

Il gravimetro polare di Pontremoli Pontremoli's polar gravimeter

Leonardo Gariboldi

Dipartimento di Fisica "Aldo Pontremoli", Università di Milano, Milano, Italia

Riassunto. Aldo Pontremoli progettò per la spedizione artica a bordo del dirigibile Italia del 1928 guidata da Umberto Nobile una serie di strumenti adatti a poter essere trasportati e utilizzati in condizioni estreme. Tra questi strumenti si segnala un gravimetro che fu il primo pensato per un utilizzo in zone polari. Lo strumento di Pontremoli si inseriva in un secolare percorso di tentativi di misura del campo gravitazionale terrestre che cercavano di affrontare le difficoltà poste dai luoghi dove si conducevano le misure.

Abstract. Aldo Pontremoli devised a few instruments for the 1928 Arctic expedition led by Umberto Nobile on board the airship "Italia", instruments were apt to be transported and used in extreme conditions. Among these, the gravimeter, which was the first one to be planned for its use in a polar environment. Pontremoli's instrument can be considered as a step in the secular path of attempts to measure the Earth gravitational field that tried to overcome the difficulties given by the locations where the measurements were made.

1. La spedizione polare del 1928

La spedizione polare del 1928 a bordo del dirigibile Italia, guidata da Umberto Nobile ⁽¹⁾, fu la prima spedizione con scopi scientifici e non puramente esplorativi nell'Artide ⁽²⁾. Se questa era la motivazione ufficiale a giustificazione della spedizione, non si può ignorare il fatto che una spedizione di questo tipo non poteva non avere anche uno o più scopi politici. Per l'Italia fascista si trattava sicuramente anche di una questione di prestigio internazionale. L'Italia poteva mostrare ancora una volta di essere all'avanguardia nella tecnologia del volo, con discussioni in fase organizzativa sull'uso di aeroplani al posto di un dirigibile. Anche la ricerca scientifica in sé veniva ad essere inserita in un contesto internazionale, vedendo la partecipazione alla spedizione di František Běhounek dell'Istituto radiologico di Praga ⁽³⁾ e Finn Malmgren dell'Istituto Idrografico di Pettersson a Bornö ⁽⁴⁾. Běhounek era un fisico

⁽¹⁾ Su Umberto Nobile (Lauro 1885-Roma 1978) si veda [1].

⁽²⁾ Sugli aspetti scientifici della spedizione si vedano [2] e [3]. Il secondo è la traduzione in italiano del primo arricchita da ulteriore materiale.

⁽³⁾ Su František Běhounek (Holešovice 1898-Karlovy Vary 1973) si veda [4].

⁽⁴⁾ Su Finn Malmgren (Göteborg 1895-Mare di Barents 1928) si veda [5].

cecoslovacco, esperto nelle misure di radiazioni, formatosi alla scuola di Marie Curie. Malmgren era un autorevole meteorologo svedese che aveva partecipato a precedenti campagne di misure nell'Artide, tra cui la spedizione a bordo del Norge nel 1926.

Nobile aveva già preso parte a spedizioni esplorative nell'Artide ⁽⁵⁾. Nel 1926 aveva compiuto un primo viaggio a bordo del dirigibile Norge al quale fece seguito nel 1927 la prima esplorazione a bordo del dirigibile Italia. Le spedizioni italiane avevano il loro campo-base nell'arcipelago norvegese delle isole Svalbard ed ebbero come obiettivo l'esplorazione dell'Artide a nord dell'Europa e il sorvolo del Polo Nord avvenuto con un volo che dalle isole norvegesi raggiunse la costa dell'Alaska. La spedizione organizzata per il 1928 riutilizzò il dirigibile Italia, che si era mostrato più adatto del Norge all'esplorazione dell'Artide, e oltre all'ampliamento dei territori esplorati si pose obiettivi scientifici su larga scala.

L'interesse scientifico per le ricerche programmate spaziava da argomenti tradizionali in territori inesplorati (misure del magnetismo terrestre, del campo gravitazionale, di oceanografia, ecc.) a settori di ricerca sviluppatasi solo negli ultimi decenni (misura della radiazione penetrante, della radioattività e dell'elettricità atmosferica, possibilità di trasmissioni con onde radio, ecc.). Il volo su dirigibile imponeva limiti molto stringenti sul peso e sulle dimensioni degli strumenti scientifici. Le vibrazioni del motore e quelle causate dal vento ponevano ulteriori richieste di robustezza. Inoltre, le condizioni climatiche a bordo o sulla banchisa richiedevano una strumentazione che dovette essere testata prima della partenza in apposite camere frigorifere.

L'organizzazione scientifica delle campagne di misura e la progettazione di strumenti furono affidate ad Aldo Pontremoli dell'Istituto di Fisica Complementare della Regia Università di Milano ⁽⁶⁾, e a Luigi Palazzo del Regio Ufficio Centrale di Meteorologia e Geofisica di Roma ⁽⁷⁾. Dei quattro scienziati coinvolti, soltanto Palazzo non prese parte alla spedizione.

Běhounek progettò la campagna di misura dell'elettricità atmosferica, collegata al campo elettrico in bassa atmosfera e alla differente ionizzazione con la quota dovuta alla radioattività di superficie e alla radiazione cosmica [12]. Malmgren si occupò delle misure delle grandezze atmosferiche a fini previsionali meteorologici; i dati raccolti da Malmgren sono riportati in [13]. Nobile coordinò nel suo complesso il progetto dell'esplorazione [14, 15]. Pontremoli fu incaricato della progettazione e della costruzione di parte degli strumenti da usare in volo e sulla banchisa [16] e delle misure di gravitazione, magnetismo e trasmissioni radio (solo una minima parte dei dati di Pontremoli sono sopravvissuti e sono riportati in [17]). Palazzo progettò le ricerche geomagnetiche [18]. La ripartizione dei tipi di misure tra i tre scienziati partecipanti alla spedizione non era assolutamente da intendersi in modo rigido; in quel contesto ambientale la collaborazione in ogni attività era necessaria.

⁽⁵⁾ Su viaggi e spedizioni di italiani nell'Artide si veda [6].

