



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO

Scuola di Dottorato in Fisica, Astrofisica e Fisica Applicata
Dipartimento di Fisica

Corso di Dottorato in Fisica, Astrofisica e Fisica Applicata
Ciclo XXXVIII

**Didattica della fisica nucleare
nella scuola secondaria di secondo grado:
progettazione, esperienze sul campo,
contenuti transdisciplinari
e recepimento normativo**

Settore Scientifico Disciplinare PHYS-06/B

Tesi di dottorato di:

Dott. Paolo TERUZZI
Matr. R13918
ORCID 0009-0008-6164-3831

Supervisore: Professor Nicola Gherardo LUDWIG
Coordinatore: Professor Aniello MENNELLA

Anno Accademico 2024-2025

Commissione dell'esame finale:

Revisori esterni:

Prof. Domenico Di Bari (Università degli Studi di Bari), Prof. Stefano Oss (Università degli Studi di Trento)

Membri esterni:

Prof. Onofrio Rosario Battaglia (Università degli Studi di Palermo), Prof. Domenico Di Bari (Università degli Studi di Bari), Prof. Claudio Fazio (Università degli Studi di Palermo)

Membro interno:

Prof. Nicola Gherardo Ludwig (Università degli Studi di Milano)

Esame finale:

Data 5 novembre 2025

Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Fisica, Milano, Italia

Indice

Introduzione	v
Il progetto di ricerca	v
Didattica della fisica nucleare: lo stato dell'arte	vi
Un corso di fisica nucleare per studenti della scuola secondaria	vii
Un corso di formazione per docenti della scuola secondaria	ix
"Armi nucleari, disarmo, proliferazione nucleare"	ix
Il confronto istituzionale: MASE e MIM	x
Nota metodologica	xi
Indice delle abbreviazioni e dei simboli	xi
 Parte I : L'insegnamento della fisica nucleare e l'innovazione didattica	 3
1 La didattica della FN	3
1.1 Lo stato dell'arte nell'università	3
1.2 Lo stato dell'arte nella scuola secondaria di secondo grado	6
1.3 Interesse e conoscenza della FN in studenti STEM	15
2 Progettazione di un corso di FN per studenti liceali	29
2.1 La FN nella scuola secondaria di secondo grado	29
2.2 Lezioni di FN per il liceo scientifico: la progettazione	33
2.3 Lezioni di FN per il liceo scientifico: l'esperienza sul campo	42
 Parte II: Formazione	 63
3 Proposta di un corso di FN per docenti	63
3.1 Le premesse per una progettazione	63
3.2 La progettazione del corso di formazione	66
3.3 Struttura, metodi e obiettivi del corso	69
3.4 I moduli del corso di formazione	72

4	Il corpus del corso “armi nucleari, disarmo e proliferazione nucleare”	135
4.1	Il Prof. Paolo Cotta-Ramusino e il corso sul disarmo nucleare	135
4.2	Il corso e i materiali	136
4.3	La collazione dei materiali e l’aggiornamento	137
	 Parte III : Recepimento delle proposte a livello normativo	 143
5	Il confronto con le istituzioni e la legge delega	143
5.1	PNNS: la Piattaforma Nazionale per un nucleare sostenibile	143
5.2	I lavori nei GdL	146
5.3	La legge delega	149
	 Conclusioni	 159
	 Appendici	 167
	 Allegati	 235
	 Bibliografia	 245
	 Ringraziamenti	 257

Due sono le finalità di questo progetto ed entrambe fanno riferimento alla fisica nucleare. La prima, più compilativa, è relativa all'organizzazione, all'ampliamento e a un'ampia divulgazione dei materiali didattici del corso universitario "Armi nucleari, disarmo e proliferazione nucleare", istituito dal dipartimento di fisica "A. Pontremoli" di questo ateneo, per tanti anni affidato al Prof. Paolo Cotta-Ramusino. La seconda prevede una riflessione sulla didattica della fisica nucleare nelle scuole superiori, finalizzata a una maggiore efficacia degli insegnamenti e alla progettazione di interventi metodologicamente innovativi di didattica della FN per la scuola secondaria di secondo grado.

Fin da subito ci si è resi conto che i due pilastri su cui poggia il progetto non erano svincolati. Inizialmente si è deciso di porre l'attenzione sui materiali didattici del corso del Prof. Paolo Cotta-Ramusino, sulla necessità di revisionarli e aggiornarli anche in vista di un'eventuale riedizione del corso, ricorrendo anche ad un ampio rimaneggiamento, per favorire una disseminazione dei contenuti a una platea ampia e in chiave di educazione alla cittadinanza attiva soprattutto delle generazioni più giovani. Tuttavia, per il suo carattere e per i suoi obiettivi questa attività si è incastonata a pieno titolo nell'altra, diventando parte integrante di un progetto di revisione della didattica della fisica nucleare per la scuola secondaria di secondo grado. Così la consequenzialità temporale delle due architravi del progetto è venuta meno e i due aspetti sono stati trattati parallelamente, mettendo in luce nessi reciproci anche non solo tematici e in parte non attesi.

Il progetto di ricerca

Per chi si avventura nei diversi filoni della didattica della fisica, o anche per chi ne ha più familiarità, può apparire curioso che la fisica nucleare sia raramente considerata. Eppure questa branca della fisica, ormai storicizzata, pienamente compresa ed accettata dalla comunità scientifica almeno nei suoi aspetti fondamentali, non è oggetto di riflessione né di discussione per quel che concerne l'efficacia della sua trasmissibilità. Ciò non accade per altri campi della fisica, come la relatività generale, la cosmologia o la fisica delle particelle, adatte certo a una divulgazione qualitativa, ma che risultano difficili da insegnare nella scuola secondaria, se si vuole superare una didattica descrittiva e banalizzante. È anche vero che di tanto in tanto si fanno richiami alla necessità di irrobustire l'apparato didattico della fisica nucleare e i legami con l'educazione civica e non mancano anche in letteratura esempi brillanti di sperimentazioni didattiche che restano spesso occasionali o locali. Resta comunque il fatto che le analisi delle criticità e le proposte per il loro superamento sono assenti dal dibattito tra specialisti.

Se in ambito internazionale una tradizione più solida favorisce l'insegnamento della fisica nucleare, in Italia i fattori che ne limitano un effettivo e positivo svolgimento sono identificabili in cause di tipo normativo, di contesto e di formazione, e per via di approcci e di apparati didattici spesso datati e poco adatti a una didattica attiva e inclusiva.

