky a Shankland, 15 settembre 1954, per concessione del Prof. W. Fickinger.

⁴⁴ Panofsky a Shankland, *ibid.*

⁴⁵ Eckart a Shankland, 3 agosto 1954, *loc. cit.* Non è difficile scorgere in questi “*lesser men*” tutti quegli scienziati che contrastarono la relatività con eccessiva animosità, senza che fosse possibile una discussione più ragionevole, o sulla base di pregiudizi razziali. Senza troppo addentrarsi in quest'ultimo problema è importante notare che il possibile antisemitismo di Miller era un tema che anche Shankland tenne presente visto che si sentì in dovere di affermare come Miller non fosse d'accordo con la politica razziale tedesca contro gli ebrei. Per dimostrare questa opposizione di Miller, Shankland afferma che questi amava la musica e il paesaggio tedeschi, e che organizzava viaggi in quel paese ogni volta che poteva, ma che smise di andarvi per protesta dopo che Hitler fu nominato Cancelliere del Reich nel 1933. Vedere “*Interview with R. S. Shankland*”, *loc. cit.*

problematiche ancora presenti nelle critiche anti-relativiste al lavoro di Shankland sui dati di Miller. A parte alcune figure molto radicali all'interno del mondo scientifico, comunque, la spiegazione di Shankland fu subito considerata una conclusione soddisfacente del problema legato ai risultati di Miller.

Dalla corrispondenza appare che la base sulla quale il lavoro di Shankland fu valutato dipendeva, però, in larga misura, dalla scarsa rilevanza che il problema aveva presso il mondo scientifico. I pochi scienziati, infatti, che fecero lo sforzo per entrare nei dettagli dei calcoli dell'articolo di Shankland trovarono gli argomenti convincenti, ma non completi. Tutti gli altri mostrarono di affidarsi agli esperti del campo evidenziando come l'enorme crescita della specializzazione scientifica avesse reso fondamentale il ruolo dell'autorità in un particolare ramo della fisica nella decisione finale sulle problematiche controverse. Nella buona accoglienza delle analisi di Shankland sembra, perciò, mostrarsi anche con maggior presenza quella fiducia nell'autorità in una particolare branca della fisica che giocò un ruolo importante anche nel caso dell'accoglienza dei risultati di Miller e dell'accettazione della ripetizione di Michelson.

6.6. Conclusioni

Da quello che ho mostrato in questo capitolo sembrerebbe che Shankland fu condotto a riesumare i dati di *ether-drift* di Miller per ragioni differenti: la possibilità di usare i computer per la valutazione delle fluttuazioni statistiche, il desiderio di rivalutare il nome di Miller, e la possibilità di compiere un lavoro con il supporto autorevole di Einstein. Gli obiettivi di Shankland influirono negativamente sul suo approccio al compito che si era prefisso portandolo su una strada sbagliata.

Ad ogni modo, grazie all'aiuto di Foldy, Klein e Dyson, che sembravano avere un atteggiamento meno imparziale verso questo problema, Shankland e i suoi collaboratori poterono migliorare la loro analisi, riconoscendo la presenza di un effetto sistematico reale e organizzando l'articolo affinché l'effetto di temperatura risaltasse come la causa più probabile di tale effetto sistematico.

Per poter completare il suo lavoro in modo soddisfacente, Shankland fu costretto a rinunciare ad uno dei suoi propositi. Miller, infatti, aveva considerato l'effetto della temperatura ed aveva espresso chiaramente l'impossibilità di tale causa. Shankland fu, alla fine, portato a riconoscere che Miller si era sbagliato su questo punto.

In tutto il resto dell'articolo, Shankland cercò di non dare particolare rilevanza alla spiegazione di Miller basata sull'*ether-drift*. Gli scienziati anti-relativisti attaccano questa mancanza di riferimenti all'interpretazione di Miller e accusano Shankland di coprire la verità, ma è piuttosto evidente che questi non citò il suo ex mentore perché non voleva attaccare le sue affermazioni in maniera troppo diretta. Shankland non voleva ricordare alla comunità scientifica l'ostinazione di Miller che alcuni scienziati criticarono nella parte finale della vita di questi.

L'articolo di Shankland fu subito visto come una spiegazione razionale che non era in contraddizione con la teoria della relatività ristretta, ormai ampiamente accolta dalla comunità scientifica internazionale. Questo avvenne a dispetto del fatto che la spiegazione di Shankland non era conclusiva, ma solo molto più probabile di quella basata sull'*ether-drift*.

La corrispondenza che ho analizzato, inoltre, dimostra che l'autorevolezza in un specifico ramo della fisica fu di decisiva importanza in molti momenti della storia degli esperimenti di Miller e che motivazioni di tipo diverso da quelle strettamente scientifiche giocarono un

ruolo nella scelta delle ricerche da compiere. Motivazioni personali influirono non solo su tali scelte, ma anche sui processi di ricerca sull'analisi dei dati a disposizione. Questa fu una delle cause del perché diversi scienziati interpretarono gli stessi dati in modi opposti. La presenza di fattori inconsci nella ricerca scientifica non trova un adeguato posto nelle considerazioni epistemologiche, ma è spesso riconosciuto dagli stessi ricercatori, com'è rivelato dalle espressioni che Synge utilizza nella sua lettera a Shankland per spiegare l'atteggiamento di Miller:

The interesting thing is that your thoughts on the problem do not seem to depend on any new fact, and Miller might have had these same thoughts, had he wanted to. Apparently he was well aware of the importance of temperature gradients, and he could have explored their effect systematically. Is this a case where a subconscious will warped objective judgement? [...] I do not think that Miller understood the meaning of the theory of relativity; it would not be unnatural if subconsciously he tried to destroy what he could not grasp – I think that many of us are prone to this. Hence he rejected the obvious explanation of temperature, and substituted one in terms of motion through the ether, a concept meaningful to him and to the physicists of his generation.⁴⁶

⁴⁶ Synge a Shankland, 12 agosto 1954, per concessione del Prof. W. Fickinger.

Conclusioni

L'indagine storiografica proposta in questa tesi permette di mettere in relazione le storie dei due casi esposti nei precedenti capitoli, offrendoci la possibilità di estrapolare analogie e differenze tra essi nel quadro generale della ricezione delle teorie relativiste all'inizio del XX secolo.

Le differenze, a cui si è già parzialmente accennato nei Cap. 1 e 2, riguardano sia l'ambito scientifico che quello sociologico dipendente dalla nazionalità delle comunità accademiche in cui gli esperimenti furono eseguiti.

La principale differenza scientifica tra i due casi è che l'esperimento di Sagnac fu considerato riuscito e il suo risultato è pienamente accettato dalla comunità scientifica contemporanea, mentre l'esito degli esperimenti di Miller fu rigettato dalla comunità scientifica pochi anni dopo il suo annuncio.

La diversità succitata fa parte delle storie orizzontali dell'effetto Sagnac e delle ripetizioni dell'esperimento MM. Essa, però, subisce un certo ridimensionamento nell'indagine di storia verticale proposta nei precedenti capitoli. Ciò accade perché gli obiettivi teorici e interpretativi sia di Sagnac che di Miller non trovarono soddisfazione nell'accoglienza delle comunità scientifiche nazionali a loro contemporanee, indipendentemente dalla validità dei loro esperimenti.

Il contesto della ricezione della relatività, in cui questi esperimenti vennero inseriti dagli stessi loro autori, ci induce a individuare un'altra differenza nelle caratteristiche locali delle comunità scientifiche francese e statunitense, dall'inizio del XX secolo fino agli anni '30. Il fatto che le comunità nazionali fecero risaltare alcune loro peculiarità nella ricezione della relatività trova conferma nei casi qui studiati.

La comunità scientifica francese sembrava, in quel periodo, compatta, molto nazionalista e ancorata ad una struttura accademica che non permetteva l'affermarsi di un pensiero nuovo, il che portò, nel caso specifico, ad una difesa dell'etere di Fresnel condivisa da una buona parte degli scienziati francesi.

La comunità scientifica statunitense appariva, nella ricezione degli esperimenti di Miller, immatura, bisognosa di un appoggio da parte dei più esperti teorici europei e molto

differenziata al suo interno. Il fatto che la comunità scientifica statunitense stesse rapidamente crescendo ed evolvendo, implicò una certa confusione teorica rispetto alla relazione tra le teorie della relatività e gli esperimenti di Miller. Questo disorientamento continuò fino agli anni '30, fino a quando, cioè, le personalità di spicco che avevano una dimestichezza maggiore con le nuove teorie fisiche non decretarono l'irrelevanza dei risultati di Miller.

La differenza tra le reazioni delle rispettive comunità scientifiche ai due esperimenti, non dipese solo dalle peculiarità di questi, ma dall'atteggiamento sociologico.

La comunità scientifica statunitense si mostrò molto più variegata e conflittuale. Il passaggio dalla fisica classica a quella relativista avvenne con il coinvolgimento di molti esponenti di tale comunità che diedero il loro apporto al nuovo programma di ricerca, in particolare alle possibili trasformazioni delle teorie della relatività per rendere conto delle osservazioni di Miller.

In Francia, invece, il solo Langevin si occupò, nell'immediato, dell'effetto Sagnac e la sua risposta congelò il dibattito, senza che altri avessero modo di utilizzare il nuovo linguaggio matematico utilizzato dalla teoria della relatività generale.

Il nazionalismo della comunità scientifica francese rende evidente anche un'altra differenza tra i due casi qui trattati. Nella storia dell'effetto Sagnac, infatti, l'anti-germanesimo della comunità scientifica francese, acuitosi durante la Prima Guerra Mondiale, giocò un ruolo rilevante. Anche se gli USA entrarono in guerra contro la Germania nel 1917, nella storia degli esperimenti di Miller e della reazione degli scienziati statunitensi alla teoria della relatività generale non si trova nessun elemento imputabile al fatto che Einstein lavorasse in Germania.

Un'altra differenza che queste storie mostrano è legata alla tipologia dell'etere che Sagnac e Miller difendono. Sagnac è esplicito nel suo obiettivo di dimostrare l'esistenza dell'etere di Fresnel, data la sua importanza nell'ambiente scientifico francese e nonostante questo fosse in contraddizione con alcune caratteristiche della sua scoperta. Miller, invece, si affida ad un concetto di etere meno preciso. Per Miller è indifferente la modalità con cui questo etere si relazioni al moto terrestre, perché interessato soprattutto alla necessità che esso esista, indipendentemente dalla sua forma.

Esemplificativo di questa differenza è l'atteggiamento dei due scienziati verso la teoria di Lorentz. Sagnac la critica e l'osteggia fin dall'inizio del suo lavoro sulla teoria ottica, non la

condivide nel suo approccio epistemologico al mondo fisico e la mette spesso sullo stesso piano delle teorie di Einstein. Al contrario, Miller la considera totalmente diversa dalla nuova relatività, in modo particolare, perché Lorentz conserva l'esistenza dell'etere.