⁽⁶⁾ Su Aldo Pontremoli (Milano 1896-Mare di Barents 1928) si vedano [7-10].

⁽⁷⁾ Su Luigi Palazzo (Torino 1861-Firenze 1933) si veda [11].

La strumentazione comprendeva ⁽⁸⁾:

- Fotografia: una cinepresa Zeiss-Ikon e alcune macchine fotografiche; componenti ottico-meccaniche della Koritska di Milano.
- Elettricità atmosferica: un elettrometro di Kolhörster per la misura della radiazione penetrante, un elettrometro per la misura della conducibilità atmosferica, lamine metalliche per la misura della radioattività atmosferica, un elettrometro di Wiechert per la misura del gradiente elettrico; questi strumenti furono selezionati da Běhounek e pesavano nel complesso 29,8 kg.
- Meteorologia: gli strumenti per le misure meteorologiche furono selezionati da Malmgren e usati già a partire dalla base di Milano.
- Geomagnetismo: un magnetometro progettato da Pontremoli, un inclinometro della Carnegie Institution.
- Trasmissioni a onde corte: apparecchi radio costruiti dalla Philips e dalla Allocchio & Bacchini; il peso complessivo era di 258 kg.
- Oceanografia: sonde con termometro a resistenza e scandagli costruiti dalla Allocchio & Bacchini per un peso complessivo di 49 kg.
- Gravimetria: un gravimetro progettato da Pontremoli.

Il dirigibile Italia, partito da Milano nella notte tra il 14 e il 15 aprile 1928, volò dapprima fino a Stolp, una città sulla costa baltica della Germania (oggi in Polonia). A Stolp fu presa la decisione finale su quanti e quali strumenti effettivamente imbarcare. Il gravimetro non fu imbarcato direttamente sul dirigibile Italia ma fu trasportato insieme a molto altro materiale alla base italiana della Baia del Re nelle isole Svalbard.

Durante il volo da Stolp alla base della Baia del Re, avvenuto dal 3 al 6 maggio, Pontremoli eseguì misure del campo geomagnetico che misero in evidenza alcune anomalie locali. Lo strumento per la misura del gradiente del potenziale elettrico non funzionò per un deposito di ruggine nel cilindro di sostegno che fu riparato alla fine del viaggio. Běhounek fece, con l'aiuto di Pontremoli, alcune misure di radiazione penetrante e di radioattività dell'atmosfera.

Nel primo volo dell'11 maggio, che durò poche ore e portò il dirigibile a sorvolare l'arcipelago delle Svalbard, furono eseguite dieci osservazioni di radiazione penetrante, cinque osservazioni di gradiente del potenziale elettrico, e quattro serie di osservazioni geomagnetiche delle quali solo una fu considerata utile a causa delle continue oscillazioni degli aghi magnetici. Furono preparate quattro lamine per le misure di radioattività dell'atmosfera. Malmgren da solo eseguì due osservazioni della conducibilità dell'atmosfera.

⁽⁸⁾ Un elenco dettagliato della strumentazione fornita dall'Istituto di Fisica di Pontremoli è in: Università degli Studi di Milano, Centro APICE, Archivio Storico, serie 7, titolo 8, busta 170, Fisica 1924-1938: "Elenco del materiale dell'Istituto di Fisica Complementare inviato per la spedizione Nobile". Il materiale indicato, per un valore totale ai fini assicurativi di 68.890,55 lire, comprendeva oltre a materiale da cartoleria e officina, una trentina di libri, molte componenti di strumenti ottici, un galvanometro di Moll, un galvanometro Siemens completo, una pila di Weston, uno spettroscopio a visione diretta Zeiss, due spettrografi Zeiss, un ulteriore spettrografo, due termopile Kipp & Zonen.

Durante il secondo volo, del 15-18 maggio, furono eseguite cinquantanove misure di radiazione penetrante, trentuno misure di radioattività atmosferica, trentotto misure del gradiente del potenziale elettrico, venti serie di misure della componente orizzontale del campo geomagnetico. Malmgren eseguì altre misure della condubilità elettrica dell'atmosfera. I tentativi di Pontremoli di misurare l'intensità dei segnali radio non ebbero alcun risultato.

Il 25 maggio, durante il terzo volo, il dirigibile perdetto quota rapidamente all'improvviso e colpì la banchisa. A causa dell'urto dieci uomini (tra questi Béhounek, Malmgren e Nobile) e parte delle attrezzature furono scagliati sulla banchisa. Di questi solo otto furono portati in salvo dalle operazioni di soccorso tra il 23 giugno e il 12 luglio. Malmgren non poté essere salvato e fu avvistato per l'ultima volta morto sulla banchisa l'11 luglio e il suo corpo non fu mai più trovato. Alleggerito all'improvviso, il dirigibile riprese quota con le sei persone rimaste a bordo, tra le quali Pontremoli. Non si conosce il loro destino; il dirigibile non fu mai osservato dalle squadre di soccorso per cui, molto probabilmente, doveva essere affondato nel Mare di Barents.

Alcune operazioni di soccorso furono riprese nel 1929, anch'esse senza successo. La storia dell'incidente e dei sopravvissuti diede vita a una narrazione che ha a tutt'oggi la sua icona più rappresentativa nella tenda rossa ⁽⁹⁾ e che attirò l'interesse del grande pubblico intrecciandosi con tutta una serie di polemiche su Nobile sia in Italia sia in Norvegia ⁽¹⁰⁾. L'epica della tenda rossa ha portato a concentrare l'attenzione sui superstiti e non sui sei membri dispersi ⁽¹¹⁾ e a dimenticare gli aspetti scientifici della spedizione ⁽¹²⁾.

2. La misura del campo gravitazionale terrestre

Tra gli strumenti progettati per la spedizione polare, il gravimetro di Pontremoli ha un particolare interesse per il lungo contesto storico relativo alla misura del campo gravitazionale terrestre. Il gravimetro di Pontremoli venne costruito e si tentò di testarlo a Milano. La taratura vera e propria fu rimandata a quando lo strumento fosse giunto alla base della Baia del Re ma non è noto se tale taratura sia mai stata eseguita. Lo strumento non è attualmente rintracciabile né tra gli oggetti né nei documenti relativi alle apparecchiature riportate indietro in Italia dopo la fine drammatica della spedizione.