Questo lavoro di ricerca ha cercato di superare queste difficoltà, operando per la risoluzione delle problematiche che avviliscono la didattica della fisica nucleare, anche grazie all'interlocuzione con il mondo accademico, la scuola secondaria e le istituzioni interessate ai loro massimi livelli. Per quel che riguarda l'attività di ricerca, le principali azioni operate hanno riguardato:

1. un iniziale monitoraggio dello stato dell'arte anche per la valutazione dell'incidenza del gender gap sugli apprendimenti della fisica nucleare nella scuola secondaria e in ambito STEM,
2. una riflessione teorica sui migliori approcci filosofico-pedagogici per ottimizzare l'insegnamento della fisica nucleare,
3. la progettazione, la realizzazione e la valutazione di un corso pilota di fisica nucleare per studenti dei licei scientifici,
4. il perfezionamento delle lezioni e un ulteriore svolgimento del corso con studenti dei licei, con relativa valutazione,
5. la progettazione, la realizzazione e la valutazione di un corso di formazione pilota di fisica nucleare rivolto a una platea di docenti di una rete territoriale di licei,
6. il perfezionamento dei seminari e l'ampliamento del corso per un ulteriore svolgimento su scala più ampia, proposto al Dipartimento delle Pari Opportunità della Presidenza del Consiglio dei Ministri,
7. l'interlocuzione sistematica attraverso piattaforma istituzionale con il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) e con il Ministero dell'Istruzione e del Merito (MIM) per gli aspetti della formazione, dell'innovazione didattica e della divulgazione di temi di fisica nucleare,
8. la progettazione con modalità di ricerca-azione e la realizzazione di un workshop con studenti e docenti del liceo scientifico, mirato alla conoscenza della fisica del nucleare bellico, nell'ottica della riduzione della proliferazione nucleare e del disarmo (aggiornamento del materiale didattico del Prof. Paolo Cotta-Ramusino),
9. la realizzazione di un sito web per la pagina online del dipartimento di fisica "A. Pontremoli", finalizzato alla diffusione della cultura del disarmo nucleare (aggiornamento del materiale didattico del Prof. Paolo Cotta-Ramusino).

Didattica della fisica nucleare: lo stato dell'arte

Le fasi iniziali del lavoro hanno riguardato il monitoraggio degli apprendimenti di fisica nucleare al termine del corso di studi liceale e nel primo anno universitario, successivo all'immatricolazione in due tipologie di corsi STEM.

Dato che la fisica nucleare trova ampio spazio, quando viene insegnata, principalmente al liceo scientifico, si è deciso inizialmente di valutare il possesso delle conoscenze di base attraverso un questionario rivolto a tre gruppi di liceali, appartenenti a una rete

di scuole facenti capo a un territorio ad alti indicatori BES (benessere equo e sostenibile). Con lo stesso strumento si è indagata anche una popolazione di studenti universitari del primo anno di due corsi STEM, uno teorico, l'altro applicativo. La conoscenza della fisica nucleare è scarsa e in generale aggravata dall'incidenza del gender gap, eccetto che per quegli studenti che ne hanno affrontato i fondamenti anche per un tempo ridotto di tempo e che comunque ne possiedono solo una descrizione nozionistica.

La cornice istituzionale, inoltre, non facilita né l'insegnamento né l'apprendimento. Infatti le indicazioni nazionali per l'insegnamento, la valutazione di sistema e dei curricoli degli studenti a fine del corso di studi, le pratiche didattiche e le proposte di formazione non sottolineano l'importanza dell'insegnamento della fisica nucleare nella scuola secondaria. A questo si aggiunge un'ulteriore e pluriennale debolezza di contesto: i docenti della scuola secondaria titolari della cattedra di fisica spesso sono laureati in matematica e quindi senza conoscenze pregresse in fisica nucleare acquisite nel corso di laurea. Spesso anche i docenti laureati in fisica non hanno seguito insegnamenti di fisica nucleare. La conoscenza della fisica nucleare per questi docenti è quindi frutto di un apprendimento effettuato post-laurea, a volte grazie a corsi di formazione specifici, più spesso grazie ad attività di autoaggiornamento o alla consultazione dei manuali di testo destinati agli studenti. Quest'ultimo aspetto è particolarmente critico, dato che la preparazione dei docenti risulta superficiale e caratterizzata da lacune, mancati aggiornamenti e in qualche caso anche da errori gravi.

L'evidenza di un risultato così negativo, riconducibile esclusivamente a una carenza formativa, ha perciò indirizzato la ricerca alla progettazione di una serie di lezioni di fisica nucleare per liceali.

Un corso di fisica nucleare per studenti della scuola secondaria

L'evoluzione storica della fisica nucleare, le questioni interpretative che pone, l'affermazione di un modello fisico esaustivo per la spiegazione dei fenomeni sono alcune caratteristiche di questa branca della fisica che può fornire contributi importanti nella formazione degli studenti della scuola secondaria. Attraverso lo studio della fisica nucleare gli studenti possono confrontarsi con gli sviluppi della ricerca di base, con le speculazioni teoriche anche di ambito transdisciplinare (astrofisica nucleare, nucleosintesi) e con le applicazioni (fisica sanitaria, fisica per i beni culturali, caratterizzazione industriale, fisica per l'ambiente...). Occorre evidenziare da subito che l'insegnamento della fisica nucleare nelle scuole secondarie di secondo grado non può essere inteso nella sua accezione accademica. Una proposta di insegnamento della fisica nucleare nei licei non può avere infatti come riferimento la tradizione didattica universitaria. La mancanza di prerequisiti matematici, la completa assenza dei contenuti di meccanica quantistica, l'esperienza degli studenti ancora poco robusta in ambito scientifico non permettono di affrontare la fisica nucleare nella sua completezza. Il formalismo compiuto della fisica nucleare, il rigore teorico e l'ampiezza della strumentazione matematica, l'inquadramento nella cornice della meccanica quantistica non sono obiettivi raggiungibili da uno studente della scuola secondaria di secondo grado. In questo senso non è possibile affermare che una proposta di fisica nucleare per la scuola secondaria permette la comprensione profonda della fisica nucleare se con comprensione profonda intendiamo quella appena esposta. Questi obiettivi, del resto, esulano dalle finalità della scuola secondaria, per la quale la conoscenza della fisica in generale, non solo di quella nucleare, non può essere paragonata a quella universitaria. I percorsi scolastici pre-diploma infatti hanno lo scopo di far acquisire capacità di osservazione, conoscenze di base della disciplina e caratteristiche del metodo scientifico, di fornire gli strumenti per costruire e validare semplici modelli

interpretativi dei fenomeni e di inquadrare alcune sezioni della disciplina nell'ambito più ampio del suo sviluppo storico e dell'educazione civica. Del resto la pretesa esclusiva di porre obiettivi più ambiziosi non realisticamente conseguibili finirebbe per ridurre l'insegnamento della fisica a una ripetizione di semplici osservazioni sperimentali o all'esercizio scolastico dell'applicazione di semplici formule. Se in mancanza del calcolo differenziale si rinunciassero a spiegare i principi di Newton, le leggi della termodinamica o il formalismo dell'elettromagnetismo, non accettando la semplificazione liceale basata solo sull'algebra, l'insegnamento della fisica nella scuola secondaria sarebbe relegato a misure di densità, di temperature o al calcolo della forza peso o dell'angolo di rifrazione. Una proposta di insegnamento della fisica nucleare va quindi letta in questa accezione: si tratta dell'introduzione ai fondamenti della fisica nucleare attraverso lo studio di evidenze sperimentali, l'esposizione di fenomeni, la formulazione di modelli semplici per la loro comprensione, privata della cornice della meccanica quantistica ma allo stesso tempo utile per incuriosire gli studenti e fornire loro un primo set di conoscenze e teorie che, se non permetteranno di conoscere come si calcolano le regole di selezione, tuttavia consentirà loro di sapere cos'è un decadimento nucleare e di possedere il concetto di tempo di dimezzamento. Infine lo studio della fisica nucleare così intesa fornisce allo studente l'opportunità di confrontarsi criticamente con contenuti necessari al compimento di scelte consapevoli di cittadinanza, come quelli legati alla sostenibilità energetica da fissione e da fusione nucleare, o all'impiego del nucleare bellico.