La differenza con cui Sagnac e Miller consideravano la teoria di Lorentz deriva, soprattutto, dal fatto che il primo stava sviluppando una propria teoria ottica che spiegasse i risultati dei vari esperimenti sul vento d'etere, antagonista delle contemporanee teorie di Einstein e Lorentz, mentre il secondo era uno sperimentatore che cercò, soprattutto, di difendere la validità del proprio risultato sperimentale. Sagnac, quindi, fu rigettato nel suo lato teorico, mentre il suo esperimento fu ritenuto corretto. Al contrario, Miller vide criticata la sua abilità sperimentale.

Tutte le differenze sopra riportate ci conducono, però, ad evidenziare la principale analogia nei due casi storici: entrambi gli esperimenti erano considerati dai propri autori una confutazione dei principi delle teorie della relatività, cosa che venne rifiutata in tempi e modalità simili dalle rispettive comunità scientifiche nazionali.

Sagnac compì l'esperimento nel 1913, senza avere come principale scopo la confutazione della teoria della relatività ristretta, ma la dimostrazione dell'esistenza dell'etere di Fresnel. L'effetto Sagnac, perciò, acquistò una valenza anti-relativista solo dopo la conferma da parte di Eddington della deflessione dei raggi di luce in prossimità del Sole, così come prevista da Einstein. La stessa cosa avvenne per le ripetizioni dell'esperimento MM.

Questo fatto ci induce a considerare rilevante la valenza, nella storia della fisica del XX secolo, della pubblicità giornalistica nella decisione sulle ricerche scientifiche da compiere. Sia Sagnac che Miller furono condotti a contrastare la relatività solo dopo la campagna stampa che aveva reso Einstein immediatamente famoso. È impossibile non ritenere che ci sia stato un rapporto di causa ed effetto tra questi avvenimenti, e che la stampa non abbia contribuito a rendere invisibile il nome di Einstein presso alcuni ambienti scientifici, come mostrano anche le parole degli stessi autori dei due esperimenti.

Un altro dato rilevante della storia qui studiata è che il comportamento della maggior parte dei componenti della comunità scientifica, i quali rigettarono le argomentazioni anti-relativistiche legate ai due esperimenti, abbia creato un forte contrasto che ha portato gli anti-relativisti fuori dalla nuova comunità accademica. Ciò induce a richiamare la tesi di Kuhn che ci sia stato un passaggio di paradigma rivoluzionario tra la fisica classica e la

fisica relativistica e che coloro i quali non hanno accettato il nuovo paradigma, dopo che il vecchio era stato definitivamente soppiantato, abbiano cessato *de facto* di essere scienziati. Seppur riconoscendo l'eccessiva forzatura dell'affermazione di Kuhn, pare evidente il fatto che lo sviluppo e l'accettazione delle teorie di Einstein abbiano creato due fazioni contrapposte e fra loro inconciliabili, in cui quella relativista andava ampliandosi gradualmente riducendo l'altra ad un nucleo esiguo di scienziati.

Questa estremizzazione del conflitto scientifico è evidente in entrambi i casi anche se Sagnac espresse in maniera pubblica e decisa il suo attacco ad Einstein nel 1922 (vedi par. 4.6.5.), mentre Miller preferì, più giudiziosamente, abbandonare il lavoro sugli esperimenti di *ether-drift* anche se continuò a sperare nella caduta della relatività (vedi par. 6.2).

È altresì chiaro, dalle storie che abbiamo trattato nei precedenti capitoli, che la reazione alla relatività dipese anche da un'opposizione alla figura di Albert Einstein e al suo essere di origine ebraica. Non ci sono, purtroppo, fonti per poter affermare quanto le idee pubbliche e l'ebraicità di Einstein abbiano influito nella reazione di Sagnac e Miller, ma è, comunque, evidente che Sagnac fosse legato a Daniel Berthelot, il quale espresse pubblicamente il suo pensiero verso la teoria "*israélite*" di Einstein, e che Miller mostrava una particolare necessità di contrastare la teoria di Einstein, al contrario di quella di Lorentz (vedi par. 4.6.4 e par. 5.6).

È possibile che il francese avesse un'acredine maggiore dovuta ad una serie di caratteristiche della comunità scientifica francese, e che Miller tentasse di difendere la sua abilità sperimentale. Nel fare questo, però, si legò effettivamente a una "*crowd of lesser men*" che mostravano un rapporto astioso verso le teorie della relatività e, soprattutto, verso il loro creatore (vedi par. 6.5).

Le evidenze storiche correlate ai due casi mostrano anche che la diffusione e l'accettazione delle teorie della relatività, almeno nelle comunità accademiche prese in considerazione, fu parallela ad una progressiva internazionalizzazione della scienza e che la figura di Einstein contribuì a tale internazionalizzazione con i suoi viaggi e le sue posizioni pubbliche. Fu facile per alcuni, perciò, legare la critica alla relatività all'astio verso il suo creatore che espresse pubblicamente la sua posizione pacifista e internazionalista.

L'ultimo elemento di analogia tra i due casi storici riguarda il ruolo dell'autorità nelle comunità scientifiche. Alcuni eventi, in particolare, sembrano fortemente dovuti alla rilevanza, o meno, di uno scienziato all'interno di una comunità scientifica, soprattutto con

la progressiva specializzazione della ricerca scientifica nel XX secolo. Il ruolo di Michelson, in particolare, ebbe enorme rilevanza negli USA a favore della relatività, nonostante negli ultimi anni della sua vita egli non fosse così interessato al problema sperimentale dell'*ether-drift*.

Approfondendo, poi, la storia dei singoli scienziati, quali Sagnac, Berthelot, Miller, Shankland, Hale, Adams, Michelson, Gale etc., si rendono evidenti motivazioni e atteggiamenti non sempre razionali che ebbero una certa rilevanza nella storia delle vicende scientifiche.

La mia ricerca mostra, quindi, che nella scienza assumono rilevanza anche specifici argomenti sociologici e personali, i quali non hanno ancora trovato adeguato spazio nelle trattazioni orizzontali di particolari temi. Tali argomenti risultano, a volte, fondamentali per analizzare eventi storici che spesso risultano mal interpretati perché visti con una lente d'ingrandimento costruita su teorie o visioni precostituite.

Pur riconoscendo la difficoltà di rendere conto di così tanti elementi nella storia della fisica o della scienza, tale modalità di analisi mostra, innanzitutto, che gli studi nati in ambiente anti-relativista costruiscono una storia tendenziosa, ma che evidenziano elementi storici reali, anche se mal interpretati. La storiografia "standard", al contrario, ha tentato di eliminare tutto ciò che sembrava contraddittorio con uno svolgersi lineare delle vicende.

Una storia lineare è, però, inesatta e, a volte, pericolosa, perché permette una critica giustificata sulla base di documenti storici, anche se subordinata a motivazioni scientifiche spesso estreme, come quelle degli anti-relativisti. In tale ambito, per esempio, l'esperimento di Michelson-Gale viene descritto nella sua valenza anti-relativista, senza considerare, invece, la sua importanza storica in favore della teoria della relatività generale, proprio in contrasto con gli esperimenti di Miller.

La conclusione teorica di tali vicende storiche è così riassumibile: negli anni '20 e '30 la relatività non aveva nessun programma di ricerca alternativo in grado né di spiegare gli stessi fatti né di avere la stessa forza euristica. Anzi, i due esperimenti spesso citati dalla letteratura anti-relativista, che in questa sede si sono analizzati, sono spiegabili con due eteri di diverso tipo e tale ragionamento ha fatto sì che questi fossero ritenuti antagonisti.

Conclusione di questa tesi è, perciò, che l'accettazione delle teorie della relatività, nel suo andamento complessivo, sia stata giustificata da argomenti di plausibilità che stavano convincendo la maggior parte degli scienziati. Tale conclusione non vuole, però, nascondere

che ci furono anche atteggiamenti irrazionali, da parte degli scienziati studiati, che in questa sede si è cercato di mettere in luce.

Questo porta a rispondere a una delle domande contenute nell'introduzione sulla possibilità di affrontare una ricerca storica del genere senza entrare a far parte del dibattito teorico contemporaneo. La risposta è negativa: indipendentemente dalle critiche storiografiche, è impossibile non avanzare giudizi scientifici, o almeno metodologici, su quanto avvenuto onde evitare all'interno del testo una loro presenza ambigua e latente..

Mi pare giusto evidenziare, quindi, che, a partire dall'indagine storica condotta, sono giunto alla convinzione che l'atteggiamento metodologico a favore della relatività sia stato razionale. L'esperimento di Miller, inoltre, fu ripetuto, con risultato negativo, mostrando la capacità della comunità scientifica dell'epoca di rispondere alle problematiche nascenti in modo non dogmatico.

Rispetto alla storiografia implicita descritta dai diversi filosofi della scienza citati nel par. 2.2, possiamo, perciò, rigettare le descrizioni di Polanyi e Feyerabend tese a mostrare elementi irrazionali nel comportamento della comunità scientifica, perché queste sembrano essere valide solo per una parte di essa, ma non per l'atteggiamento generale mostrato nei confronti degli esperimenti di Miller. Anche l'immagine di Popper, che diede valore alle ripetizioni degli esperimenti MM con risultato nullo, non risulta accettabile perché, come si è visto, fu la teoria di Miller di trascinamento dell'etere da parte dei muri a non essere ritenuta plausibile.

Più vicina ad una descrizione storica degli avvenimenti, per come sono stati esposti nella presente tesi, sembra essere l'analisi di Lakatos che bene affronta l'inesistenza dell'*experimentum crucis* nella storia della fisica. Anche in questo caso, però, delle delucidazioni sono necessarie: il comportamento sociologico della comunità scientifica statunitense dipese dal fatto che l'esperimento MMX era considerato la base sperimentale della teoria della relatività ristretta. Tale atteggiamento fu, poi, tra le più probabili motivazioni dell'importanza che ricevette il risultato di Miller, insieme con la stima di cui questi godeva presso la medesima comunità scientifica.

La storia verticale dei casi dell'effetto Sagnac e degli esperimenti di Miller, seppur interessante da un punto di vista sociologico e metodologico, ha ricevuto così tanta enfasi nella letteratura anti-relativista che la presente tesi non può che proporre un ridimensionamento della problematica fisica da questi creata.

Sembrerebbe che motivazioni personali e caratteristiche sociologiche della comunità scientifica abbiano avuto un peso più nel creare un problema, che appare fittizio, per le teorie della relatività che nel trovare una soluzione, nella quale pare siano stati usati criteri e atteggiamenti più propriamente scientifici. I due casi, infatti, non furono né accantonati né mai interpretati all'interno del programma di ricerca relativista, tanto che lo stesso Sir O. Lodge, un difensore del concetto di etere, non ritenne mai di far menzione di essi nel suo contrasto teorico ed epistemologico con le teorie della relatività.

In conclusione, l'accusa di dogmatismo verso la comunità scientifica nella suo giudizio storico a favore della relatività nel dibattito su tali esperimenti non trova conferme nell'analisi qui realizzata, anche se rimane evidente l'estrema importanza della parola dell'autorità scientifica nella decisione delle controversie.

Bibliografia

Airy, G. B.

1871. "On a supposed alteration in the amount of Astronomical Aberration of Light, produced by the passage of the Light through a considerable thickness of Refracting Medium", *Proceedings of the Royal Society of London*, (Nov. 1871): 35-39.