⁽⁹⁾ Sulla memorialistica all'origine dell'epica della tenda rossa, si vedano: [19–30].

⁽¹⁰⁾ Sulle polemiche su Nobile in Norvegia, si veda: [31].

⁽¹¹⁾ Pontremoli, ad esempio, fu ricordato soltanto localmente all'Università di Milano con una lapide nell'Istituto di Fisica Complementare inaugurata il 7 giugno 1930, un busto nell'Aula Magna inaugurata durante l'apertura dell'anno accademico 1930-31, una borsa di studio per studenti di Fisica istituita nel 1931, e l'intitolazione dell'Istituto di Fisica a suo nome nel 1932.

⁽¹²⁾ Gli unici testi sugli aspetti scientifici della spedizione sono i già citati [2] e [3].

Il valore dell'accelerazione di gravità g costituì per lungo tempo un ostacolo alla sua misura. Le richieste in precisione sul valore misurato impedivano di utilizzare la caduta di un grave in un tubo a vuoto date le piccole distanze e i piccoli intervalli di tempo di caduta coinvolti in corrispondenza dell'elevato valore di g . Per risolvere il problema di una misura di precisione occorre aumentare la durata del tempo di caduta e diminuire il valore dell'accelerazione di caduta vincolando il moto. Il pendolo semplice, soprattutto nella versione isocrona alla Huygens, permetteva di determinare il valore di g ⁽¹³⁾ con la semplice formula $g = 4\pi^2 l/T^2$ a partire dalle misure della lunghezza del filo l e del periodo di oscillazione T .

La misura di g con il pendolo in realtà doveva affrontare numerosi problemi. I principali erano: l'effettiva isocronia delle oscillazioni; la valutazione degli effetti dell'attrito dell'aria sul periodo; la stabilità della struttura di sospensione; la lunga durata della misura. La misura del periodo, per raggiungere una buona precisione, avveniva contando il numero di oscillazioni corrispondenti alla durata di un intervallo di tempo determinabile con tecniche astronomiche, ad esempio la durata di un giorno sidereo. Si poteva ottenere in tale modo il valore di T con un'incertezza relativa fino a un ordine di 10^{-5} . Una misura di l che garantisse un'incertezza relativa comparabile a quella della misura di T , per un pendolo con l dell'ordine del metro richiedeva che il valore di l fosse noto con un'incertezza assoluta di 10^{-2} mm, cioè una misura che richiedeva un microscopio. Alla difficoltà di determinare i punti estremi della lunghezza del filo con una tale precisione si aggiungeva il problema della variazione della stessa lunghezza al variare della sua temperatura. La misura di l richiedeva pertanto una continua misura della temperatura per tener conto delle variazioni di origine termica di l durante la misura su tempi lunghi. Un utilizzo storicamente importante del pendolo per misurare l'accelerazione di gravità si ebbe durante la spedizione in America equatoriale di Bouguer e La Condamine per la determinazione della forma della Terra [34]. La misura di g con il pendolo si standardizzò nel regolare il valore di l in modo tale che il pendolo battesse il secondo.

L'evoluzione successiva della meccanica portò a uno sviluppo della teoria del pendolo che venne considerato un corpo esteso con la conseguente introduzione del momento d'inerzia. Questo sviluppo non ebbe alcun effetto rilevante sulla precisione delle misure dell'accelerazione di gravità che poteva al massimo raggiungere un ordine di 10^{-2} m/s². Più che per una misura di precisione dell'accelerazione di gravità, uno stesso pendolo veniva di fatto utilizzato per confronti tra i valori misurati in diverse località. Con l'utilizzo del pendolo reversibile, inventato da Kater nel 1817, la precisione venne portata a fine Ottocento a un ordine di 10^{-5} m/s² ottenuta nelle misure assolute di gravità fatte a Potsdam tra il 1898 e il 1904 da Kühnen e Furtwängler e che furono prese come valore di riferimento del sistema di gravità di Potsdam nel 1908.

Quanto detto finora sulle misure eseguite usando un pendolo richiedeva la soluzione di uno dei problemi indicati più sopra: la stabilità della struttura di sospensione.

⁽¹³⁾ Sulla storia delle misure dell'accelerazione di gravità con il pendolo e con gli strumenti successivi si vedano [32] e [33].

Questa poteva essere garantita sulla terraferma ma non sul mare. A causa del moto ondoso, delle correnti, delle vibrazioni meccaniche della nave, nessuna struttura imbarcata sul mare poteva garantire la stabilità del punto di sospensione. Mentre l'ignoranza del valore dell'accelerazione di gravità su gran parte della terraferma era in linea di principio colmabile andando a misurare g potenzialmente in tutte le località, la stessa ignoranza sulla superficie del mare sembrava un ostacolo insormontabile. L'accelerazione di gravità era potenzialmente inconoscibile su due terzi della superficie del pianeta. Di conseguenza la forma della Terra, in quanto geoide, era in gran parte sconosciuta.

Nel 1894 si riunì a Innsbruck la conferenza della Commissione Permanente della Misura Internazionale della Terra. Riconosciuta l'ignoranza completa sull'intensità della gravità sulla superficie degli oceani, la Commissione decise di sostenere la proposta del geodeta Friedrich Helmert ⁽¹⁴⁾ di finanziare con 6000 marchi le ricerche sull'invenzione e la costruzione di strumenti per determinare g a bordo delle navi (si veda [37], pp. 57–58). La possibile soluzione intravista dalla Commissione si basava sullo sfruttamento dell'elasticità di un gas.

3. Le misure barometriche di gravità

Lo schema di un barometro per misure gravimetriche è in linea di principio un semplice tubo di vetro a U (vedi fig. 1), contenente una certa quantità di mercurio ⁽¹⁵⁾.