In questa prospettiva, i quadro di contesto non favorevole e al tempo stesso le diverse opportunità educative e formative offerte dalla fisica nucleare sono state le premesse per riflettere su una serie di lezioni impostate su una didattica attiva e inclusiva, con particolare riferimento alla tradizione dell'IBL (Inquiry Based Learning).

Da subito è risultata evidente la necessità di approfondire alcuni aspetti pedagogici e di individuare il miglior approccio filosofico per la realizzazione di tale percorso didattico. Si è così approfondito il legame tra l'IBL e la tradizione pragmatista di scuola anglosassone. L'analisi dell'esperienza conoscitiva e le metodologie individuate dagli esponenti di questa scuola nell'ambito di quella che nel lessico tecnico viene definita "problematizzazione dell'esperienza", sono quelli dell'IBL, anche se sviluppati in forma più rudimentale. Questo approccio ha quindi permesso di svolgere una riflessione anche sulle tecniche intese come insieme delle pratiche e dei sussidi per l'apprendimento e di ragionare sugli effetti degli strumenti didattici e sul ruolo che possono avere nell'inclusione didattica. Queste premesse hanno portato a formulare un'ipotesi grezza di lezioni di fondamenti di fisica nucleare da rivolgere a studenti degli ultimi anni del loro corso di studi. L'impianto di queste lezioni è stato radicalmente diverso da quello proposto nei testi scolastici. Per gli aspetti di merito si è preferito affrontare lo studio dei fenomeni fondamentali della fisica nucleare (nomenclatura, instabilità, decadimenti, fissione e fusione) attraverso un approccio legato più agli aspetti energetici, mettendo da parte la tradizionale impostazione descrittiva prevalente nelle prassi didattiche nei licei. Dal punto di vista metodologico sono state pensate diverse attività di inclusione degli studenti (individuali e per gruppo), favorite dall'uso di apparati e strumenti per l'apprendimento, pensati per l'attivazione del pensiero critico e per l'inclusione di tutti gli studenti, soprattutto quelli che per diversi motivi hanno trovato ostico il confronto con la fisica.

Il primo e il secondo ciclo di lezioni sono stati rivolti a studenti del quarto anno del liceo scientifico, che hanno partecipato per gruppi di interesse e in forma extra-curricolare. Il corso si è concentrato sui fondamenti della fisica nucleare, svolti privilegiando un approccio energetico a una semplice descrizione e matematizzazione dei fenomeni nucleari. Questa esperienza, positiva per l'adesione e il gradimento dei partecipanti, ha

mostrato tuttavia qualche criticità, corretta ex-post sulla base delle risultanze raccolte. Si è così rivista la progettazione del corso che è stato poi rivolto in forma curricolare a studenti del quinto anno del liceo scientifico. Questo setting d'aula ha permesso una più attenta valutazione delle novità metodologiche e delle ricadute del corso in termini di apprendimento e di gradimento.

Un corso di formazione per docenti della scuola secondaria

Lo scarso rilievo attribuito alla didattica della fisica nucleare dovuta alle cause individuate e già succintamente esposte ha fatto emergere l'esigenza di un rinnovamento dell'offerta formativa in questo campo. Le esperienze condotte con gli studenti hanno permesso di perfezionare un percorso didattico innovativo per contenuti, per metodi e per obiettivi formativi, effettivamente spendibile in aula. Sulla scorta di questi risultati, si è quindi organizzato un corso per docenti della scuola secondaria di secondo grado, suddiviso in tre moduli da dieci ore l'uno, valido per la formazione/aggiornamento in servizio, con le seguenti caratteristiche:

1. primo modulo: 5 incontri focalizzati sui fondamenti di fisica nucleare (contenuti e strumenti per una didattica attiva e inclusiva), sulla ricerca di base, sulle applicazioni alla fisica sanitaria e all'archeometria;
2. secondo modulo: 5 incontri relativi alle applicazioni (astrofisica nucleare, fisica ambientale, fisica nucleare per i beni culturali, produzione di energia da fissione e fusione, radioprotezione e trattamento dei rifiuti nucleari);
3. terzo modulo: 5 incontri con docenti e studenti in forma di workshop su tematiche relative alla storia del nucleare bellico, agli effetti dei test e dei bombardamenti nucleari, alle politiche di disarmo e all'evoluzione dei trattati per la riduzione della proliferazione nucleare.

In quest'ultimo segmento è stata data particolare importanza alla dimensione transdisciplinare dei temi trattati, che spaziano certamente dalla fisica alla storia, dalla filosofia alle arti visive e all'educazione civica. Per questa ragione, il corso è stato aperto a docenti non solo di matematica e fisica, ma anche di storia, filosofia, informatica e storia dell'arte. Le attività svolte con gli studenti, guidati nella preparazione di esposizioni pubbliche da tenere nelle diverse fasi dell'workshop, hanno consentito di produrre sintesi ad ampio spettro tematico e di diverso approfondimento e ha favorito la costruzione di materiali didattici utili anche all'orientamento e per una educazione alla cittadinanza attiva, conforme alle finalità di tutte le discipline e in particolare dell'educazione civica.

Il corso di formazione è stato svolto presso il liceo "A. Banfi" di Vimercate, all'interno del piano nazionale PNRR¹ e aperto ai licei della rete di Monza e Brianza, che hanno aderito ampiamente.

"Armi nucleari, disarmo, proliferazione nucleare"

Il terzo modulo del corso di formazione per docenti della scuola secondaria di secondo grado ha fornito un'ottima collocazione per lo sfruttamento del repository dei materiali del corso "Armi nucleari, disarmo, proliferazione nucleare", tenuto dal Prof. Paolo Cotta-Ramusino presso il Dip. di Fisica dell'Università degli Studi di Milano.

¹Missione 4 componente 1 (formazione del personale scolastico per la transizione digitale, Rinnovamenti M4C1I2.1-2023-1222-P-36049).

Come sopra anticipato, uno degli scopi di questo progetto di ricerca ha riguardato la collazione dei materiali del corso del Prof. Cotta-Ramusino, la loro riorganizzazione, l'ampliamento anche per una divulgazione più ampia, attraverso canali non solo accademici. Dopo aver partecipato come studente uditore alle lezioni del corso e grazie all'interlocuzione con il Prof. Cotta-Ramusino, è stato così possibile perseguire lo scopo del progetto, realizzando una pagina web² disponibile sul sito di dipartimento che potesse essere la sede per una completa rassegna dei materiali del corso aggiornati e ampliati e al tempo stesso uno strumento per una consultazione agile soprattutto da parte di utenti più giovani e dalle collettività educative anche in chiave di educazione alla cittadinanza attiva. Il progetto si è concluso con l'attivazione di una tesi di laurea magistrale centrata sull'evoluzione del corso, dalla sua genesi, fino agli ultimi anni in cui è stato profondamente rinnovato anche a causa del contesto geopolitico attuale e dei conflitti in corso.

Il confronto istituzionale: MASE e MIM

A fianco dell'attività di ricerca, lungo l'intero arco di tempo del progetto, si è sempre cercato di favorire la massima divulgazione possibile delle iniziative sviluppate, non solo all'interno della comunità accademica attraverso la partecipazione a seminari, congressi nazionali e internazionali, o nel dialogo con il mondo dell'educazione e della formazione, ma anche presso enti e istituzioni che nello stesso periodo si stavano adoperando per favorire una riflessione ad ampio raggio su quella che con un'espressione brutta ma sintetica può essere definita "cultura del nucleare".