Anandan, J.

1977. "Gravitational and rotational effects in quantum interference", *Physical Review D*, 15 (1977): 1448-1457.

1981. "Sagnac Effect in relativistic and nonrelativistic physics", *Physical Review D*, 24 (1981): 338-346.

Anderson, R., Bilger, H.R. e Stedman, G.E.

1994. "Sagnac Effect: A century of Earth-rotated interferometers", *American Journal of Physics*, 62 (1994): 975-985.

Arago, F.

1810. "Mémoire sur la vitesse de la lumière, lu à la première classe de l'Institut, le 10 décembre 1810", *Comptes Rendus* 36 (1853): 38-49.

Ashby, N.

2002. "Relativity and Global Positioning System" *Physics Today*, (Mag. 2002): 41-47.

Beer, A.

1855. "Über die Vorstellungen vom Verhalten des Aethers in bewegten Mitteln", *Annalen der Physik*, 4 (1855): 428-434.

Beller, M., Cohen, R. S., e Renn, J. (eds.)

1993. *Einstein in context* (Cambridge: Cambridge University Press, 1993).

Bergia, S.

1978. *Einstein e la Relatività* (Roma/Bari: Laterza, 1978).

Bergia, S., e Guidone, M.

1998. "Time on a rotating platform and the one-way speed of light", *Foundations of Physics Letters*, 11 (1998): 549-559.

Berthelot D. et al.

1919. "Prix Pierson-Perrin", *Comptes Rendus*, 169 (1919): 1227-1232.

Berthelot, D.

1922. *La Physique et la Métaphysique des Théories d'Einstein* (Paris: Payot & Cie, 1922).

Biezunski M.

1981. "La Diffusion de la Théorie de la Relativité en France" (Ph.D. Thesis, Université de Paris VII, 1981).

1987. "Einstein's Reception in Paris in 1922", in Glick (ed.) (1987): 169-187.

1991. *Einstein à Paris. Le Temps n'est plus...* (Saint Denis, Presse Universitaires de Vincennes, 1991).

Bolella, V.

1998. "L'introduction de la Relativité en France, 1905-1922" (Ph.D. Thesis, Université de Nancy 2, 1998).

Borel, E.

1923. *L'espace et le temps* (Paris: Libraire Felix Alcan, 1923).

Bork A. M.

1966. "The "Fitzgerald Contraction", *Isis*, 57 (1966): 199-207.

Boyer, C. B.

1941. "Early Estimates of the Velocity of Light", *Isis*, 33 (1941): 24-40.

Brace, D. B.

1904a. "On Double Refraction in Matter moving through the Aether", *Philosophical Magazine Series 6, 7* (1904): 317-329. Trovato on-line (15 settembre 2009) in

http://en.wikisource.org/wiki/On_Double_Refraction_in_Matter_moving_through_the_Aether

1904b. “The Ether and moving Matter”, *Congress of arts and science, universal exposition, St. Louis 1904*, 4 (1906): 105-117. Lezione tenutasi il 23 settembre 1904.

Bradley, J.

1729. “Account of a new discovered motion of the Fix’d Stars”, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 35 (1729): 637-661.

Brian, D.

1996. *Einstein: A Life* (New York: John Wiley and Sons, 1996).

Brown L. M., Pais A. e Sir Pippard B. (eds.)

1995. *Twentieth Century Physics* (Bath: IOP and AIP Press, 1995).

Brown, R. G. W. e Pike, E. R.

1995. “A History of Optical and Optoelectronic Physics in the Twentieth Century”, in Brown, L. M., Pais, A., e Pippard, B. (eds.) *Twentieth Century Physics Volume III* (Bath: IOP and AIP Press, 1995): 1385-1504.

Brown, H. R.

2001. “The origins of length contraction: I. The Fitzgerald-Lorentz deformation hypothesis”, *American Journal of Physics*, 69 (2001): 1044-1054.

Brush, S. G.

1967. “Note on the History of the Fitzgerald-Lorentz Contraction”, *Isis*, 58 (1967): 230-232.

1971. “The wave theory of heat: a forgotten stage in the transition from the caloric theory to thermodynamics”, *British Journal for the History of Science*, 5 (1971): 148-153.

1999. “Why was Relativity Accepted?”, *Physics in Perspective*, 1 (1999): 184-214.

Buchwald, J. Z.

1988. “The Michelson Experiment in the Light of Electromagnetic Theory Before 1900”, in Goldberg, S. e Stuewer, R. H. (eds.) *The Michelson Era in American Science 1870–1930, Cleveland, OH 1987* (New York: American Institute of Physics, 1988): 55–70.

1985. *From Maxwell to Microphysics* (Chicago: Chicago University Press, 1985).

- 1989a. *The Rise of the Wave Theory of Light: Optical Theory and Experiment in the Early Nineteenth Century* (Chicago: The University of Chicago Press, 1989).
- 1989b. “The battle between Arago and Biot over Fresnel”, *Nouvelle Revue d'Optique*, 20 (1989): 109-17.
- Buchwald, D. K., Rosenkranz, Z., Sauer, T., Illy, J., e Holmes, V. I. (eds.)
2009. *The Collected Papers of Albert Einstein* edited vol. 12 (Princeton/Oxford: Princeton University Press, 2009).
- Builder, G.
1958. “Ether and Relativity”, *Australian Journal of Physics*, 11 (1958): 258-297.
- Cahill, R. T.
2005. “The Michelson and Morley 1887 Experiment and the Discovery of Absolute Motion”, *Progress In Physics*, 3 (2005): 25-29
- Cantor, G. N.
1970a. “Thomas Young’s Lectures at the Royal Institution”, *Notes and Record of the Royal Society of London*, 25 (1970): 87-112.
1970b. “The Changing Role of Young’s Ether”, *The British Journal of the History of Science*, 5 (1970): 44-62.
- Cantor, G. N. e Hodge, M. J. S. (eds.)
1981. *Conceptions of ether: Studies in the history of ether theories 1740-1900* (Cambridge: Cambridge University Press, 1981).
- Carmichael, R. et al.
1927. *A Debate on the Theory of Relativity* (Chicago/London: Open Court, 1927).
- Carvalho, M. E.
1921. “L’électromagnétisme et le principe de relativité”, *Comptes Rendus*, 173, (1921): 1155-1157.
1922. “Le principe de relativité dans les diélectriques”, *Comptes Rendus*, 174 (1922): 106-109.

Cedarholm, J. P., e Townes, C. H.

1959. "A New Experimental test of Special Relativity", *Nature*, 184 (1959): 1350-51.

Chappel Jr., J. E.

1965. "Georges Sagnac and the Discovery of the Ether", *Archives Internationales d'Histories des Sciences*, 18 (1965): 175-190.

Chow W. W., Gea-Banacloche J., Pedrotti L. M., Sanders V. E., Schleich W. M., e Scully O.

1985. "The ring laser gyro", *Reviews of Modern Physics*, 57 (1985): 61-104.

Clark, R. W.

1973. *Einstein, the Life and Times* (London/Sydney/Auckland/Toronto: Hodder and Stoughton, 1973); trad. italiana in Clark, R. W., *Einstein, la vita pubblica e privata del più grande scienziato del nostro tempo* (Milano: Rizzoli Editore, 1976).

Cohen, I. B.

1940. "Roemer and the first determination of the velocity of light (1676)", *Isis*, 31 (1940): 327-90.

Corps, C. F.

1927. "Une explication nouvelle du résultat négatif de l'expérience de Michelson et Morley", *Comptes Rendus*, 184 (1927): 1231-1233.

1930. "Sur l'interprétation des expériences de Sagnac et de Michelson", *Comptes Rendus*, 190 (1930): 623-625.

1933. *L'expérience de Sagnac contre le Théories Relativistes* (Paris: Libraire d'Action Francaise, 1933).

Crelinsten, J.

2006. *Einstein's Jury: The Race to Test Relativity* (Princeton and Oxford: Princeton University Press, 2006).

Cunningham E.

1914. *The Principle of Relativity* (Cambridge: University Press, 1914).

Danto, A., e Morgenbesser, S. (eds.)

1960. *Philosophy of Science* (New York: Meridian Books, 1960).

Darrigol, O.

1993. “The electrodynamics of Moving Bodies from Faraday to Hertz”, *Centaurus*, 36 (1993): 245-360.

1994. “The electron theories of Larmor and Lorentz: A comparative study”, *Historical Studies in Physical and Biological Sciences*, 24 (1994): 265-336.

2000. *Electrodynamics from Ampère to Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 2000).

2004. “The Mystery of Einstein-Poincaré Connection”, *Isis*, 95 (2004): 614-626.

2005. “The Genesis of the Theory of Relativity”, *Séminaire Poincaré*, 1 (2005): 57-78.

Darwin, C. G.

1939. “Logic and Probability in Physics”, *Philosophy of Science*, 6 (1939): 48-64.

De Broglie, L.

1947. *Note sur la vie et l'œuvre de Paul Langevin* (Paris: Gauthier-Villars, 1947).

DeMeo, J.

2001. “Dayton Miller’s Ether-Drift Experiments: A Fresh Look”, *Infinite Energy Magazine*, 38 (2001): 72-81. Anche in www.orgonelab.org/miller.htm; Visionato il 7.07.2010.

Dieks, D., e Nienhuis, G.

1989. “Relativistic aspects of nonrelativistic quantum mechanics”, *American Journal of Physics*, 59 (1989): 650-655.

Dieks, D.

1991. “Time in special relativity and its philosophical significance”, *European Journal of Physics*, 12 (1991): 253-259.

Dirac, P.

1951. “Is There an Aether?”, *Nature*, 168 (1951): 906-7.

Ditchburn, R. W., e Heavens, O. S.

1952. “Relativistic Theory of a Rigid Body: Letter to the Editor”, *Nature*, 170 (1952): 705.

Dresden, M., e Yang, C. N.

1979. “Phase shift in a rotating neutron or optical interferometer”, *Physical Review D*, 20, (1979): 1846-1848.

Dufour, A., e Prunier, F.

1937. “Sur l’observation du phénomène de Sagnac avec une source éclairante non entraînée”, *Comptes Rendus*, 204, (1937): 1322-1324.

1952. “Sur un déplacement de franges enregistré sur une plate-forme en rotation uniforme”, *Journal de Physique et le Radium*, 3 (1952): 153-161.

Earman, J., Glymour, C., e Rynasiewicz, R.

1982. “On Writing the History of Special Relativity”, *Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, Volume 1982/2: Symposia and Invited Papers* (Chicago: University of Chicago Press, 1982): 403-416.

Eddington, A. S., Dyson, F. W., e Davidson, C.

1920. “A Determination of the Deflection of Light by the Sun’s Gravitational Field, from Observations made at the Total Eclipse of May 29, 1919”, *Philosophical Transactions of Royal Society of London Series A*, 220 (1920): 291-333.

Eddington, A. S.

1920. *Space, Time and Gravitation* (Cambridge: Cambridge University Press, 1920).

1925. “Ether-drift and the Relativity Theory”, *Nature*, 115 (1925): 870.

Einstein, A.