Nella colonna a sinistra, chiusa in alto, il mercurio raggiunge la quota indicata con A , lasciando vuota una parte della colonna di lunghezza y . Nella colonna a destra, aperta in alto in un normale barometro, il mercurio raggiunge la quota indicata con B , lasciando vuota una parte della colonna di lunghezza x . Alla quota B , sulla sezione della colonna a sinistra agisce la pressione P_m della colonna di mercurio di altezza h_m (data dalla distanza tra le quote A e B), sulla sezione della colonna a destra agisce la pressione atmosferica P_{atm} . All'equilibrio le due pressioni sono uguali: $P_{\text{atm}} = P_m = \rho_m h_m g$, con ρ_m densità del mercurio. Il barometro, pertanto, misura P_{atm} nota g oppure, equivalentemente, misura g nota P_{atm} .

Per misurare g occorre avere una misura indipendente di P_{atm} . Le soluzioni che si sono imposte storicamente sono due: 1) una doppia misura di P_{atm} , una col barometro a mercurio (dipendente da g) e una con un barometro aneroide (indipendente da g); 2) la chiusura della colonna aperta del barometro (quella a destra, in figura); in questo caso resta intrappolato nella colonna una quantità fissa di un gas (che non reagisca

⁽¹⁴⁾ Friedrich Helmert (Freiberg 1843-Potsdam 1917) fu uno dei più importanti geodeti tedeschi. Partecipò nel 1863 alla misura dell'arco di meridiano dell'Europa centrale. Fu professore ad Aquasgrana dal 1872 e a Berlino dal 1887, direttore dell'Istituto geodetico a Potsdam e presidente della commissione internazionale della misura della Terra. Formulò nel 1876 la distribuzione del χ^2 , in seguito ricavata indipendentemente da Karl Pearson nel 1900. Si vedano [35] e [36].

⁽¹⁵⁾ Vedremo nel seguito, analizzando il gravimetro di Pontremoli, perché i due rami non hanno necessariamente la stessa altezza.

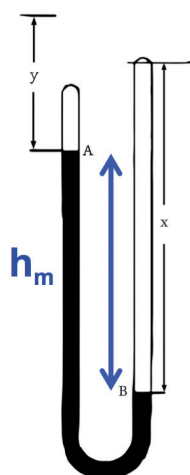


Fig. 1. – Schema elementare di funzionamento del gravimetro polare di Pontremoli.

chimicamente con il mercurio) che esercita sulla sezione B la pressione $P_g = nRT/V_g$, dove V_g è il volume occupato dal gas, T è la temperatura del gas. Una variazione di g , considerando il mercurio incompressibile per le precisioni in gioco, comporta una variazione congiunta di P_m e h_m che sono bilanciate da una variazione congiunta di P_g e V_g . Tarando il barometro chiuso a una g di riferimento e a una temperatura di riferimento, le misure congiunte di h_m (via misure di x e y) e di T permettono il calcolo del valore di g .

La prima soluzione, quella della misura contemporanea di P_{atm} con un barometro a mercurio (aperto) e un barometro aneroidale, fu impiegata per la prima volta da Bernhard von Wüllerstorff-Urbair ⁽¹⁶⁾ nel 1859 a Gibilterra, dove provò a misurare la differenza di gravità tra la base e la cima della rocca (un migliaio di piedi di dislivello). Nel 1866, nel descrivere qualitativamente il suo metodo [39], Wüllerstorff-Urbair propose di applicarlo a differenti latitudini per misure comparative di g . Il metodo di Wüllerstorff-Urbair permetteva potenzialmente di misurare g a bordo di una nave, ma i barometri aneroidali non erano ancora sufficientemente sviluppati per poter effettivamente mettere in atto il suggerimento di Wüllerstorff-Urbair.

La seconda soluzione, che richiedeva la chiusura completa del barometro in modo da impedire la misura della pressione atmosferica, ebbe maggiore successo e fu all'origine del gravimetro di Pontremoli. Il primo ad utilizzare il barometro per misure gravimetriche fu Éleuthère Mascart ⁽¹⁷⁾.

⁽¹⁶⁾ Bernhard von Wüllerstorff-Urbair (Trieste 1816-Gries 1883) fu vice-ammiraglio della marina imperiale austriaca. Partecipò alla spedizione oceanografica del 1857-1859, fu ministro del commercio nel 1865-1867, e si occupò della costruzione della rete ferroviaria dell'Impero Austro-ungarico. Si veda [38].

⁽¹⁷⁾ Éleuthère Mascart (Quarouble 1827-Parigi 1908) fu professore di fisica generale e sperimentale al Collège de France dal 1871. La sua attività di ricerca fu volta soprattutto a studi di ottica e di elettromagnetismo. Fu direttore del Bureau central météorologique dal 1878 e presidente del Comité météorologique international. Si veda [40].

TABELLA I. – Valori delle incertezze misurate e calcolate da Mascart [42].

	$\frac{dg}{g}$	dl (mm)	dn (s)
Amburgo	-0,00003	-0,03	+1,2
Stoccolma	-0,00003	-0,03	+1,1
Trondheim	-0,00024	-0,25	+10,6
Tromsø	-0,00007	-0,07	+3,1

Nel 1882 Mascart decise di mettere effettivamente in pratica l'idea di una misura barometrica della gravità: “Da molto tempo, si è avuta l'idea che sarebbe possibile misurare le variazioni di gravità, in diversi punti del globo, tramite l'altezza della colonna di mercurio che fa equilibrio alla pressione di una stessa massa di gas a temperatura costante. Ho cercato di mettere in pratica questo metodo: l'esperienza ha mostrato che è suscettibile della più grande precisione. L'apparecchio si compone di una sorta di barometro a sifone, il cui braccio corto è chiuso e contiene una certa quantità di gas. Per evitare l'ossidazione del mercurio e la perdita di pressione che ne risulterebbe, ho impiegato dell'acido carbonico; questo gas è stato introdotto a una pressione molto grande per fare equilibrio a una colonna di mercurio di 1 m, quando il tubo è tenuto verticalmente.” (si veda [41]: p. 1). Mascart usò un barometro gravimetrico in condizioni isoterme in due località con un dislivello di 180 m: il Collège de France a Parigi e Plessis-Piquet, una località dell'Île-de-France.