Se all'interno dell'università non sono mancate occasioni di confronto, così come nel mondo della scuola secondaria, meno immediata è stata l'interlocuzione con enti di ricerca, ordini professionali, enti e associazioni dedicati alla riflessione e alla diffusione della cultura del nucleare.

Una fortunata coincidenza di finalità progettuali si è venuta a creare nel momento in cui il Ministero dell'ambiente e della sicurezza energetica (MASE) ha costituito una piattaforma nazionale per il nucleare sostenibile (PNNS) rivolta alle comunità di ricercatori, professionisti e in generale a chiunque a diverso titolo avesse competenze adatte a contribuire ai lavori della piattaforma stessa. La PNNS, suddivisa in tavoli di lavoro tematici (Contesto, Tecnologie di fissione, Tecnologie di fusione, Sicurezza e prevenzione, quadro normativo, certificazione, Rifiuti e decommissioning, Formazione ed educazione, Aspetti trasversali) ha rappresentato anche per questo specifico progetto di ricerca l'opportunità di dividerne l'iter e i risultati, favorendo l'eventuale replicabilità delle esperienze formative. Un'attività di ricerca che avrebbe potuto terminare nell'esperito delle aule universitarie, di un contesto territoriale circoscritto o di attività per addetti ai lavori, ha così trovato ampia risonanza a livello istituzionale e ha aperto un canale di confronto spesso debole o difficilmente attivabile. I documenti stilati dai diversi gruppi di lavoro della PNNS sono stati infine redatti in una pubblicazione per il MASE, che ha permesso la formulazione di una legge delega al governo per il nucleare sostenibile³.

La partecipazione ai gruppi di lavoro ha favorito inoltre l'apertura di un confronto interministeriale, tuttora in nuce e ancora pienamente da sviluppare, che coinvolge il Ministero dell'Istruzione e del Merito (MIM) e il MASE sul tema della formazione pre-diploma e sull'aggiornamento delle linee guida per l'insegnamento per la scuola secondaria, che sono tuttora in corso di rivisitazione, con lo scopo di valorizzare l'inse-

²www.disnuc.fisica.unimi.it

³Comunicazione della Presidenza del Consiglio del 28 febbraio 2025.

gnamento della fisica nucleare. Parallelamente a questa sinergia, si continua a migliorare l'esperienza finora svolta, anche nella prospettiva di ampliare la platea di soggetti a cui rivolgere le attività di formazione, che nelle occasioni di confronto con il mondo accademico e quello dell'istruzione pre-diploma sono state sollecitate.

Nota metodologica

I capitoli della presente tesi sono scritti in lingua italiana per agevolare l'eventuale consultazione ai membri delle comunità educative interessate ai risultati ottenuti nel lavoro di ricerca.

Indice delle abbreviazioni e dei simboli

ABM	Anti Ballistic Missile
AGATA	Advanced GAMMA-ray Tracking Array
AIF	Associazione per l'Insegnamento della Fisica
BES	Benessere Equo e Sostenibile
BWR	Boiling Water Reactor
BYOD	Bring Your Own Device
CATI	Computer Assisted Telephone Interviewing
CAWI	Computer Assisted Web Interviewing
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
CR	Computed Radiography
CTT	Classical Test Theory
DNPT	Deposito Nazionale dei rifiuti radioattivi e Parco Tecnologico
DS	Dirigente scolastico
EPR	European Pressurized Reactor
FN	Fisica nucleare
IAEA	International Atomic Energy Agency
IBA	Ion Beam Analysis
IBL	Inquiry Based Learning
INF	Intermediate-Range Nuclear Forces Treaty
INFN	Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
INVALSI	Istituto nazionale per la valutazione del sistema educativo di istruzione e di formazione

IRT	Item Response Theory
ISOL	Isotope Separation On-Line
ISTAT	Istituto Nazionale di Statistica
ITS	Istituti Tecnici Superiori
LASA	Laboratorio Acceleratori e Superconduttività Applicata
LFR	Lead-cooled Fast Reactor
MASE	Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica
MIM	Ministero dell’Istruzione e del Merito
MMR	Micro Modular Reactor
MTCR	Missile Technology Control Regime
NPT	Non Proliferation Treaty
NUPECC	Nuclear Physics European Collaboration Committee
OECD	Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico
PBL	Project Based Learning, Problem Based Learning o Planet Boundary Layer
PET	Positron Emission Tomography
PCTO	Percorsi per le Competenze Trasversali e l’Orientamento
PLS	Piano Lauree Scientifiche
PNRR	Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza
PNNS	Piattaforma Nazionale per il Nucleare Sostenibile
PWR	Pressurized Water Reactor
SALT	Strategic Arms Limitation Talks
SIF	Società Italiana di Fisica
SIPRI	Stockholm International Peace Research Institute
SNEPT	Sustainable Nuclear Energy Technology Platform
SOGIN	Società Gestione Impianti Nucleari
SPECT	Single Photon Emission Computed Tomography
START	Strategic Arms Reduction Treaty
STEM	Scienza, Tecnologia, Ingegneria e Matematica
TC	Computed Tomography
TPACK	Technology, Pedagogy And Content Knowledge

TPNW	Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons
TRISO	TRi-Structural ISOtropic Particle Fuel
UE	Unione Europea
UNIMI	Università degli Studi di Milano
USPID	Unione degli Scienziati Per Il Disarmo

L'elemento X della tavola periodica, di numero atomico Z e numero di massa A , sarà così indicato:



L'isotopo X avente numero di massa A sarà così indicato:



oppure anche X (a parole) seguito dal numero di massa, per esempio: il potassio con numero di massa 40 sarà anche citato come ${}^{40}K$ oppure potassio 40.

Gli acronimi saranno indicati senza punto: la Società Italiana di Fisica, per esempio, sarà indicata con la dicitura **SIF** e non **S.I.F.**

Parte I

L'insegnamento della fisica nucleare e l'innovazione didattica

1.1 Lo stato dell'arte nell'università

1.1.1 L'evoluzione storica della FN: dalle prime scoperte alla didattica universitaria

Dalle prime scoperte di Henri Becquerel del 1896 ad oggi è trascorso poco più di un secolo e in questo arco di tempo si possono individuare alcuni momenti significativi dell'evoluzione storica dalla radioattività alla FN.

Alla fine del XIX secolo, in soli quattro anni, la fisica delle radiazioni giunge a tre scoperte cruciali, che segneranno sia la fisica teorica che quella sperimentale della prima metà del Novecento [157]:

1. scoperta dei raggi X (1895) [81];
2. scoperta della radioattività (1896) [170];
3. rivelazione degli elettroni (1897) [18].