1905. “Zur Elektrodynamik bewegter Körper”, *Annalen der Physik*, 17 (1905): 891-921; versione utilizzata trad. it. “Sull’elettrodinamica dei corpi in movimento” in Stachel, J. (ed.) *L’anno Memorabile di Einstein* (Bari: Edizioni Dedalo, 2001): 133-69.

1907. “Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogene Folgerungen” *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 4 (1907): 411-62. Versione utilizzata trad. ing. “On the Relativity Principle and the Conclusions Drawn from it” in Stachel, J., Cassidy, D. C., Renn, J. e

Shulmann, R., (eds.) *The Collected Papers of Albert Einstein: Vol. 2, The Swiss Years: Writings, 1900-1909, English Translation* (Princeton: Princeton University Press, 1989): 252-311.

1911. “Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes”, *Annalen der Physik*, 35(10): 898-908, versione utilizzata trad. inglese “On the Influence of Gravitation on the Propagation of Light” in Klein, M. J., Kox, A. J., Renn, J. e Shulmann, R., (eds.) *The Collected Papers of Albert Einstein: Vol. 3, The Swiss Years: Writings, 1909-1911, English Translation* (Princeton: Princeton University Press, 1993): 379-387.

1914a. “Bemerkungen zu P. Harzers Abhandlung “Über die Mitführung des Lichtes in Glas und die Aberration”, *Astronomische Nachrichten*, 199 (1914): 7-10.

1914b. “Antwort auf eine Replik Paul Harzers (Nr.4753, S. 10 und 11)”, *Astronomische Nachrichten*, 199 (1914): 47-48.

1916. “Die Grundlagen des allgemeinen Relativitätstheorie”, *Annalen der Physik*, 49 (1916): 769-822.

1989. *Ouvres Choises t. 4-Correspondances Francais Letters Choises et presentées par Michel Biezunski* (Paris: Editions du SEUIL-Editions du CNRS, 1989).

Einstein, A., e Besso, M.

1979. *Correspondance 1903-1955* (Paris: Hermann, 1979).

Einstein, A., Born, H.e M.

1969. *Briefwechsel 1916-1955* (München: Nymphenburger GmbH., 1969), versione utilizzata trad. it. *Scienza e Vita: lettere 1916-1955* (Torino, Einaudi, 1973).

Elzinga, A.

2006. *Einstein's Nobel Prize: A Glimpse Behind Closed Doors: The Archival Evidence* (Sagamore Beach: Science History Publications, 2006).

Fabré, L.

1921. *Les Théories d'Einstein - Une Nouvelle Figure du Monde* (Paris: Payot & Cie, 1921).

Faye, H. A.

1859. “Sur les expériences de M. Fizeau considérées au point de vue du mouvement de translation su système solaire”, *Comptes Rendus*, 49 (1859): 870-875.

Feyerabend, P.

1975. *Against Method: Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge* (1st ed.: London: New Left Books, 1975) citazioni dalla traduzione italiana della prima edizione in *Contro il metodo: Abbozzo di una Teoria anarchica della conoscenza* (3rd ed. Milano: Feltrinelli, 2005).

1988. *Against Method: Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge* (revised ed., New York: Verso, 1988) citazioni da (3rd ed. New York: Verso, 1993).

Fickinger, W.

2005. *Physics at a Research University: Case Western Reserve 1830-1990* (Cleveland, 2005).

Fitzgerald, G. F.

1889. "The Ether and the Earth's Atmosphere", *Science*, 13 (1889): 390.

Fizeau, A. H. L.

1851. "Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur", *Comptes Rendus*, 33 (1851): 349-355.

1859. "Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur", *Annales de Chimie et de Physique*, 57 (1859): 385-404.

1860a. "Sur une Méthode propre à Rechercher si l'Azimut de Polarisation du Rayon Réfracté est Influencé par le Mouvement du Corps Réfringent – Essai de cette Méthode", *Annales de Chimie et de Physique*, 58 (1860): 129-63.

1860b. "On the effect of the Motion of a Body upon the Velocity with which it is traversed by Light", *Philosophical Magazine*, 19 (1860): 245-260.

Fletcher, H.

1943. "Biographical Memoir of Dayton Clarence Miller 1866-1941", *National Academy of Sciences of the USA Biographical Memories*, 23 (1943): 61-71.

Fölsing A.

1993. *Albert Einstein: Eine Biographie* (Frankfurt: Verlag, 1993); versione utilizzata trad. ing. *Albert Einstein: A Biography* (New York: Penguin, 1997).

Forder, P. W.

1984. "Ring Gyroscopes: An Application of Adiabatic Invariance", *Journal of Physics A*, 61 (1984): 1343-1355.

Fox, R.

1974. "The Rise and Fall of Laplacian Physics", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 4 (1974): 89-136.

Frank, P.

1949. *Einstein: Sein Leben und seine Zeit* (Munich: Paul List, 1949), versione utilizzata traduzione italiana in *Einstein: La sua Vita e il suo Tempo* (Milano: Garzanti, 1949).

Frankel, E.

1976. "Corpuscular Optics and the Wave Theory of Light: The Science and Politics of a Revolution in Physics", *Social Studies in Science*, 6 (1976): 141-184.

Fresnel, A. J.

1818. "Sur l'influence du mouvement terrestre dans quelques phénomènes d'optique", *Annales de Chimie et de Physique*, 9 (1818): 57-66.

Gale, H. G.

1931. "Albert Michelson", *Astrophysical Journal*, 74 (1931): 1-9.

Galison, P.

1987. *How Experiments End* (Chicago: University of Chicago Press, 1987).

2004. *Einstein's Clocks, Poincaré's Maps, Empires of Time* (New York/London: Norton Company, 2003).

Gardner, G. H. F.

1952. "Rigid-Body Motions in Special Relativity", *Nature*, 170 (1952): 243.

Gheury de Bray, M. E. J.

1936. "The Velocity of Light", *Isis*, 25 (1936): 437-448.

Giannetto, E.

1995. "The Rise of Special Relativity: Poincaré Works Before Einstein", in *Atti del XVIII Congresso Nazionale di Storia della Fisica e dell'Astronomia* (a cura di P. Tucci), (Milano: Università degli studi di Milano, 1999): 181-216.

Giorgi, G.

1925. "Ether Drift and Relativity", *Nature*, 116 (1925): 132

Glick, T. F.

1988. *Einstein in Spain: Relativity and the Recovery of Science* (Princeton: Princeton University Press, 1988).

Glick, T. F. (ed.)

1987. *The Comparative Reception of Relativity - Boston Studies in the Philosophies of Science*, Vol. 103 (Dordrecht: Reidel, 1987).

Goenner, H.

1993a. "The Reaction to Relativity Theory I: The Anti-Einstein Campaign in Germany in 1920" in Beller, M., Cohen R. S., e Renn, J.(eds.) *Einstein in Context* (Cambridge: Cambridge University Press, 1993): 107-133.

1993b. "The Reaction to Relativity Theory in Germany III: Hundred Authors Against Einstein" in Earman, J., Janssen, M., e Norton, J. D. (eds.) *Einstein Studies, vol. 5: The Attraction of Gravitation* - (Boston: Birkhäuser, 1993): 248-273.

Goldberg, S.

1984. *Understanding Relativity: Origins and Impact of a Scientific Revolution* (Oxford: Clarendon Press, 1984).

Gordon, W.

1923. "Zur Lichtfortpflanzung nach der Relativitätstheorie", *Annalen der Physik*, 72 (1923): 421-455.

Grünbaum, A.

1959. "The Falsifiability of the Lorentz-Fitzgerald Contraction Hypothesis", *The British Journal*

for the Philosophy of Science, 10 (1959): 48-50.

1960. "Logical and Philosophical Foundations of the Special Theory of Relativity", in Danto e Morgenbesser (eds.) (1960): 399-434.

1963. *Philosophical Problems of Space and Time* (New York: Knopf, 1963).

Guerra, V., e De Abreu, R.,

2007. "Comments on 'From Classical to modern ether-drift experiments: the narrow window for a preferred frame'", *Physics Letters A*, 361 (2007): 509-512,

Hanson, N. R.

1962. "The Irrelevance of History of Science to Philosophy of Science", *The Journal of Philosophy*, 59 (1962): 574-586.

Harman, P. (ed.)

1995. *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell Vol. 2 1862-1873* (Cambridge: Cambridge University Press, 1995).

2002. *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell Vol. 3 1874-1879* (Cambridge: Cambridge University Press, 2002).

Harress, F.

1911. "Die Geschwindigkeit des Lichtes in bewegten Körpern" (Ph. D. Thesis: Jena, 1911).

Harzer, P.

1914a. "Über die Mitführung des Lichtes in Glas und die Aberration", *Astronomische Nachrichten*, 198 (1914): 378-392.

1914b. "Bemerkungen zu meinem Artikel in Nr.4748 im Zusammenhange mit den vorstehenden Bemerkungen des Herrn Einstein", *Astronomische Nachrichten*, 199 (1914): 9-12.

Hasselbach, F., e Nicklaus, M.

1993. "Sagnac experiment with electrons: Observation of the rotational phase shift of electron waves in vacuum", *Physical Review A*, 48 (1993): 143-150.

Heaviside, O.

1891-92. "On the Forces, Stresses, and Fluxes of Energy in the Electromagnetic Field",

Philosophical Transactions of Royal Society, A 123 (1892): 423-480.

Heer, C. V.

1964. "Resonant Frequencies of an Electromagnetic Cavity in an Accelerated System of Reference", *Physical Review*, 134, (1964): 799-804.

1984. "History of the Laser Gyro" *Proceedings of SPIE*, 487 (1984), pp. 2-12.

Hentschel, K.

1992. "Einstein's Attitude Towards Experiments: Testing Relativity Theory 1907-1927", *Studies on History and Philosophy of Science*, 23 (1992): 593-624.

1993. "The Conversion of St. John: A Case Study on the Interplay of Theory and Experiment", *Science in Context*, 6 (1993): 137-194.

Hentschel, K. (ed.)

1996. *Physics and National Socialism: An Anthology of Primary Sources* (Basel/Boston/Berlin: Birkäuser Verlag, 1996).

Hertz, H. R.

1890a. "Über die Gleichungen der Elektrodynamik für ruhende Körper", *Annalen der Physik*, 40 (1890): 577-624.

1890b. "Über die Grundgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper", *Annalen der Physik*, 41 (1890): 369-99.

Hicks, W. M.

1902. "On the Michelson-Morley Experiment Relating to the Drift of Ether", *Philosophical Magazine*, 3 (1902): 9-36.

Hirosige, T.

1966. "Electrodynamics Before the Theory of Relativity", *Japanese Studies in the History of Science*, 5 (1966): 1-49.

1976. "The Ether Problem, the Mechanistic Worldview, and the Origins of the Theory of Relativity", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 7 (1976): 3-82.

Hoek, M.

1868. “Détermination de la vitesse avec laquelle est entraînée une onde lumineuse traversant un milieu en mouvement”, *Archives néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles*, 3 (1868): 180-185.

Holton, G.

1969. “Einstein, Michelson and the ‘crucial’ experiment”, *Isis*, 60 (1969): 133-197.

1973. *Thematic Origins of Scientific Thought. Kepler to Einstein* (Cambridge (Mass.): Harvard University Press, 1973).