Secondo Mascart, la precisione teorica con cui si potevano determinare le posizioni dei livelli di mercurio nei due rami del tubo era di 0,01 mm nel caso di misure microscopiche. Se si fosse utilizzato il pendolo battente il secondo, una variazione della sua lunghezza di 0,01 mm avrebbe causato una variazione inferiore a 0,5 s nella durata di 1 giorno. Questa variazione era minore di 0,02 s nella durata di 1 ora, un valore pari a una precisione che difficilmente poteva essere ottenuta nell'osservazione delle oscillazioni di un pendolo.

Successivamente Mascart eseguì delle misure ad Amburgo, Copenaghen, Stoccolma, Trondheim e Tromsø, confrontandone i risultati con quelli delle misure eseguite a Parigi. Per motivi che Mascart non dettagliò, i risultati delle misure eseguite a Copenaghen non furono utilizzati. I valori riportati da Mascart in [42] sono riportati in tabella I.

Fu dodici anni dopo le misure di Mascart che Friedrich Helmert ⁽¹⁸⁾ fece la sua proposta alla conferenza di Innsbruck. L'assistente di Helmert a Potsdam, Oskar Hecker ⁽¹⁹⁾ progettò ed eseguì varie campagne di misura della gravità sugli ocea-

⁽¹⁸⁾ Su Friedrich Helmert si veda la nota ⁽¹⁴⁾.

⁽¹⁹⁾ Oskar Hecker (Bersenbrück 1864-Monaco 1938) fu assistente all'Istituto geodetico di Potsdam dal 1891. Fu direttore della stazione sismologica di Strasburgo dal 1910 e della stazione sismologica di Jena dal 1919. Si veda [43].

ni: nel 1901 sull'Oceano Atlantico con una spedizione Amburgo-Lisbona-Rio de Janeiro; nel 1904 sull'Oceano Indiano con la spedizione Bremerhaven-Melbourne; nel 1904 sull'Oceano Pacifico con la spedizione Sydney-Nuova Zelanda-San Francisco; nel 1904 nuovamente sull'Oceano Pacifico con la spedizione San Francisco-Yokohama-Shanghai-Hong Kong-Bangkok; nel 1904 nuovamente sull'Oceano Indiano con la spedizione Rangoon-Calcutta-Ceylon; nel 1909 sul Mar Nero con la spedizione Odessa-Sebastopol-Batumi [44–46]. Le misure di Hecker richiedevano un confronto tra un barometro chiuso e un ebulliometro che serviva a misurare la pressione atmosferica. I risultati ottenuti venivano ridotti in temperatura, al livello del mare (alla quota della superficie del geoide), e alla latitudine di Potsdam. L'analisi della precisione dei risultati tenne conto della posizione dei menischi che venivano fotografati, dell'effetto di parallasse e dei disturbi del moto della nave e dell'oceano. Altre campagne di misura barometrica della gravità sugli oceani furono compiute a partire dal 1914 da Walter Duffield ⁽²⁰⁾ (si vedano [48] e [49]) che aveva ripreso in parte l'idea di Wüllerstorff-Urbair di comparare le misure ottenute con un barometro a mercurio (aperto) e un barometro aneroidale. L'ignoranza sulla gravità sul mare, ancora totale nel 1894, veniva così gradualmente colmata. L'ignoranza permaneva invece ancora nelle zone polari artiche e antartiche. Questo era il problema alla cui soluzione si dedicò Pontremoli nel progettare un barometro gravimetrico per la spedizione polare del 1928.

4. Il gravimetro di Pontremoli

Il gravimetro progettato e costruito da Pontremoli è descritto dai suoi assistenti, De Mottoni e Pugno Vanoni, in [16] che, in assenza di ulteriori prove documentali, resta l'unica fonte a nostra disposizione per conoscere questo strumento. Conserveremo nella presente descrizione, con minimi cambiamenti, il formalismo usato dagli autori.

I principali problemi che dovevano essere risolti da Pontremoli erano: il gravimetro doveva funzionare sulla banchisa, cioè una superficie solida ma non necessariamente stabile, fatto che avrebbe causato influenze meccaniche causate dal terreno, dall'osservatore e dall'aria; il montaggio dello strumento e le operazioni di misura con le fotografie delle posizioni dei menischi dovevano essere effettuati in meno di 3-4 ore; lo strumento doveva essere piccolo e pesare meno di 10 kg per esigenze di trasporto; infine doveva resistere a tutte le sollecitazioni meccaniche durante il trasporto.

Il gravimetro di Pontremoli utilizzava l'azoto, in condizioni di gas perfetto, come gas elastico nel tratto x del tubo a destra. Conoscendo i valori di pressione p_0 e volume V_0 dell'azoto alla temperatura di 0°C , la pressione alla quota B alla temperatura Θ si ottiene dalla formula $p(\Theta) = p_0 \frac{V_0}{V(\Theta)} (1 + \alpha\Theta)$ con $\alpha = 1/(273,15^\circ\text{C})$. La pressione alla quota B nel ramo riempito da mercurio è data dalla formula $p(\Theta) = \rho_m g(x(\Theta) - y(\Theta))$, dove $x(\Theta)$ (risp., $y(\Theta)$) è la posizione del menisco nel ramo a sinistra (risp., a destra)

⁽²⁰⁾ Walter Duffield (Gawler 1879-Mount Stromlo 1929) fu professore di fisica a Reading. Dal 1924 fu direttore del Commonwealth Solar Observatory. Si veda [47].

misurata a partire da una posizione determinata (non necessariamente la stessa per i due rami del tubo). Uguagliando le due espressioni per $p(\Theta)$ (che non può essere misurata con il barometro chiuso) si ricava un'espressione per l'accelerazione di gravità

$$(1) \quad g = \frac{p_0 V_0}{V(\Theta)} \frac{1 + \alpha \Theta}{\rho_m} \frac{1}{x(\Theta) - y(\Theta)}.$$

Il volume $V(\Theta)$ dell'azoto varia in funzione della temperatura che, variando, varia sia l'altezza della colonna di x sia la superficie Ω della sezione del ramo occupato dall'azoto: $V(\Theta) = \Omega(\Theta)x(\Theta)$. Si può pertanto scrivere l'espressione (1) nella forma

$$(2) \quad g = \text{cost.} \cdot f(\Theta) \frac{1}{x(\Theta)(x(\Theta) - y(\Theta))},$$

dove $f(\Theta)$ è una funzione lineare in Θ che contiene i coefficienti di dilatazione termica di tutti i materiali componenti il gravimetro. L'espressione dettagliata di $f(\Theta)$ non è rilevante in quanto, come riconosce Pontremoli, è sufficiente che ci sia una corrispondenza biunivoca tra i valori di Θ e quelli di $x(\Theta) + y(\Theta)$ nell'intervallo di temperature in cui è usato il gravimetro.