Secondo un'opinione diffusa il fenomeno della radioattività è stato facilmente e immediatamente interpretato, mentre la modellazione della FN è stato un processo lento e controverso, comprensibile solo dopo la sua completa formalizzazione nel paradigma quantistico [25]. Contrariamente a questo convincimento, in letteratura diversi contributi dimostrano che ogni momento dell'intera evoluzione è stato caratterizzato da una lenta interpretazione dei dati sperimentali e da un dibattito acceso tra specialisti. Soprattutto a valle delle prime scoperte, il confronto scientifico ha risentito della sfida posta dall'interpretazione dei segni, ma anche di limiti di linguaggio [11, 93, 171], come spesso accade nel passaggio dal contesto della scoperta al contesto della giustificazione. In questo ambito le ipotesi dei "raggi uranici" [142, 19] e della "luce nera" [111] sono il miglior esempio che confuta l'idea di una radioattività come isola felice della scienza dove il dato sperimentale emerge semplicemente e nella sua chiarezza, in contrapposizione a una modellazione teorica complessa che non trova mai il bandolo della matassa.¹ Senza voler fare un excursus di storia della FN, che esula dagli scopi di questo lavoro, sulla difficoltà a interpretare anche i fenomeni nucleari che oggi appaiono semplici può essere utile ricordare che senza il contributo geniale e fuori dal coro di Marie Curie, sarebbe

¹Nel 1896 Gustave Le Bon titolò così una comunicazione all'Académie des Sciences, in cui sosteneva che le proprietà dei raggi rivelati da Röntgen non erano legati ai materiali e alle radiazioni che li attraversavano, ma a un limite dell'occhio umano incapace di vedere quella che da Le Bon venne chiamata luce nera. Al contrario, i lavori di Becquerel che permisero di caratterizzare compiutamente le proprietà della radiazione emessa dai nuclei e differenziarla dalla radiazione X non furono concepiti all'interno di un percorso lineare, ma semmai di un dibattito acceso che coinvolse diversi scienziati di cui alcuni di spicco, come C. Henry, G. H. Niewengulski e H. Poincaré.

stato difficile circoscrivere la radioattività a un fenomeno di tipo atomico. Sfruttando esperimenti sul torio, infatti, la scienziata francese fu la prima a verificare tramite il dispositivo elettrico da lei progettato che oltre all'uranio anche altri elementi possedevano le stesse proprietà radioattive. Mentre gli altri fisici si ostinavano a legare le proprietà radioattive ai fenomeni della fluorescenza e quindi senza vederne l'origine atomica, attraverso gli esperimenti sulla calcolite e su due tipi di plechblenda che la portarono a scoprire il polonio e il radio, Marie Curie aveva intuito che le ragioni del fenomeno della radioattività andavano cercate nella materia stessa [48].

Si verificò qualcosa di analogo anche quando la comunità scientifica si arrese all'ipotesi che i cosiddetti raggi alfa non erano onde ma particelle. Di per sé l'ipotesi ondulatoria poteva essere sostenuta senza grandi difficoltà, cosa che fu infatti sostenuta dalla scuola francese, di stampo positivista, che faceva capo ai coniugi Curie. Fu solo una serie di lavori del fisico britannico R. J. Strutt [163] e il delicato esperimento di Rutheford [150], [151] a mettere le basi per la "Transformation Theory" secondo la quale i raggi alfa avevano un comportamento di tipo corpuscolare non assimilabile a quello di una radiazione ondulatoria. La scuola pragmatistica inglese aveva decrittato i segni dei nuovi esperimenti e formulato un nuovo apparato linguistico che avrebbe portato alla corretta interpretazione della natura dell'emissione alfa. All'interno della stessa teoria si riuscì a precisare che la radioattività non poteva essere spiegata come una reazione chimica convenzionale, che peraltro comportava una serie di ostacoli teorici non banali. Il riconoscimento della particella alfa come atomo di elio, i lunghi tempi di "trasformazione" di alcuni radioelementi, l'esistenza di una successione di stadi intermedi tra il radioelemento padre e il prodotto finale della trasformazione permisero a Rutheford e Soddy, anche in questo caso, di abbandonare l'idea che la radioattività fosse un fenomeno di riaggregazione chimica, ma che doveva essere ricondotto a dinamiche interne all'atomo stesso [162].

Si potrebbe continuare a elencare gli snodi interpretativi che dalla spiegazione della radioattività hanno portato all'attuale architettura della FN – gli esempi più noti sono forse quelli legati al travaglio che ha condotto all'interpretazione della fissione nucleare [178], così come alla risoluzione della stabilità nucleare [57] [182] o al collocamento dei fenomeni nucleari nella prospettiva della meccanica quantistica [74, 44, 43, 73]. Si osserverebbe che l'evoluzione storica del paradigma della FN è stata particolarmente accidentata, segnata da profonde divergenze interpretative e che ha sfidato a più riprese la comunità scientifica in un approfondimento e in un rinnovamento concettuale che, pur giovando ancora di condizioni sperimentali non complesse, ha rappresentato un'impresa ardua sotto ogni aspetto caratteristico della ricerca scientifica.

1.1.2 L'attuale sistematizzazione della FN

Una rapida consultazione dei testi universitari di FN mostra che già nel primo dopoguerra si era raggiunta una completa comprensione dei fenomeni nucleari e una loro esauriente spiegazione trasmissibili agli studenti. L'impianto concettuale della FN era ormai stato chiarito nei suoi aspetti fondamentali, anche grazie allo sfruttamento del paradigma quantistico per una rigorosa formalizzazione teorica. Il tentativo pionieristico di Gamow di studiare la FN attraverso lo strumento della meccanica quantistica aveva trovato in Heisenberg [94], Majorana [120] e soprattutto in Fermi [62] dei convinti sostenitori e continuatori. Restava certo, come resta tuttora, qualche zona d'ombra in merito alla descrizione dell'interazione forte nella sua manifestazione di forza nucleare, ma questi dettagli non hanno impedito e non impediscono per esempio di spiegare comportamenti nucleari macroscopici come effetto di fenomeni microscopici (si pensi per esempio

alla deformazione del nucleo come effetto dell'interazione nucleare tra nucleoni mediata da pioni e tra quark e gluoni).

Se guardiamo a un testo di quegli anni [102] composto da circa 770 pagine, si nota che il volume sintetizza nelle prime 100 pagine le nozioni di chimica, fisica atomica e teoria della radiazione con scarsi riferimenti alla problematizzazione posta dall'evoluzione storica richiamata nel precedente paragrafo. Nelle parti successive trovano spazio la descrizione del nucleo (costituenti, isotopia, decadimenti, reazioni nucleari, energia di legame, modelli nucleari) per circa 450 pagine, alcune particolari applicazioni (fonti di energia, acceleratori di particelle) per circa 70 pagine, approfondimenti (fisica del neutrone, fissione nucleare) per altre 70 pagine e una serie di appendici che occupano 60 pagine. Appare evidente che un testo simile, preso a titolo d'esempio, insiste ancora molto su una descrizione semplice del nucleo e comunque sufficiente a spiegare molti fenomeni di origine nucleare. Per motivi ovvi, in quella generazione di libri di testo mancava ancora il robusto contributo della meccanica quantistica e tutta una serie di riferimenti alle applicazioni che si sarebbero sviluppate solo in seguito (FN per la medicina, astrofisica nucleare, FN per i beni culturali...).

Gli attuali insegnamenti universitari di FN in corsi di laurea specifici o tecnici, così come i testi e la letteratura a cui fanno riferimento, hanno subito un'ulteriore evoluzione che valorizza la meccanica quantistica come riferimento privilegiato per la deduzione delle spiegazioni dei comportamenti e dei fenomeni nucleari. Sfruttando le diverse tecnologie maturate grazie alla FN sviluppate negli ultimi ottant'anni questi testi hanno avuto anche la possibilità di ampliare la sezione relativa alle applicazioni. Questi cambiamenti non hanno però completamente rivoluzionato l'impianto che si poteva già riscontrare nella generazione precedente dei manuali. Un libro, ormai anch'esso datato, ma comunque di riferimento e tuttora in uso nei principali corsi universitari, nella sua proposta innovativa presenta comunque lo stesso progetto editoriale dei libri degli anni '60 [107].