Houllevigue, I.

1914. “Revue d’Optique”, *Revue générale des Sciences*, 25 (1914): 440-446.

Howard, D., e Stachel, J. (eds.)

1989. *Einstein Studies, vol. 1: Einstein and the History of General Relativity* (Boston: Birkhauser, 1989).

Huggins, W.

1868. “Further Observations on the Spectra of Some Stars and Nebulae, with an Attempt to Determine therefrom whether these Bodies are Moving Towards or From the Earth, also Observations of the Spectra of the Sun and of Comet II, 1868”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 158 (1868): 529-564.

Hunt, B. J.

1988. “The Origins of the Fitzgerald Contraction”, *British Journal for the History of Science*, 21 (1988): 67-76.

Illingworth, K. K.

1927. “A Repetition of the Michelson-Morley Experiment Using Kennedy’s Refinement”, *Physical Review*, 30 (1927): 692-696.

Illy, J.

2006. *Albert Meets America: How Journalists Treated Genius during Einstein’s 1921 Travels* (Baltimore, Johns Hopkins University Press, 2006).

Isaacson, W.

2007. *Einstein: His Life and His Universe* (New York: Simon & Shuster, 2007).

Ives, H. E.

1938. "Light Signals Sent Around a Closet Path", *Journal Of Optical Society Of America*, 28 (1938): 296-299.

Jaffe, B.

1960. *Michelson and the Speed of Light* (New York: Doubleday, 1960).

Janssen, M.

1995. "A Comparison between Lorentz's Ether Theory and Special Relativity in the Light of the experiments of Trouton and Noble" (Ph.D. thesis, Pittsburgh, 1995).

Janssen, M., e Stachel, J.

2004. "The Optics and the Electrodynamics of Moving Bodies", *Max Planck Institut für Wissenschaftsgeschichte Preprint 265* (2004): 1-36.

Jaseja, T. S., Javan, A., Murray, J., e Townes, C. H.,

1964. "Test of Special Relativity or of the Isotropy of Space by Use of Infrared Masers", *Physical Review*, 133 (1964): A1221.

Jenkins, F. A., e White, H. E.

1905. *Fundamentals of Optics* (2nd ed., New York/Toronto/London: McGraw-Hill, 1950).

Joos, G.

1930. "Die Jenaer Wiederholung des Michelsonversuchs", *Annalen der Physik*, 7 (1930), 385-407.

1934. "Note on the Repetition of the Michelson-Morley Experiment", *Nature*, 45 (1934): 114.

Kahan, T.

1959. "Sur les origines de la théorie de la relativité restreinte", *Revue d'Histoire des Sciences*, 12 (1959): 159-165.

Kaluza, T.

1910. "Zur Relativitätstheorie", *Physikalische Zeitschrift*, 11 (1910): 977-978.

Kennedy, R. J.

1922 "Another Ether-Drift Experiment", *Physical Review*, 20 (1922), 26-33.

1926. "A Refinement of the Michelson-Morley Experiment", *Publications of the National Academy of Sciences*, 12 (1926): 621-629.

Kennedy, R. J., e Thorndike, E. M.

1932. "Experimental Establishment of the Relativity of Time", *Physical Review*, 42 (1932): 400-418.

Keswani, G. H.

1965. "Origin and Concept of Relativity", *British Journal of the Philosophy of Science*, 15 (1965): 286-306; e 16 (1965): 19-32; 273-294.

Ketteler, E.

1873. *Astronomische Undulationstheorie oder die Lehre von der Aberration des Lichtes* (Bonn: P. Neusser, 1873).

Kevles, D. J.

1987. *The Physicists: The History of a Scientific Community in Modern America* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1987).

Klauber, R. D.

2002. "Anomalies in Relativistic Rotation", *Journal of Scientific Exploration*, 16, (2002): 603-620.

2003. "Derivation of the General Case Sagnac Result using Non-time-orthogonal Analysis" in Rizzi e Ruggiero (eds.) (2003).

Knopf, O.

1920. "Die Versuch von F. Harress *Die Geschwindigkeit des Lichtes in bewegten Körpern*", *Annalen der Physik* 62 (1920): 389-447.

Kostro, L.

2001. *Einstein e l'etere* (Bari: Dedalo, 2001).

Kragh, H.

1987 *An Introduction to the Historiography of Science* (Cambridge: Cambridge University Press, 1987); versione utilizzata traduzione italiana *Introduzione alla Storiografia della Scienza* (Bologna: Zanichelli, 1990).

Kuhn, T. S.

1962. *The Structure of the Scientific Revolutions* (Chicago: University of Chicago Press, 1962), versione utilizzata traduzione italiana *La Struttura delle Rivoluzioni Scientifiche* (Torino: Einaudi, 1999).

1970. "Postscript-1969" in *The Structure of the Scientific Revolutions* (2nd ed. Chicago: University of Chicago Press, 1970), versione utilizzata traduzione italiana *La Struttura delle Rivoluzioni Scientifiche* (Torino: Einaudi, 1999).

Lakatos, I.

1970. "Falsification and the methodology of scientific research programme", in Lakatos, I., e Musgrave, A. (eds.) *Criticism and the Growth of Knowledge* (Cambridge: Cambridge University Press, 1970): 91-195. Versione utilizzata traduzione italiana in Lakatos, I., "La falsificazione e la metodologia dei programmi di ricerca scientifici", in *Critica e Crescita della Conoscenza* a cura di Lakatos, I., e Musgrave, A. (Milano: Feltrinelli, 1976): 164-276

Landau, L. D., e Lifshits, E. M.

1967. *Teoreticheskaya Fizika T. 2 Teoriya Polyu* (Moscow: Nauka, 1967); versione utilizzata trad. in. *Course of Theoretical Physics Vol. 2 The Classical Theory of Fields* (Oxford: Pergamon Press, 1971); trad. it. *Teoria Dei Campi: Fisica Teorica 2* (III ed. Roma: Editori Riuniti/Edizioni Mir: 2004)

Langevin, P.

1921. "Sur la théorie de relativité et l'expérience de M. Sagnac", *Comptes Rendus*, 205 (1921): 831-834.

1934. *Notice sur les Travaux Scientifiques* (Paris: Société Générale d'imprimerie et d'édition, 1934).

1937. “Sur l’expérience de Sagnac”, *Comptes Rendus*, 205 (1937): 304-306.

Larmor, J.

1894. “A Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium”, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 185 (1894): 719-822.

1895. “A Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium – Part II. Theory of Electrons”, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 186 (1895): 695-743.

1897. “A Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium – Part III. Relation with Material media. Theory of Electrons”, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 190 (1897): 202-300.

1900. *Aether and Matter* (Cambridge: Cambridge University Press, 1900).

1904. “On the ascertained absence of effects of motion through the aether, in relation to the constitution of matter, and on the FitzGerald-Lorentz hypothesis”, *Philosophical Magazine Series 6, 7* (1904): 621–625. Trovato on-line il 6 gennaio 2010 in

http://en.wikisource.org/wiki/Absence_of_Effects_of_Motion_through_the_Aether

Larmor, J. (ed.)

1907. *Memoir and Scientific Correspondence of the Late Sir George Gabriel Stokes*, Vol. II (Cambridge: Cambridge University Press, 1907).

Laymon, R.

1980a. “Independent Testability: The Michelson-Morley and Kennedy-Thorndike Experiments”, *Philosophy of Science*, 47 (1980): 1-37.

1980b. “Idealization, Explanation and Confirmation”, *Proceeding of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1 (Chicago: University of Chicago Press, 1980): 336-350.

Lemon, H. B.

1936. “Albert Abraham Michelson: The Man and the Man of Science”, *American Physics Teacher*, 4 (1936): 1-11.

Levitt, T.

2000. “Editing out Caloric: Fresnel, Arago and the Meaning of Light”, *The British Journal for the History of Science*, 33 (2000): 49-65.

Lindsay, R. B. e Margenau, H.

1936. *Foundations of Physics* (New York: Wiley and Sons, 1936).

1957. *Foundations of Physics*, (2nd ed., New York: Dover, 1957).

Lodge, O. J.

1892. “On the Present State of Our Knowledge of the Connection between Ether and Matter”, *Nature*, 46 (1892): 164-165.

1893. “Aberration problems – a discussion concerning the connection between ether and gross matter; with some new experiments”, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 184 (1893): 727-807.

1897. “Experiments on the absence of mechanical connexion between ether and matter”, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 189 (1897): 149-165.

1926a. “Scientific Worthies: XLIV. – Albert Abraham Michelson”, *Nature*, 117 (1926): 1-6.

1926b. “On Prof. Miller’s Ether Drift Experiment”, *Nature*, 117 (1926): 854.

Lorentz, H. A.

1886. “Over den invloed, dien de beweging der Aarde op de lichtverschijnselen uitoefent”, *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen* (in inglese *Proceedings of Royal Academy of Amsterdam*), 2 (1886): 297-372; versione utilizzata trad. fr. “De l’influence du mouvement de la terre sur les phénomènes lumineux”, *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 21 (1887): 103-176; ripubblicato in Zeeman P, e Fokker, A. D: (eds.) *Collected Papers*, vol. 2 (*s-Gravenhage: Nijhoff, 1935-1939): 153-214.

1892a. “La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants”, *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 25 (1892): 363-552, ripubblicato in Zeeman P, e Fokker, A. D. (eds.) *Collected Papers*, vol. 4 (*s-Gravenhage: Nijhoff, 1935-1939): 164-321.

1892b. “Over de terukaatsing van licht door lichamen die zich bewegen”, *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen* (in inglese *Proceedings of Royal Academy of Amsterdam*), 1 (1892):28-31; versione utilizzata trad. ingl. “On the reflection of light by moving bodies”, in Zeeman P, e Fokker, A. D. (eds.) *Collected Papers*, vol. 4 (*s-Gravenhage: Nijhoff, 1935-1939): 215-218.

1892c. “De Relatief Beweging van der Aarde en den Aether” *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen* (in inglese *Proceedings of Royal Academy of Amsterdam*), 1 (1892/93): 74-79; versione utilizzata trad. ingl. “The Relative Motion of the Earth and the Ether”, in Zeeman P, e Fokker, A. D. (eds.) *Collected Papers*, vol. 4 (*s-Gravenhage: Nijhoff, 1935-1939): 220-223.