Se si misura, alla stessa temperatura Θ , l'accelerazione di gravità in due località diverse, il rapporto tra i due valori si ottiene dalla (2):

$$(3) \quad \frac{g}{g'}(\Theta) = \frac{x'(\Theta)[x'(\Theta) - y'(\Theta)]}{x(\Theta)[x(\Theta) - y(\Theta)]}.$$

Scegliendo come valore di riferimento g' quello misurato g_b alla stazione base, si ottiene per la misura effettuata in qualsiasi altra località, nell'intervallo di temperatura di funzionamento del gravimetro, l'espressione per l'accelerazione di gravità:

$$(4) \quad g = g_b \frac{x_b(x_b - y_b)}{x(x - y)}.$$

Per poter utilizzare questa formula, occorre preparare un diagramma che ha come ascisse $(x_b + y_b)$ e ordinate $x_b(x_b - y_b)$ riportante i valori ottenuti dalle misure effettuate alla base di x_b e y_b a differenti temperature Θ . Non siamo a conoscenza del fatto se un tale diagramma sia mai stato preparato alla base della Baia del Re.

Per poter trascurare le variazioni indotte nella pressione dell'azoto p_a dalle variazioni di gravità conviene lavorare con la massima pressione e il massimo volume di azoto possibili, tenuto conto dei limiti imposti sulle dimensioni e sul peso del gravimetro dalle condizioni di trasporto. Il gravimetro fu costruito, con un compromesso tra le due opposte esigenze, con un volume di azoto di 4380 cm^3 e una pressione di $0,5 \text{ kg/cm}^2$ alla temperatura di 0°C .

L'incertezza sulla misura di g , dalla (4), e nelle condizioni di pressione e volume dell'azoto, viene indicata da Pontremoli come

$$(5) \quad \frac{\delta g}{g} = -\frac{\delta(x-y)}{x-y}.$$

Il dislivello $x - y$ misurato a Milano a 0° era di 380 mm, e le incertezze su x e y determinate nei tentativi di taratura, sempre a Milano, erano di 0,05 mm ⁽²¹⁾. Per l'incertezza relativa su g si otteneva pertanto un valore di

$$(6) \quad \frac{\delta g}{g} = 0,0000263,$$

cioè di una parte su circa 40.000, corrispondente a un'incertezza assoluta di

$$(7) \quad \delta g = 0,00025 \text{ m/s}^2.$$

Uno strumento potenzialmente così sensibile doveva essere protetto, durante le misure, dall'azione di perturbazioni esterne con opportune scelte tecniche di costruzione dello stesso ⁽²²⁾. Una forza esterna agente sul barometro poteva essere scomposta in due componenti, orizzontale e verticale, continuamente variabili in grandezza. La componente orizzontale non aveva alcun effetto sulla misura della gravità, pertanto occorreva progettare il barometro in modo tale da annullare l'effetto di azioni verticali. Pontremoli attuò contemporaneamente due soluzioni: 1) inserì nel tubo approssimativamente la stessa quantità di mercurio in modo tale che l'azione esterna verticale, agendo su masse quasi uguali, poteva influenzarle senza praticamente metterle in moto ⁽²³⁾; 2) i due rami del tubo, per un tratto lungo 100 mm, venivano ristretti a capillari del diametro di 1 mm, nelle parti riempite da mercurio.

Per garantire un campo termico uniforme nello strumento, il barometro fu coperto, tranne nelle parti del tubo e delle scale graduate corrispondenti ai valori di lettura in condizioni termiche polari, con una vernice riflettente di alluminio e una lamiera anch'essa in alluminio, fu rivestito con una struttura isolante di lana merinos e fibra vulcanizzata racchiusa in una struttura in legno di faggio paraffinato, entro la quale fu disposto un piccolo ventilatore sempre in funzione.

Presso la ditta Bonazzi di Milano, si procedette alle operazioni di soffiatura del tubo di vetro, al suo riempimento con azoto e mercurio purificati, e al suo montaggio nella struttura di legno. Presso la ditta Koristka di Milano furono costruite e assemblate allo strumento le componenti ottiche per l'illuminazione dei menischi e le riprese su pellicola fotografica. La ditta Zeiss di Jena fornì le scale graduate, con incertezza dichiarata di 0,001 mm. Per evitare danni durante il trasporto a bordo del dirigibile Italia, il gravimetro viaggiava appeso a un anello cardanico con una struttura di smorzamento delle vibrazioni meccaniche.

⁽²¹⁾ Le letture delle posizioni non venivano fatte direttamente, ma si eseguiva una registrazione automatica su pellicola fotografica che veniva analizzata a parte.

⁽²²⁾ Un problema analogo era stato affrontato in tutte le misure effettuate con barometri gravimetrici a bordo di navi.

⁽²³⁾ Avendo la parte restante dei due rami, una piena di azoto e l'altra con il vuoto barometro, fu necessario avere i due rami di altezze differenti, e ciò spiega lo schema riportato nella figura.

I test del gravimetro a bassa temperatura furono condotti da Pontremoli e dal suo collaboratore Arturo Sergio Beer e da Pasqualino Fadda dell'Istituto di Fisica dell'Università di Cagliari in camere frigorifere ad ammoniaca presso la ditta Dell'Orto a Milano. Lo strumento fu soggetto a più di 700 misure in un intervallo di temperature tra i -35°C e i $+10^{\circ}\text{C}$. Tutta una serie di problemi resero inconcludenti queste operazioni di taratura: l'impossibilità per l'operatore di lavorare all'interno della cella frigorifera portò a tenerne socchiusa la porta; questo fatto causava un gradiente termico all'interno della cella e l'ingresso di aria con un livello di umidità insostenibile a quelle temperature e che causava il deposito di ghiaccio sulle componenti metalliche. Pontremoli decise pertanto di rinviare la vera e propria taratura dello strumento alla base della Baia del Re. Lo strumento fu quindi spedito a Stolp e da lì alla Baia del Re.