L'evoluzione dei libri di riferimento per la didattica universitaria si è accompagnata al cambiamento della didattica stessa. Pur mantenendo la tradizionale offerta formativa, i dipartimenti universitari hanno declinato gli insegnamenti di FN in funzione delle acquisizioni teoriche, dei risultati sperimentali, delle innovazioni tecnologiche relative alle nuove facilities e delle applicazioni sempre più variegata e avanzate, dalla medicina all'ambiente, dall'astrofisica all'archeometria. Se negli anni '50 non era possibile pensare a lezioni relative alle datazioni tramite la misura della concentrazione del carbonio 14 [115], il cui metodo era appena stato ipotizzato da Willard Frank Libby, oggi non solo si insegna il metodo del radiocarbonio, ma vengono prese in esame diverse metodologie di datazione con radioisotopi, non solo per corsi di laurea scientifici, ma anche per saperi transdisciplinari che coinvolgono per qualche motivo le applicazioni di FN. Per gli stessi motivi, non sarebbe stato ipotizzabile anche solo qualche anno fa l'insegnamento di alcune innovative tecniche nucleari applicate in medicina, come l'adroterapia con protoni o ioni pesanti, che pur rappresentando tuttora una frontiera della medicina nucleare sono già oggetto di insegnamento nei corsi di laurea STEM e post-laurea [158], con sperimentazioni didattiche estese anche a studenti della scuola superiore [83]. Inoltre, le occasioni di confronto interne agli atenei (singoli seminari, corsi specifici, attività congressuali, workshop, ...) rappresentano un importante affiancamento alla didattica ordinaria, tale da favorire il continuo apprendimento e aggiornamento sia per gli studenti che per il personale docente.

1.2 Lo stato dell'arte nella scuola secondaria di secondo grado

1.2.1 L'insegnamento pre-universitario della FN nel quadro internazionale

La scarsità di dati presenti in letteratura non consente un'agevole ricognizione dello stato dell'arte dell'insegnamento della FN a livello internazionale per quel che riguarda i livelli scolastici pre-universitari.

L'assenza di lavori in merito a progettazioni approfondite e ad ampie esperienze di insegnamento fa ipotizzare che non sia mai stata affrontata in termini robusti la questione della didattica della FN, anche in quei paesi in cui la FN è sempre stata valorizzata per tradizione storica o per il diffuso e continuativo impiego nelle applicazioni industriali, di ricerca o in campo energetico. Sotto il profilo della progettazione didattica mancano ricerche specifiche sulla FN che abbiano formulato anche solo in via teorica un percorso didattico completo (teoria, applicazioni, laboratori), innovativo rispetto alle prassi già esistenti o presenti sui libri di testo. Ciò non esclude che non siano state pensate o anche svolti percorsi didattici efficaci ma, in questo caso, sarebbero stati realizzati al di fuori di una elaborazione accademica o di una co-progettazione con enti di ricerca, università, aziende della filiera nucleare. Un panorama così poco o per nulla contraddistinto da esempi significativi di progettazione e insegnamento della FN si scontra con i pluridecennali auspici per un inquadramento della FN nella formazione delle generazioni giovani, formulati già nel dopoguerra e nel corso degli anni '80 del secolo scorso [30, 180]. Per un consolidamento della didattica della FN e per un suo necessario aggiornamento, al passo con i risultati teorici e sperimentali ottenuti nella sua continua evoluzione, si sono susseguiti negli anni successivi appelli specifici, in qualche caso sostenuti da valutazioni dello stato dell'arte svolte in diverse nazioni ad opera di istituzioni sovranazionali [58]. Parallelamente a questo è iniziata una riflessione sui manuali scolastici di cui spesso si sottolinea l'inadeguatezza, lo scarso aggiornamento e di cui si reclama una approfondita revisione [17, 13], con proposte che spesso si limitano ad ambiti settoriali e frutto di esperienze sul campo circoscritte [3]. Può essere utile citare a questo proposito la discussione interna al NUPECC (Nuclear Physics European Collaboration Committee), che coerentemente con la sua mission² ha iniziato a porre a livello europeo il problema della revisione della didattica della FN, con particolare riferimento ai manuali scolastici [113]. Nonostante tale intervento sia considerato un'emergenza nel quadro della diffusione della cultura nucleare, l'iniziativa si scontra con considerevoli ostacoli:

- difficoltà a costituire un gruppo di ricerca internazionale,
- difficoltà a svolgere un ampio monitoraggio dello stato dell'arte, data l'elevato numero degli stati UE,
- complessità del lavoro di armonizzazione degli interventi,
- refrattarietà nell'interlocuzione dei soggetti coinvolti (editori, autori, insegnanti, ricercatori), dovuta sia a disomogeneità professionale, sia alle logiche e agli obiettivi implicati³,

²Le finalità del NUPECC sono: rafforzare la collaborazione europea nel campo della fisica nucleare, definire una rete di strutture complementari in Europa e incoraggiarne l'uso ottimale, fornire un forum di discussione sulla fornitura di strutture e strumentazioni future, formulare raccomandazioni sullo sviluppo, l'organizzazione e il sostegno della fisica nucleare europea e su progetti particolari.

³In questo stesso lavoro di ricerca si è aperto un canale di comunicazione con uno dei principali editori nazionali, che oltre a essere uno dei protagonisti europei della comunicazione massmediatica si occupa an-

- lunghe tempistiche di monitoraggio, progettazione, realizzazione dell'intervento.

Al di là di questo quadro lacunoso, va tuttavia sottolineato che sia gli istituti scolastici al loro interno, sia le università, gli enti di ricerca e le aziende hanno attivato negli ultimi anni diverse sperimentazioni didattiche con le scuole superiori, in altri stati europei o extra-europei [79]. Si tratta di attività spesso molto diverse tra loro anche per via dei contesti in cui vengono sviluppate: singoli interventi in aula considerati a tutti gli effetti come parte integrante della didattica curricolare, cicli di lezioni con caratteri di approfondimento extracurricolare, laboratori reali o virtuali [16, 139, 15], incontri di divulgazione e disseminazione (openday universitari per le scuole secondarie, visite didattiche a laboratori e enti di ricerca, notti bianche dei licei). Se questi momenti di insegnamento/informazione hanno il merito di rendere fruibile a diversi livelli la FN, è tuttavia doveroso constatare che, posti al di fuori di una didattica ragionata e svolta con l'adeguato respiro nella quotidianità della vita scolastica, risultano spesso farraginose ed estemporanee.

1.2.2 L'insegnamento della FN nella scuola secondaria di secondo grado in Italia

Sul fronte della formazione pre-diploma lo stato dell'arte presenta tratti sostanzialmente differenti.

Un'analisi rigorosa dell'insegnamento della FN in Italia nella scuola primaria e secondaria di primo grado non è ancora stata tentata. Per quanto riguarda gli interventi nella scuola primaria, alcuni atenei universitari organizzano incontri con insegnanti e bambini, in forma di gioco e con supporti meccanici, per illustrare gli elementi più semplici della disciplina. Sono attività circoscritte a singoli istituti, spesso estemporanee e non si inquadrano ovviamente in una didattica strutturata.