1895. *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern* (Leiden: E. J. Brill, 1895); ripubblicato in Zeeman P, e Fokker, A. D. (eds.) *Collected Papers*, vol. 5 ('s-Gravenhage: Nijhoff, 1935-1939): 1-139.
- 1899a. “Simplified Theory of Electrical and Optical Phenomena in Moving Systems”, *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen* (in inglese *Proceedings of Royal Academy of Amsterdam*) (1898-1899): 427-442.
- 1899b. “Stokes’s theory of aberration in the supposition of a variable density of the aether” *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen* (in inglese *Proceedings of Royal Academy of Amsterdam*), 1 (1899): 443-448.
1904. “Electromagnetic Phenomena in a System moving with a Velocity Smaller Than That of Light”, *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen* (in inglese *Proceedings of Royal Academy of Amsterdam*), 6 (1904): 809-834.
- 1909/1916. *The Theory of Electrons and Its Applications to the Phenomena of Light and Radiant Heat: a course of lectures delivered in Columbia University, New York, In March and April 1906* (2nd ed., Leipzig: B. G. Teubner, 1916).
- Lunn, A. C.
1922. “The propagation of Light in Rotating Systems”, *Journal of the Optical Society of America*, 5 (1922): 291-307
- MacCullagh, J.,
1848. “An Essay Towards a Dynamical Theory of Crystalline Reflection and Refraction”, *Transactions of the Royal Irish Academy* (presentato nel 1839), 21 (1848): 17-50.
- Macek, W. M., e Davis Jr., D. T. M.
1963. “Rotation Rate Sensing with Travelling-Wave Ring Lasers” *Applied Physics Letters*, 2 (1963): 67-68.
- MacKenzie, D.
1993. “From the Luminiferous Ether to the Boing 757: A History of the laser Gyroscope”, *Technology and Culture*, 34 (1993): 475-515.
- Malykin, G. B.
1997. “Earlier studies of the Sagnac effect”, *Physics-Uspeski* 40 (1997): 317-321.

2000. “The Sagnac Effect: correct and incorrect explanations”, *Physics-Uspekhi*, 170 (2000): 1229-1252.

Marinov, S

1978. “Rotating Disk Experiments”, *Foundations of Physics*, 8 (1978): 137-156.

Martinez-Chavanz R.,

1980. “L’Expérience de Sagnac et le Disque Tournant” (Ph.D. thesis, Université de Paris VI, 1980).

Mascart, É.

1872. “Sur les modifications qu’éprouve la lumière (1re partie)”, *Annales Scientifiques de l’École Normale Supérieure* 1 (1872): 157-214.

1874. “Sur les modifications qu’éprouve la lumière (2eme partie)”, *Annales Scientifiques de l’École Normale Supérieure*, 3 (1874): 363-420.

Mashhoon, B.

1988. “Neutron interferometry in a rotating frame of reference”, *Physical Review Letters*, 61 (1988): 2639–2642.

Maurain, Ch., e Picaud, A.

1940. *La Faculté des Sciences de l’Université de Paris* (Paris: Presses Universitaires, 1940).

Maxwell, J. C.

1865. “A Dynamical Theory of electromagnetic Field”, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 155 (1865): 459-512.

1873. *A Treatise on Electricity and Magnetism* 2 Vol. (Oxford: Oxford University Press, 1873).

1878. “Ether”, *Encyclopaedia Britannica* (9a Ed.), 8 (Edinburgh: 1879): 568-572.

Maxwell, J. C., e Stokes, G. G.

1880. “On a possible Mode of Detecting a Motion of the Solar System through the Luminiferous Ether”, *Nature*, 21 (1880): 314-315.

McCormmach, R.

1970. "H.A. Lorentz and the electromagnetic view of nature", *Isis*, 61 (1970): 459-497.

Metz, M. A.

1952a. "Théorie relativiste d'une expérience de Dufour et Prunier", *Comptes Rendus*, 234 (1952): 705-707

1952b. "Les problèmes relatifs a la rotation dans la Théorie de la relativité", *Journal de Physique et le Radium*, 13 (1952): 224-238

Michelson, A. A.,

1878. "On a Method of measuring the Velocity of Light", *American Journal of Science*, 15 (1878): 394-395.

1881. "The Relative Motion of the earth and the Luminiferous Ether", *American Journal of Science*, 22 (1881): 120-129.

1897. "The Relative Motion of Earth and Ether", *The American Journal of Science*, 3 (1897): 475-478.

1902. "The Velocity of Light", *Philosophical Magazine*, 3 (1902): 330-337.

1904. "Relative Motion of Earth and Ether", *Philosophical Magazine*, 8 (1904): 717-719

Michelson, A. A, e Morley, E. W.

1886. "Influence of Motion of the Medium on the Velocity of Light", *The American Journal of Science*, 31 (1886): 377-386.

1887. "On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether", *The American Journal of Science*, 34, (1887): 333-345.

Michelson, A. A., e Gale, H. G.

1925a. "The Effect oh the Earth Rotation on the Velocity of Light", *Nature*, 115 (1925): 566.

1295b. "The Effect oh the Earth Rotation on the Velocity of Light", *The Astrophysical Journal*, 61 (1925): 140-45.

Michelson, A. A., Pease, F. G. e Pearson, F.

1929a. "Repetition of the Michelson-Morley Experiment", *Nature*, 123 (1929): 88.

1929b. "Repetition of the Michelson-Morley Experiment", *Journal Of Optical Society of America*, 18 (1929): 181-182.

Michelson, A. A. et al.

1928. "Conference on the Michelson-Morley Experiment: Held at the Mount Wilson Observatory Pasadena California, February 4 and 4, 1927", *The Astrophysical Journal*, 63 (1928): 341-402.

Miller, A. I.

1981. *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and early interpretation (1905-1911)* (Reading: Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1981).

1984. *Imagery in Scientific Thought: Creating 20th-Century Physics*, (1st ed. Boston: Birkhäuser, 1984; Cambridge (Ma): MIT Press, 1986; 2nd ed. Cambridge (Ma): MIT Press, 1987).

Miller, D. C.

1922. "Ether-drift Experiments at Mount Wilson Solar observatory", *Physical Review*, 19 (1922): 407-408.

1925a. "Ether-drift Experiments at Mount Wilson", *Science*, 61 (1925): 617-621.

1925b. "Ether Drift Experiments at Mount Wilson", *Nature*, 116 (1925): 49-50.

1926a. "The Significance of the Ether-Drift Experiments of 1925 at Mt. Wilson", *Science*, 63 (1926): 433-43.

1926b. "Ether Drift Experiments", *Nature*, 117 (1926): 890.

1930. "Ether Drift Experiments in 1929 and other Evidence of Solar Motion", *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 24 (1930): 82-84,

1933. "The Ether-Drift Experiment and the determination of the Absolute Motion of the Earth", *Reviews of Modern Physics*, 5 (1933): 203-242.

1934. "Comments on Dr. Georg Joos's Criticism on the Ether-Drift Experiment", *Nature*, 45 (1934): 114.

Millikan, R. A.

1949. "Albert Einstein on His Seventieth Birthday", *Reviews of Modern Physics*, 21 (1949): 343-45.

Moatti, A.

2007. *Einstein: Un Siècle Contre Lui* (Paris: Odile Jacob, 2007).

Morley, E. W., e Miler, D. C.

1905a. "Report of an experiment to detect the Fitzgerald-Lorentz Effect", *Philosophical Magazine*, 9 (1905): 680-685.

1905b "Report of an Experiment to Detect Change of Dimension of Matter Produced by its Drift through the Ether", *Science*, 21 (1905): 339

1907. "Final Report on Ether-Drift Experiments", *Science*, 25 (1907): 525.

Moyer, A. E.

1987. "Michelson in 1887", *Physics Today*, (Mag. 1987): 50-56.

Munera, H. A.

1998. "Michelson-Morley Experiments Revised: Systematic Errors, Consistency Among Different Experiments, and Compatibility with Absolute Space", *Apeiron*, 5 (1998): 37-54.

Nathan, O., e Norden, H.

1968. *Einstein on Peace* (New York: Shocken, 1968).

Nersessian, N. J.

1984. *Faraday to Einstein: constructing meaning in scientific theories* (Dodrecht: Martinus Nijhoff Publishers: 1984).

1986. "Why wasn't Lorentz Einstein? An examination of the scientific method of H. A. Lorentz", *Centaurus*, 29 (1986): 205-242.

Newburg, R.

1974. "Fresnel Drag and the Principle of Relativity", *Isis*, 65 (1974): 379-386.

Niven, W. D. (ed.)

1890. *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell* (Cambridge: Cambridge University Press, 1890).

Nordman, C.

1922. "Einstein Expose et Discute sa Théorie" *Revue des deux mondes*, 9 (1922): 129-166.

O'Hara, J. G., e Pricha, W.

1987. *Hertz and the Maxwellians: A Study and Documentation of the Discovery of Electromagnetic Wave Radiation, 1873-1894* (London: Peter Peregrinus Ltd. And Science Museum of London, 1987).

Oldroyd, D.

1986. *The Arch of Knowledge: An Introductory Study of the History of the Philosophy and Methodology of Science* (New York and London: Methuen, 1986), versione utilizzata traduzione italiana *Storia della filosofia della scienza* (Milano: Mondadori, 1989).

Page, L. A.

1975. "Effect of Earth's Rotation in Neutron Interferometry", *Physical Review Letters*, 35 (1975): 543.

Painlevé, P.

1921. "La mécanique classique et la théorie de la relativité", *Comptes Rendus*, 173 (1921): 677-679.

Pais, A.

1982. '*Subtle is the Lord*': *The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 1982), versione utilizzata traduzione italiana *Sottile è il Signore: La Scienza e la Vita di Albert Einstein* (Torino: Bollati Boringhieri editore, 1991).

Panofsky, W. K. H. e Phillips, M.

1955. *Classical Electricity and Magnetism* (1st ed. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1955).

1962. *Classical Electricity and Magnetism* (2nd ed. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1962).

Paty, M.

1987. "The Scientific Reception of Relativity in France", in Glick (ed.) (1987): 113-167.

Pauli, W.

1921. *Relativitätstheorie* (Leipzig: Teubner, 1921); versione utilizzata trad. it. in *Teoria della Relatività* (Torino: Boringhieri, 1958).

Pease, F. G.

1930. "Ether Drift Data", *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 42 (1930): 197-202.

Peres, A.

1978. "Synchronization of clocks in a rotating frame", *Physical Review D*, 18 (1978): 2173-2174.

Picard, E. M.

1921. "Quelques remarques sur la théorie de la relativité", *Comptes Rendus*, 173 (1921): 680-682.

Piccard, A. e Stahel, E.

1926. "L'expérience de Michelson, réalisée en ballon libre", *Comptes Rendus*, 183 (1926): 420-21.

1927. "L'absence du vent d'éther au Rigi", *Comptes Rendus*, 185 (1927): 1198-1200.

Pogány, B.

1926. "Über die Wiederholung des Harress-Sagnacschen Versuches", *Annalen der Physik*, 80 (1926): 217-231.

1928. "Über die Wiederholung des Harresschen Versuch", *Annalen der Physik*, 85 (1928): 244-256

Poincaré, H.

1898. "La mesure du temps", *Revue de métaphysique et de la morale*, 6 (1898): 371-384.

1900. "La théorie de Lorentz et le principe de la réaction", *Archive néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 5 (1900): 252-278.

1901. *Électricité et optique. La lumière et les théories électrodynamiques. Leçon professées à la Sorbonne en 1888, 1890 et 1899* (Paris: Carré et Naud, 1901).

1905. "Sur la dynamique de l'électron", *Comptes Rendus*, 140 (1905): 1504-1508.

1906. "Sur la dynamique de l'électron", *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, 21 (1906): 131-175.

Polanyi, M.

1951. *The Logic of Liberty: Reflections and Rejoinders* (London: Routledge and Kegan Paul Ltd, 1951).

1958. *Personal Knowledge, Towards a Post-critical Philosophy* (London: Routledge & Kegan, 1958).