Non risulta che il gravimetro di Pontremoli sia stato riportato in Italia. I due principali cimeli sopravvissuti sono la tenda rossa, attualmente in restauro, che sarà esposta al Museo Nazionale della Scienza e della Tecnologia "Leonardo da Vinci", e la radio Ondina campale S n° 3 conservata nel Museo Tecnico Navale della Marina Militare della Spezia. Altri cimeli sono conservati presso il Museo Storico dell'Aeronautica Militare e presso il Museo Civico "Umberto Nobile" di Lauro, ma in nessuno di questi musei attualmente risulta la presenza del gravimetro di Pontremoli.

5. Conclusione

Con un'incertezza relativa di misura dell'accelerazione di gravità pari a 0,0000263, il gravimetro di Pontremoli si poneva a ottimo titolo nel percorso storico di evoluzione delle misure gravimetriche, avendo la possibilità di effettuare misure con la stessa qualità di quelle condotte sulla terraferma e sugli oceani con gli usuali gravimetri barometrici. Permettendo la misura anche nelle zone polari, ovviando ai problemi posti dalle condizioni climatiche e dalle instabilità meccaniche della banchisa, un gravimetro di questo tipo avrebbe permesso di colmare l'ignoranza sul valore del campo gravitazionale e sulla forma della Terra anche nell'Artide.

Nel caso in cui il gravimetro di Pontremoli fosse stato effettivamente utilizzato, se si fossero riportati a Milano i risultati delle misure questi sarebbero stati il primo passo per una nostra migliore conoscenza della fisica delle zone polari. L'interruzione di questa linea di ricerca presso l'Istituto di Fisica Complementare di Milano a causa della morte di Pontremoli e le polemiche che hanno coinvolto in generale tutta la spedizione sorte durante le fasi di recupero dei superstiti non videro più per lungo tempo l'Italia in prima linea nello studio della fisica delle zone polari, in particolare della gravimetria, né nell'utilizzo del dirigibile come mezzo di trasporto per spedizioni scientifiche o esplorative ⁽²⁴⁾.

Dopo il periodo di assenza dalle regioni artiche, l'Italia è tornata ad essere un paese leader nelle attività di ricerche multidisciplinari nell'Artide grazie al C.N.R. che

⁽²⁴⁾ Umberto Nobile continuò a lavorare a progetti di ingegneria aeronautica su dirigibili in Unione Sovietica dal 1931.

dal 15 maggio 1997 gestisce la stazione artica “Dirigibile Italia” presso Ny-Ålesund nelle isole Svalbard. Le attività di ricerca della stazione italiana sono coordinate dal Dipartimento C.N.R. Scienze del Sistema Terra e Tecnologia per l’Ambiente, mentre quelle delle stazioni degli undici paesi presenti a Ny-Ålesund sono coordinate dal NySMAC (Ny-Ålesund Science Manager Committee), che è stato presieduto dall’Italia nel periodo 2001-2005. L’Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale è presente nei mari artici e antartici con la nave OGS Explora dal 1989 per ricerche di geofisica e oceanografia.

La gravimetria resta uno dei temi di interesse principale delle ricerche nell’Artide. I problemi che erano stati affrontati da Pontremoli nella progettazione del suo gravimetro restano a tutt’oggi invariati: l’instabilità della banchisa continua ad essere un ostacolo all’utilizzo delle tecniche di misura tipiche della terraferma favorendo lo sviluppo delle misure da aereo o da satellite; le condizioni climatiche impongono ancora la verifica preliminare del funzionamento degli strumenti alle basse temperature; le misure di precisione a bordo di aereo richiedono una riduzione dei disturbi meccanici causati dal volo. Una quantità sufficiente di dati per creare la prima mappa gravimetrica dell’Artide fu ottenuta solo nel 1998 [50]. Una maggiore conoscenza del gravimetro di Pontremoli da parte della comunità scientifica internazionale e un conseguente suo utilizzo in diverse esplorazioni gravimetriche avrebbe potuto portare a una più precoce soluzione di questo problema.

* * *

Ringrazio gli archivisti del Centro APICE dell’Università degli Studi di Milano dove è conservato il relativo Archivio Storico, in particolare la dott.ssa Gaia Riitano; il dott. Marco Iezzi, curatore della sezione trasporti del Museo Nazionale della Scienza e della Tecnologia “Leonardo da Vinci” di Milano.

Bibliografia

- [1] SURDICH F., “Nobile, Umberto”, in *Dizionario biografico degli Italiani*, Vol. **78** (Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma) 2013, *ad vocem*.
- [2] NOBILE U. (Editor), “Petermanns Mitteilungen”, *Ergänzungsheft*, **205** (1929).
- [3] NOBILE U. (a cura di), *La preparazione e i risultati scientifici della spedizione polare dell’“Italia”* (Mondadori, Milano) 1938.
- [4] JECH Č., *Czech. J. Phys.*, **49** (1999) 41.
- [5] FRANZÉN O., *Svenskt biografiskt lexikon*, Vol. **24** (Riksarkivet, Stockholm) 1982–1984, p. 77.
- [6] JUVIK L. H. *et al.*, *Verso l’estrema Thule. Bibliografi. Italienske reiser på Nordkalotten for 1945* (Universitetsbiblioteket i Tromsø, Tromsø) 2003.
- [7] GARIBOLDI L., “Pontremoli, Aldo”, in *Dizionario biografico degli Italiani*, Vol. **84** (Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma) 2015, *ad vocem*.
- [8] GARIBOLDI L., “The Founder of the First Institute of Physics of the Milan University: Aldo Pontremoli, a Physicist’s Life Between Adventure and Institutions”, in BORTIGNON P. F. *et al.* (Editors), *Toward a Science Campus in Milan* (Springer, Berlin) 2018 pp. 105–125.
- [9] GIORDANA G. P., *Vita di Aldo Pontremoli* (Formigini, Roma) 1933.
- [10] PUGNO VANONI E., *Il Nuovo Cimento*, **7** (1930) 41.
- [11] ARGENTIERI A., “Palazzo, Luigi”, in *Dizionario Biografico degli Italiani*, Vol. **80** (Roma, Istituto dell’Enciclopedia Italiana) 2014, *ad vocem*.
- [12] BÉHOUNEK F., *Petermanns Mitteilungen, Ergänzungsheft*, **205** (1929) 46.
- [13] MALMGREN F., *Petermanns Mitteilungen, Ergänzungsheft*, **205** (1929) 63.