Sarebbe auspicabile un'informazione più generalizzata e approfondita almeno sulla produzione di energia nucleare, collegata all'argomento più ampio dell'energia, avendo come riferimento percorsi già sperimentati anche attraverso uscite didattiche [8] o della radioprotezione, come avviene in regioni che hanno maturato una particolare sensibilità per l'argomento [156]. Dalla scarsa letteratura internazionale è possibile arguire che la preparazione delle generazioni più giovani in FN è spesso carente e non è solo una peculiarità italiana [10, 172] che si risolve solo parzialmente nella scuola secondaria di secondo grado.

Il quadro della scuola secondaria italiana è diverso, a seconda che si consideri quella di primo o di secondo grado.

Nella scuola secondaria di primo grado la consuetudine didattica è simile a quella della scuola primaria. Nonostante la differenziazione per discipline sia più forte e ognuna di queste più caratterizzata, gli interventi per l'insegnamento della FN si limitano a occasioni, peraltro molto felici, ma locali e episodiche [41], non inquadrati in una progettazione didattica strutturata. Può capitare che questi interventi siano pensati e rivolti anche a studenti della scuola secondaria di secondo grado, per ragioni spesso legate a contiguità territoriali, reti scolastiche esistenti, rapporti tra docenti di scuole di primo e secondo grado [82, 84].

La specificità della scuola secondaria di secondo grado, che è il riferimento educativo per questo lavoro di ricerca, presenta ulteriori peculiarità. Per valutare lo stato dell'arte sono stati interpellati i seguenti enti:

che di editoria scolastica. Dopo diverse riunioni con redattori e autori del principale libro di testo per licei scientifici della collana scolastica, ci si è constatato che a un convinto interesse per una collaborazione attiva per l'aggiornamento del capitolo del testo dedicato alla FN non è seguito un effettivo sviluppo dei lavori.

- INFN (Istituto Nazionale di FN), sede nazionale, gruppo di lavoro COLLISIONI <https://collisioni.infn.it/> ;
- AIF (Associazione per l’Insegnamento della Fisica);
- SIF (Società Italiana di Fisica).

È stata infine svolta un’indagine in archivi istituzionali, su un campione qualificato di scuole di territori ad alto BES (Benessere equo e sostenibile – ISTAT) e con docenti collegati attraverso specifici programmi di orientamento (PLS).

Si evidenzia in generale una scarsità di dati inerenti iniziative didattiche formali (lezioni curriculari ed extracurriculari), informali (conferenze, seminari, visite laboratori) e divulgative (attività di disseminazione, mostre, eventi). I dati raccolti permettono alcune considerazioni sulla reale diffusione dell’insegnamento e più in genere della cultura nucleare nella scuola secondaria di secondo grado.

Più nello specifico sono emerse le seguenti evidenze:

- nell’ordinamento antecedente al riordino scolastico Gelmini (L. 103 6/8/2008, L. 169 30/10/2008) era prevista la figura del “perito nucleare”, come esito del corso di studi degli Istituti tecnici industriali con indirizzo Energia Nucleare. Tali figure a esaurimento (fonte AIF) hanno principalmente accesso a ruoli tecnici nella scuola per la classe di concorso AR09. A seguito della riforma la didattica della FN è quindi confluita negli Istituti tecnici, settore tecnologico, a indirizzo Meccanica, Meccatronica ed Energia. Gli studenti coinvolti sono relativamente pochi: il 19.4% (fonte MIM⁴) degli studenti italiani sceglie questo settore, e di questi solo il 2.8% sceglie l’indirizzo Meccanica, Meccatronica ed Energia. Da un’analisi a campione dei PTOF⁵ istituzionali tale valore sembrerebbe ancor più ridotto, dato che l’insegnamento di tematiche nucleari è a discrezione dei singoli istituti che spesso le espungono dall’offerta formativa;
- alcune aziende la cui produzione è centrata sulla componentistica nucleare attivano percorsi di stage per gli istituti tecnici, a volte in funzione orientativa verso le academy aziendali, gli ITS, o per l’introduzione diretta in azienda;
- l’offerta alle scuole di attività non sistematiche, spesso locali, di FN proviene in parte dall’INFN che raggiunge con diverse proposte la maggior parte delle scuole secondarie (visite guidate ai laboratori, masterclass, PCTO, formazione per i docenti);
- altre proposte per le scuole arrivano dal CERN o dalla collaborazione ITER;
- emergono anche attività di singoli laboratori universitari dedicati soprattutto alla radioattività ambientale, come risulta anche dalla letteratura [41, 84];
- la SIF ha pubblicato una serie dedicata specificamente alla FN nell’ottica dell’insegnamento nella scuola secondaria; <https://www.sif.it/attivita/energy/scuola>;
- in rete è possibile reperire materiale di appoggio per la didattica della FN (dispense divulgative, paper specialistici, presentazioni di personale INFN, video) o per

⁴<https://www.miur.gov.it/-/iscrizioni-all-anno-scolastico-2023-2024-i-primi-dati-in-aumento-le-domande-agli-istituti-tecnici-il-57-1-sceglie-i-licei>

⁵Piano Triennale dell’Offerta Formativa.

consultazioni rapide e informali (profili su canali social⁶, canali youtube⁷). Questa congerie di supporti, anche di ottima fattura, non può però sostituirsi a una didattica che affronti la FN in maniera completa e ragionata. Anche qualche esperimento di editoria scientifica divulgativa di particolare successo, può indubbiamente fornire spunti per l'insegnamento, ma non è certamente alternativo alla manualistica scolastica [149, 14];

- l'analisi di un campione di liceali ad alto profilo scolastico dedotto dalle prove INVALSI di Matematica, emerge che l'attività didattica in FN è limitata al solo 30% degli utenti. Quando svolta è caratterizzata da un numero medio di ore inferiore a 6 per l'intero ciclo e, quando superiore, svolta in discipline non necessariamente scientifiche.

Si può concludere che la didattica della FN negli istituti tecnici è appannaggio di scelte personali dei docenti e che viene rivolta a un numero di studenti estremamente ridotto. Le iniziative di educazione al nucleare condotte da aziende, università ed enti di ricerca, sono mirate o a veicolare contenuti circoscritti o a introdurre gli studenti in azienda. Queste attività sono spesso meritevoli e in qualche caso eccezionale⁸, anche perché continuamente riproposte, ma rappresentano esempi ristretti a realtà locali o ridotti a eventi estemporanei che occupano lo spazio di una giornata.

1.2.3 L'insegnamento della FN nei licei scientifici

Per quel che riguarda i licei è stato possibile condurre una disamina più approfondita, dato che sia la normativa che le prassi didattiche coinvolgono espressamente questo segmento del sistema educativo. È stato infatti possibile individuare tre tipologie di cause che ne limitano l'efficacia, quando è praticata, o la inibiscono del tutto:

1. cause istituzionali/normative;
2. cause di contesto;
3. cause riconducibili all'inadeguatezza degli strumenti didattici.