1962. *Personal Knowledge, Towards a Post-critical Philosophy* (corrected ed., London: Routledge & Kegan Ltd, 1962).

Pomey, J. B.

1922. "Les Conférences d'Einstein au Collège de France", *Le Producteur*, 8 (1922): 201-206.

Poor, C. L.

1922. *Gravitation Versus Relativity: a Non-Technical Explanation of the Fundamental Principles of Gravitational Astronomy and a Critical Examination of the Astronomical Evidence cited as a Proof of the Generalized Theory of Relativity* (New York/London: Putnam, 1922).

Popper, K. R.

1934. *Logik der Forschung* (Tübingen: J.C.B.Mohr, 1934).

1959. *The Logic of Scientific Discovery* (1st English ed., London: Hutchinson & Co, 1959); versione utilizzata (London/New York: Routledge, 2004).

Post, E. J.

1967. "Sagnac Effect", *Reviews of Modern Physics*, 39 (1967): 475-493.

Potier, A.

1874. "Conséquences de la formule de Fresnel relative à l'entraînement de l'éther par les milieux transparents", *Journal de Physique*, 3 (1874): 201-204.

Pyenson, L.

1987. "The Relativity Revolution in Germany", in Glick, (ed.) (1987): 59-111.

Quintin, M.

1996. "Qui a découvert la fluorescence X?", *Journal of Physics IV*, 6 (1996) 599-609

Rayleigh, J.

1902. "Does Motion through the Aether cause Double Refraction?", *Philosophical Magazine Series 6*, 4 (1902): 678-683; trovato on-line il 6 gennaio 2010 in

http://en.wikisource.org/wiki/Does_Motion_through_the_Aether_cause_Double_Refraction%3F

Reichenbach, H.

1928. *Die Philosophie der Raum- Zeit Lehre*, (Berlin: Walter de Gruyter, 1928); versione utilizzata traduzione inglese in *The Philosophy of Space and Time* (New York: Dover, 1957).

Renn, J.

2004. "The Relativity Revolution from the Perspective of Historical Epistemology", *Isis*, 95 (2004): 640-48.

Renn, J. (ed.)

2007. *The Genesis of General Relativity*, 4 vols. (Dordrecht: Springer, 2007).

Richtmyer, F. K.

1934. *Introduction to Modern Physics* (2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1934).

Richtmyer, F. K., e Kennard, E. H.

1942. *Introduction to Modern Physics* (3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1942).

Richtmyer, F. K., Kennard E. H., e Cooper, J. N.

1969. *Introduction to Modern Physics* (6th ed., New York: McGraw-Hill, 1969)

Rizzi, G., e Tartaglia A.

1998. "Speed of light on rotating platforms", *Foundations of Physics*, 28 (1998): 1663-2000.

Rizzi, G., e Ruggiero, M. L. (eds.)

2003. *Relativity in Rotating Frames*, della serie *Fundamentals Theories of Physics* (Dordrecht: Van der Merwe A., Kluwer Academic Publishers, 2003).

Rizzi, G., e Ruggiero M. L.

2003. "The relativistic Sagnac effect: two derivations" in Rizzi e Ruggiero (eds.) (2003): 179-220.

Roberts, T. J.

2006. “An Explanation of Dayton Miller’s Anomalous ‘Ether Drift’ Result”, arXiv:physics/0608238v3.

Rodrigues Jr., W. A., e Sharif, M.

2001. “Rotating Frames in SRT: The Sagnac Effect and Related Issues”, *Foundations of Physics*, 31 (2001): 1767-1783.

Sagnac, G. M. M.

1897. “Illusions qui accompagnent la formation des pénombres. Application aux rayons X”, *Journal de Physique*, 6 (1897): 169-180.

1899a. “Nouvelle Manière de considérer la propagation des vibrations lumineuses à travers la matière”, *Comptes Rendus*, 129 (1899): 756-758.

1899b. “Théorie nouvelle des phénomènes optiques d’entraînement de l’éther par la matière”, *Comptes Rendus*, 129 (1899): 818-821.

1899c. “Théorie nouvelle de la propagation de la lumière à travers les corps en repos ou en mouvement”, *Bulletin de la Société des Gens de science*, 3 (1899) 17-21.

1900a. “Théorie Nouvelle de la Transmission de la Lumière dans les Milieux en Repos ou en Mouvement”, *Journal de Physique*, 9 (1900): 177-189.

1900b. “Relations nouvelles entre la réflexion et la réfraction vitreuses de la lumière”, *Extrait des Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles*, (1900) : 377-82.

1905. “Sur la propagation de la lumière dans un système en translation et sur l’aberration des étoiles”, *Comptes Rendus*, 141 (1905): 1221-1223.

1910a. “Sur les interférences de deux faisceaux superposés en sens inverses le long d’un circuit optique de grandes dimensions”, *Comptes Rendus*, 150 (1910): 1302-1305.

1910b. “Interféromètre à faisceaux superposés inverses donnant en lumière blanche polarisée une frange centrale étroite à teinte sensible et des franges colorées étroites à intervalles”, *Comptes Rendus*, 150 (1910): 1676-1679.

1911a. “Limite supérieure d’un effet tourbillonnaire optique dû à un entraînement de l’éther lumineux au voisinage de la Terre”, *Le Radium*, 8 (1911): 1-8.

1911b. “Les systèmes optiques en mouvement et la translation de la Terre”, *Comptes Rendus*, 152 (1911): 310-313.

1911c. “Strioscopie et striographie interférentielles analogues à la méthode optique des stries de Focault et de Töpler”, *Comptes Rendus*, 153 (1911): 90-93.

- 1911d. “Strioscopie et striographe interférentiels”, *Le Radium*, 8 (1911): 241-253.
1912. “Mesure directe des différences de phase dans un interféromètre à faisceaux inverses. Application à l’étude optique des argentes transparentes”, *Comptes Rendus*, 154 (1912): 1346-1349.
- 1913a. “L’éther lumineux démontré par l’effet du vent relatif d’éther dans un interféromètre en rotation uniforme”, *Comptes Rendus*, 157 (1913): 708-710.
- 1913b. “Sur la preuve de la réalité de l’éther lumineux par l’expérience de l’interférographe tournant”, *Comptes Rendus*, 157 (1913): 1410-1413.
1914. “Effet tourbillonnaire Optique. La Circulation de l’éther lumineux dans un interféromètre tournant”, *Journal de Physique*, 4 (1914): 177-195.
- 1919a. “L’éther et Mécanique absolue des ondulations”, *Comptes Rendus*, 169 (1919): 469-471.
- 1919b. “L’éther et Mécanique absolue des ondulations”, *Comptes Rendus*, 169 (1919): 529-531.
- 1919c. “Mécanique absolue des ondulations et Relativité newtonienne”, *Comptes Rendus*, 169 (1919): 643-646.
- 1919d. “Comparaison de l’expérience et de la théorie mécanique de l’éther ondulatoire”, *Comptes Rendus*, 169 (1919): 783-785.
- 1919e. “La comparaison directe des deux mécaniques simultanées de la radiation. Méthode de révélation de la translation de la Terre”, *Comptes Rendus*, 169 (1919): 1027-1029.
- 1920a. *Notice sur les Titres et Travaux de M. Georges Sagnac* (Paris: Gauthier-Villars et Cie, 1920)
- 1920b. “Les longueurs d’accès de la radiation lumineuse newtonienne et les zones de silence des signaux amortis de la T.S.F.”, *Comptes Rendus*, 170 (1920): 800-803.
- 1920c. “La relativité réelle de l’énergie des éléments de radiation et le mouvement dans l’éther des ondes”, *Comptes Rendus*, 170 (1920): 1239-1242.
- 1920d. “Les deux mécaniques simultanées et leurs liaisons réelles”, *Comptes Rendus*, 171 (1920): 99-102.
- 1922a. “Les invariants newtoniens de la matière et de l’énergie radiante, et l’éther mécanique des ondes variables”, *Comptes Rendus*, 174 (1922): 29-32.
- 1922b. “La projection de la lumière des étoiles doubles périodiques et les oscillations des raies spectrales”, *Comptes Rendus*, 174 (1922) : 376-378.
- 1922c. “Les oscillations des raies spectrales des étoiles doubles expliquées par la loi nouvelle de projection de l’énergie de la lumière”, *Comptes Rendus*, 175 (1922): 89-91.
1923. “Sur la spectre variable périodique des étoiles doubles: incompatibilité des phénomènes observés avec la théorie de la relativité générale”, *Comptes Rendus*, 176 (1923): 161-163.

1924a. “La classification véritable des étoiles doubles définie par la loi précise de la projection de leur lumière rapportée à l’arrivée au Soleil de leurs signaux dans le spectre”, *Comptes Rendus*, 178 (1924): 437-440.

1924b. “Le mécanisme de la projection de la lumière dans les étoiles doubles”, *Comptes Rendus*, 178 (1924): 621-623.

Sanchez-Ron, J. M.

1987. “The Reception of Special Relativity in Great Britain”, in Glick (ed.) (1987): 27-58.

Sarton, G.

1931. “Discovery of the Aberration of Light”, *Isis*, 15 (1931): 233-265.

Schaffner, K. F.

1969. “The Lorentz Electron Theory of Relativity”, *American Journal of Physics*, 37 (1969): 498-513.

1972. *Nineteenth Century Aether Theories* (Oxford/New York: Pergamon Press, 1972).

Schwartz, H. M.,

1968. *Introduction to Special Relativity* (New York: McGraw-Hill, 1968).

Scott, W.

1996. “Hermann Minkowski et la Mathématisation de la Théorie de la Relativité Restreinte 1905-1915” (Ph.D. Thesis, Paris, 1996).

Scribner Jr., C.

1964. “Henri Poincaré and the Principle of Relativity”, *American Journal of Physics*, 32 (1964): 672-678.

Seelig, C.

1952. *Albert Einstein: Eine Dokumentarische Biographie* (Zürich/Stuttgart/Vienna: Europa Verlag, 1952).

Selleri, F.

1997. "Noninvariant one-way speed of light and locally equivalent reference frame", *Foundations of Physics*, 10 (1997): 73-83.
2001. "Relatività e Relativismo", *Rivista de Filosofia*, 25 (2001): 21-49.
2003. "Sagnac Effect: end of the mystery", in Rizzi e Ruggiero (eds.) (2003): 57-77.

Shankland, R. S.

1941. "Dayton C. Miller: Physics Across Fifty Years", *American Journal of Physics*, 9 (1941): 273-283.
1949. "Michelson at Case", *American Journal of Physics*, 17 (1949): 487-490.
1963. "Conversations with Albert Einstein", *American Journal of Physics*, 31 (1963): 47-57.
1964. "Michelson-Morley Experiment", *American Journal of Physics*, 32 (1964): 16-35.
1967. "Rayleigh and Michelson", *Isis*, 58 (1967): 86-88.
- 1973a. "Conversations with Einstein II", *American Journal of Physics*, 41 (1973): 895-901
- 1973b. "Michelson's role in the development of relativity", *Applied Optics*, 12 (10) (1973): 2280-2287.

Shankland, R. S., McCuskey, S. W. Leone, F. C., e Kuerti, G.