- [14] NOBILE U., *Petermanns Mitteilungen, Ergänzungsheft*, **205** (1929) 9.
- [15] NOBILE U., *Petermanns Mitteilungen, Ergänzungsheft*, **205** (1929) 14.
- [16] DE MOTTONI G. e PUGNO VANONI E., *Petermanns Mitteilungen, Ergänzungsheft*, **205** (1929) 89.
- [17] PONTREMOLI A., *Petermanns Mitteilungen, Ergänzungsheft*, **205** (1929) 87.
- [18] PALAZZO L., *Petermanns Mitteilungen, Ergänzungsheft*, **205** (1929) 80.
- [19] ALBERTINI G., *Alla ricerca dei naufraghi dell'“Italia”, 1000 chilometri sulla banchisa* (Libreria d'Italia, Milano) 1929.
- [20] BĚHOUNEK F., *Sieben Wochen auf der Eisscholle: der Untergang der Nobile-expedition* (Brockhaus, Leipzig) 1929.
- [21] BIAGI G., *Biagi racconta: i miracoli della radio nella tragedia polare* (Mondadori, Milano) 1929.
- [22] GIUDICI D., *Col Krassin alla tenda rossa* (Moneta, Milano) 1928.
- [23] NOBILE U., *L'“Italia” al Polo Nord* (Mondadori, Milano) 1930.
- [24] NOBILE U., *Posso dire la verità: storia inedita della spedizione polare dell'“Italia”* (Mondadori, Roma) 1945.
- [25] NOBILE U., *La tenda rossa: memorie di neve e di fuoco* (Mondadori, Milano) 1969.
- [26] NOBILE U., *L'“Italia” al Polo Nord: 1928 l'ultima epopea del dirigibile* (Marsilio, Venezia) 1987.
- [27] SAMOILOWITSCH R., *S-O-S in der Arktis: die Rettungsexpedition des Krassin* (Deutsche Verlagsgesellschaft, Berlin) 1929.
- [28] TOMASELLI C., *L'inferno bianco: racconto della spedizione Nobile* (Unitas, Milano) 1929.
- [29] TROJANI F., *La coda di Minosse: vita di un uomo, storia di un'impresa* (Mursia, Milano) 1964.
- [30] VIGLIERI A., *48 giorni sul “Pack”* (Mondadori, Milano) 1929.
- [31] AAS S., *Polar Research*, **24** (2005) 5.
- [32] LAFEHR T. R., *Geophysics*, **45** (1980) 1643.
- [33] NABIGHIAN M. N. *et al.*, *Geophysics*, **70** (2005) 63.
- [34] BOUGUER P., *La figure de la Terre, Déterminée par les Observations de Messieurs Bouguer, & de la Condamine, de l'Académie Royale des Sciences, envoyés par ordre du Roy au Pérou, pour observer aux environs de l'Equateur. Avec une Relation abrégée de ce Voyage, qui contient la description du Pays dans lequel les Opérations ont été faites* (Jombert, Paris) 1749.
- [35] FISCHER W., *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. **7** (Charles Scribner's Sons, New York) 1973, pp. 239–241
- [36] SIGL R., *Neue Deutsche Biographie*, Vol. **8** (Duncker & Humblot, Berlin) 1969, pp. 497–498.
- [37] HIRSCH A. (Editor), *Verhandlungen der vom 5. bis 12. September 1894 in Innsbruck abgehaltenen Konferenz der permanenten Commission der internationalen Erdmessung* (Verlag von Georg Reimer, Berlin) 1895.
- [38] WURZBACH C. VON, *Biographisches Lexikon des Kaiserthums Österreich*, Vol. **58** (Zamarski, Wien) 1889, pp. 214–222.
- [39] WÜLLERSTORF-URBAIR B., *Z. Österreichis. Gesel. Meteorol.*, **1** (1866) 97.
- [40] STUEWER R. H., *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. **9** (Charles Scribner's Sons, New York) 1981, pp. 154–156.
- [41] MASCART E., *Comptes Rendus*, **95** (1882) 126.
- [42] MASCART E., *Comptes Rendus*, **95** (1882) 631.
- [43] KÖRBER H.-G., *Neue Deutsche Biographie*, Vol. **8** (Duncker & Humblot, Berlin) 1969, p. 184.
- [44] HECKER O., *Bestimmung der Schwerkraft auf dem Atlantischen Ozean sowie in Rio de Janeiro, Lissabon und Madrid* (Stankiewicz, Berlin) 1903.
- [45] HECKER O., *Bestimmung der Schwerkraft auf dem Indischen und Großen Ozean und an deren Küsten sowie erdmagnetische Messungen* (Stankiewicz, Berlin) 1908.
- [46] HECKER O., *Bestimmung der Schwerkraft auf dem Schwarzen Meere und an dessen Küste sowie neue Ausgleichung der Schwerkraftsmessungen auf dem Atlantischen Ozean* (Stankiewicz, Berlin) 1910.
- [47] ALLEN C. W., “Duffield, Walter Geoffrey (1879-1929)”, in *Australian Dictionary of Biography*, Vol. **8** (Melbourne University Publishing) 1981, *ad vocem*.
- [48] DUFFIELD W., *Rep. British Ass. Adv. Sci.*, **86** (1916) 549.
- [49] DUFFIELD W., *Proc. R. Soc. London*, **92** (1916) 502.
- [50] KENYON S. *et al.*, *EOS*, **89** (2008) 289.