1955. "New Analysis of the Interferometer Observations of Dayton C. Miller", *Reviews of Modern Physics*, 27 (1955): 167-178.

Sherwin, C.

1960. "Some Recent Experimental Tests of the Clock Paradox", *Physical Review*, 120 (1960): 17-21.

Silberstein, L.

1914. *The Theory of Relativity* (London: MacMillan, 1914).
- 1919-20. "Recent eclipse results and Stokes-Planck Ether", *Philosophical Magazine*, 39 (1920): 161-170.
1921. "The propagation of light in rotating systems", *Journal of Optical Society of America*, 5 (1921): 291-307.
1922. *The Theory of General Relativity and Gravitation* (New York: Van Nostrand, 1922)
1924. "The Rotating Earth as a reference System for Light Propagation", *Philosophical Magazine*, 48 (1924): 395-404.

1925a. "D. C. Miller's Recent Experiments, and the Relativity Theory", *Nature*, 115 (1925): 798-799.

1925b. "Ether Drift and the Relativity Theory", *Nature*, 116 (1925): 98.

Smith, A. W., e Cooper, J. N.

1972. *The Elements of Physics* (8th ed. New York: McGraw-Hill Book Co, 1972)

Sponsel, A.

2002. "Constructing a 'Revolution in Science': The Campaign to Promote a Favourable Reception for the 1919 Solar Eclipse Experiments", *The British Journal for the History of Science*, 35 (2002): 439-467.

Stachel, J.

1989. "The rigidly rotating disk as the Missing Link in the History of the General Theory of Relativity", in Howard e Stachel (eds.) (1989): 48-62.

2002a. *Einstein from 'B' to 'Z'* (Boston: Birkhäuser, 2002).

2002b. "Einstein and Michelson: The Context of Discovery and the Context of Justification", in Stachel, John (2002a): 177-190.

2002c. "Einstein's Jewish Identity", in Stachel (2002a): 57-84.

2002d. "Einstein and Ether Drift experiments", in Stachel (2002a): 171-176.

2005. "Fresnel's (Dragging) Coefficient as a Challenge to 19th Century Optics of Moving Bodies" in Kox, A. J., e Eisenstaedt, J. (eds.) *Einstein Studies, vol II: The Universe of General Relativity*, (Boston: Birkhäuser, 2005): 1-13.

St. John, C.

1932. "Observational Basis of General Relativity", *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 44 (1932): 277-295.

Stearns, R. L.

1952. "A Statistical Analysis of Interferometer Data" (MS Thesis, Case Institute of Technology, Physics Dept., 1952).

Stedman, G. E.

1997. “Ring-laser tests of fundamental physics and geophysics”, *Reports on Progress in Physics* 60 (1997): 615-688.

Stoney, G. J.

1894. “Of the ‘Electron’, or Atom of Electricity”, *Philosophical Magazine*, 38 (1894): 418–420.

Stokes, G. G.

1945. “On the Aberration of Light”, *Philosophical Magazine*, 27 (1945): 9-15.

1946a. “On Fresnel’s Theory of the Aberration of Light”, *Philosophical Magazine*, 28 (1946): 76-81.

1946b. “On the Constitution of the Luminiferous Aether, viewed with reference to the phenomenon of the Aberration of Light”, *Philosophical Magazine*, 29 (1946): 6-10.

1948. “On the Constitution of the Luminiferous Ether”, *Philosophical Magazine*, 32 (1948): 343-49.

Strömberg, G.

1926. “Miller’s Ether Drift Experiment and Stellar Motions”, *Nature*, 117 (1926): 482-483.

Su, C. C.

2001. “Reinterpretation of the Michelson-Morley experiment based on the GPS Sagnac correction”, *Europhysics Letters*, 56 (2001): 170-174.

Swann, W. F. G.

1925a. “The Relation of the Restricted to the General Theory of Relativity and the Significance of the Michelson-Morley Experiment”, *Science*, 62 (1925): 145-149.

1925b. “The Stokes-Planck Theory and the Michelson-Morley Experiment”, *Nature*, 116 (1925): 785.

Swenson Jr., L. S.

1962. “The Ethereal Aether: A History of the Michelson-Morley Aether-Drift Experiments, 1880-1930” (Ph.D. dissertation, Claremont Graduate School, 1962)

1972. *The Ethereal Ether: A History of the Michelson-Morley Aether-Drift Experiments, 1880-1930* (Austin & London: University of Texas Press, 1972).

1979. *Genesis of Relativity* (New York: Burt Franklin and Co., 1979)

Synge, J. L.

1952a. “Gardner’s Hypothesis and the Michelson-Morley Experiment”, *Nature*, 170 (1952): 243-244.

1952b. “Effects of Acceleration in the Michelson-Morley experiment”, *Scientific Proceedings of the Dublin Royal Society*, 26 (1952): 45-54.

Taylor, E. F., Wheeler J. A.

1963. *Spacetime Physics* (San Francisco: Freeman & Co., 1963).

Thirring, H.

1926. “Prof. Miller’s Ether Drift Experiments”, *Nature*, 118 (1926): 81-2.

Thomson, J. J.

1897. “Cathode Rays”, *Philosophical Magazine*, 44 (1897): 293–316.

Tomaschek, R.

1923. “Über den Michelsonversuch mit Fixsternlicht”, *Astronomische Nachrichten*, 219 (1923): 301-306.

1925. “Über Versuche zur Auffindung elektrodynamischer Wirkungen der Erdbewegung in groben Höhen”, *Annalen der Physik*, 76 (1925): 743-756.

Tonnellat, M. A.

1971. *Histoire du Principe de Relativité* (Paris: Flammarion éditeur, 1971).

Trouton, F. T.

1902. “The results of an electrical experiment, involving the relative motion of the earth and ether, suggested by the late professor FitzGerald”, *Transactions of the Royal Dublin Society*, 7 (1902): 379–384.

Trouton, F. T., e Noble H. R.

1903. “The mechanical forces acting on a charged electric condenser moving through space”, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 202 (903): 165-181.

Tsai, C. H., e Neilson D.

1988. "New quantum effect interference in rotating systems", *Physical Review A*, 37 (1988): 619-621.

Turner, D., e Hazelett R. (eds),

1979. *The Einstein Myth and the Ives Papers: A Counter-Revolution in Physics* (Pasadena: Hope Publishing House, 1979).

Van Dantzig, D.

1925. "The Miller Effect and relativity", *Nature*, 116 (1925): 465.

Van Helden, A.

1983. "Roemer's Determination of Light", *Journal History of Astronomy*, 14 (1983): 137-141.

Van Name, F. W.

1952. *Modern Physics: Developments of the Twentieth Century* (New York: Prentice-Hall, 1952).

Veltmann, W.

1870a. "Fresnel's Hypothese zur Erklärung der Aberration Erscheinungen", *Astronomische Nachrichten*, 75 (1870): 145-160.

1870b. "Über die Fortpflanzung des Lichts in bewegten Medien", *Astronomische Nachrichten*, 76 (1870): 129-144.

1873. "Über die Fortpflanzung des Lichts in bewegten Medien", *Poggendorf's Annalen der Physik und Chemie*, 150 (1873):497-535.

Vigier, J. P.

1997. "New non-zero photon mass interpretation of the Sagnac Effect as direct experimental justification of the Langevin paradox", *Physics Letters A*, 234 (1997): 75-85.

Von Laue, M.

1911. "Über einen Versuch zur Optik der bewegten Körper", *Sitzungsberichte der mathematisch-physikalischen Klasse der K. B. Akademie der Wissenschaften* (1911): 405-412.

1920. "Zum versuch von F. Harress", *Annalen der Physik*, 62 (1920): 448-463.

1924. *La théorie de la relativité - Tome I*(Paris: Imprimerie Gauthier-Villars et Co, 1924) pp. 26-27, 137-139 e 200-204.

Wang, R.

1998. “From the triangle Sagnac experiment to a practical, crucial experiment of the constancy of the speed of light using atomic clocks on moving objects” *Europhysics Letters*, 43 (1998): 611-616.

Weber, T. A.

1997. “Measurements on a rotating frame in relativity, and the Wilson and Wilson experiment” *American Journal of Physics*, 65 (1997): 946-953.

Werner, S.A., Staudenmann, J. L., e Colella, R.

1979. “Effect of Earth's Rotation on the Quantum Mechanical Phase of the Neutron” *Physical Review Letters*, 42 (1979): 1103-1106.

Werner, S.A., Staudenmann, J. L., Colella, R., e Overhauser A. W.

1980. “Gravity and inertia in quantum mechanics”, *Physical Review A*, 21 (1980): 1419-1438.

Wertheimer, M.

1945. *Productive Thinking* (1st ed. New York: Harper, 1945; enlarged edition 1959).

Whittaker, Sir E.

1910. *A History of the Theories of Aether and Electricity: Volume I: The Classical Theories* (London/New York: Longmans Green, 1910).

1951. *A History of the Theories of Aether and Electricity: Volume I: The Classical Theories* (revised ed. London: Thomas Nelson and Sons Ltd, 1951); versione utilizzata (Dover edition New York: Dover, 1989).

1953. *A History of the Theories of Aether and Electricity: Volume II: The Modern Theories 1900-1926* (London: Thomas Nelson and Sons Ltd, 1953); versione utilizzata (Dover edition New York: Dover, 1989).

Wilson, D. B.

1972. "George Gabriel Stokes on Stellar Aberration and the Luminiferous Ether", *The British Journal for the History of Science*, 6 (1972): 57-72.

Yildiz, A., e Tang, C. H.

1966. "Electromagnetic Cavity Resonances in Accelerated Systems", *Physical Review*, 146 (1966): 947-954.

Young, T.

1800. "Outlines of experiments and Inquiries respecting Sound and Light", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 90 (1800): 106-150.

1804. "Experiments and Calculations relative to physical Optics", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 94 (1804): 1-14.

Zahar, E.

1973. "Why did Einstein's Programme Supersede Lorentz's?", *The British Journal for the Philosophy of Science*, 24 (1973): 95-123, 223-262.

1983. "The Popper-Lakatos Controversy in the Light of 'Die Beiden Grundprobleme der Erkenntnistheorie'", *The British Journal for the Philosophy of Science*, 34 (1983): 149-171.

Zeeman, P.

1914. "Fresnel's coefficient for light of different colours. (First part)", *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen* (in inglese *Proceedings of Royal Academy of Amsterdam*), 17 (1914): 445-451.

1915. "Fresnel's coefficient for light of different colours. (Second part)", *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen* (in inglese *Proceedings of Royal Academy of Amsterdam*), 18 (1915): 398-408.

Zernike, F.

1947. "The convection of light under various circumstances with special reference to Zeeman's experiments" *Physica*, 13 (1947): 279-288.

AAVV

1874. “Prix décerné. Année 1872. –Prix extraordinaires. Grand prix des sciences mathématique. Rapport lue adopté dans la séance du 14 juillet 1873”, *Comptes Rendus*, 79 (1874): 1531-1534.
1914. “Académie des Sciences de Paris: Séance du 22 Décembre 1913”, *Revue générale des Sciences Pure et Appliquées*, 25 (1914): 38.