A seguito del riordino scolastico dei regolamenti del secondo ciclo della scuola secondaria, emanato dal 2008 e avviato nel 2010 con il cosiddetto riordino Gelmini (L. 103 6/8/2008, L. 169 30/10/2008), vi è stata una chiara semplificazione dell'offerta formativa, basata principalmente sulla riduzione degli indirizzi di studio e delle sperimentazioni. Ciò non si è sempre accompagnato ad altrettanta chiarezza sugli obiettivi e sui contenuti didattici, soprattutto per le discipline scientifiche e in particolare per fisica. In sostituzione di curricula scolastici ormai inadeguati e pleotorici – i cosiddetti programmi ministeriali [42], si sono imposte indicazioni nazionali non sempre specifiche nelle “Linee generali e competenze” e, per quanto riguarda l'insegnamento della fisica, si è ampliata la discrezionalità riconducibile alla libertà di insegnamento del docente. Per quel che concerne la FN, questa viene citata solo nelle “Indicazioni nazionali per il liceo scientifico” esclusivamente come ambito di discussione delle tematiche energetiche

⁶Si veda il canale Instagram “Nuclear Quinn”, che ha un seguito di meno di 5000 follower.

⁷Si veda ad esempio il canale del Prof. Simone Baroni dell'INFN, che offre un catalogo di *Pépité di scienza* con un'ampia offerta di argomenti di FN.

⁸L'azienda Walter Tosto s.n.c. ha istituito un programma di educazione al nucleare che prevede attività in azienda per studenti del territorio abruzzese, anche di zone svantaggiate, finalizzate all'inserimento nell'ITS Academy dell'azienda, per la formazione di profilature professionali.

o come campo di verifica dell'equivalenza della massa-energia alla luce della teoria della relatività ristretta, per un totale di due righe in 54 pagine di documento [54]. Al momento in cui viene scritta questa tesi, il MIM sta elaborando una revisione delle Indicazioni nazionali per l'insegnamento, la cui discussione preliminare è in corso presso la VII Commissione (Cultura e patrimonio culturale, istruzione pubblica, ricerca scientifica, spettacolo e sport) del Senato della Repubblica. Dalla relazione della Prof.ssa Loredana Perla, convocata il 18 marzo 2025, emerge la volontà di rinnovare le Linee guida per i nuovi curricula e quindi delle Indicazioni nazionali soprattutto per le scuole dell'infanzia e del primo ciclo, che sono state già pubblicate dal MIM in data 11 marzo 2025⁹. Queste diventeranno operative dall'a.s. 2026-2027. Per quel che riguarda il secondo ciclo di istruzione al momento è possibile soltanto reperire informazioni di massima dalla suddetta relazione della Prof.ssa Perla¹⁰. Le indicazioni fornite in merito alle discipline STEM sono ancora vaghe e non entrano nel merito delle competenze da acquisire né degli argomenti da affrontare nelle singole materie. Il seguente stralcio dalla relazione citata esaurisce la comunicazione in merito alle STEM per tutti i cicli scolastici:

“STEM: interdisciplinarietà e metodo laboratoriale a partire dall’esperienza concreta Nell’insegnamento delle discipline STEM si prevede un **potenziamento delle attività sperimentali** e delle attività sinergiche fra la matematica e le altre discipline scientifico-tecnologiche; così come particolarmente favorito sarà il **metodo laboratoriale** che parta da un’esperienza diretta e concreta, collegata alla realtà quotidiana, per poi sviluppare riflessioni più astratte. Per affrontare le sfide della contemporaneità, nell’ottica di un rinnovato **umanesimo scientifico-tecnologico**, occorre mettere in relazione scienze, tecnologia, arte e discipline umanistiche al fine di superare la frammentazione dei saperi e favorire un approccio organico e unitario che stimoli creatività e innovazione. A questo scopo sarà opportuno prevedere una adeguata **contestualizzazione in prospettiva storica di argomenti, scoperte e risultati scientifici**, ponendoli in nesso con lo specifico contesto storico-culturale e l’evoluzione del pensiero umano e della società, mettendo in evidenza il **ruolo del pensiero critico e dell’errore** come elementi centrali del progresso. Verrà inoltre introdotto lo studio dell’**informatica** fin dalla scuola primaria, per consentire allo studente di maturare competenze fondamentali in un mondo sempre più digitale, per un uso consapevole, sicuro e socialmente responsabile della tecnologia.”

È evidente che espressioni come “interdisciplinarietà e metodo laboratoriale a partire dall’esperienza concreta”, “metodo laboratoriale”, “umanesimo scientifico-tecnologico” sono formule che meritano ancora una specifica collocazione didattica per poter assumere una proiezione effettivamente innovativa. Alcune di queste finalità sono peraltro già previste dalle *Linee guida attuali e dalle Indicazioni nazionali* vigenti e già adottate nelle prassi didattiche, come già accade per la “contestualizzazione in prospettiva storica di argomenti, scoperte e risultati scientifici” o per il “ruolo del pensiero critico e dell’errore” e ancora per lo “studio dell’informatica”, che sarebbe curioso non individuare negli obiettivi didattici e nelle finalità educative dell’attuale sistema scolastico italiano.

⁹Reperibili al sito: <https://www.mim.gov.it/-/pubblicato-il-testo-delle-nuove-indicazioni-per-la-scuola-dell-infanzia-e-primo-ciclo-di-istruzione-materiali-per-il-dibattito-pubblico>.

¹⁰Reperibile al sito: https://www.senato.it/application/xmanager/projects/leg19/attachments/-documento_evento_procedura_commissione/files/000/432/685/Audizione_Senato_Nuove_Indicazioni_Perla.pdf

La discussione seguita all'audizione¹¹, che ha coinvolto alcuni membri della commissione, non ha peraltro toccato gli argomenti relativi né alle STEM, né tanto meno alla disciplina di fisica o in particolare alla FN. Il confronto politico si è sviluppato attorno ad altri temi più generali dato il carattere dell'o.d.g., come l'inclusione scolastica, la disabilità, la composizione dei vincoli della proposta ministeriale con l'autonomia scolastica e la libertà di insegnamento, l'alleanza scuola-famiglia, il latino, la grammatica, la Commedia dantesca, ma non appunto su quelli di ambito scientifico.

1.2.4 Cause di contesto

Si aggiunge infine un dato ambientale, che ha trovato conferma anche nel presente lavoro di ricerca. I contesti educativi, anche quando liceali, risentono di una forte limitazione dovuta alla formazione dei docenti¹². Di questi, infatti, solo il 38% dei docenti dei licei scientifici possiede una laurea in fisica e quindi una limitata preparazione non solo in FN, ma anche in ampi settori della fisica classica e novecentesca [50]. Questo dato continua a essere considerevole, anche se si considera la sola componente degli insegnanti del triennio conclusivo del corso di studi. Sebbene non sia facile darne una valutazione quantitativa, la percentuale dei docenti laureati in fisica non sembra variare di molto (v. Parte III della presente tesi di dottorato), cosa che rappresenta un vulnus ben più grave proprio perché nella fase finale del ciclo di studi si affrontano le questioni più delicate della fisica moderna. Come ulteriore aggravio, va anche chiarito che anche gli stessi docenti laureati in fisica non sempre hanno una preparazione specifica in FN derivante dalla formazione universitaria, dato che nei piani di studi del corso di laurea in fisica non è e non è mai stato obbligatorio includere insegnamenti specifici di FN.

Più in generale i dati seguenti evidenziano la difficoltà di attuare processi positivi di long life learning nella popolazione insegnante della scuola secondaria di secondo grado e quindi anche nei licei [51]:

- la numerosità dei docenti è talmente elevata da rendere utopistico un autonomo processo di autoformazione o aggiornamento in FN che abbia ripercussioni efficaci ed omogenee sull'insegnamento (Fig. 1.1);
- la distribuzione per fasce d'età degli insegnanti è tale da far presumere che l'anzianità di molti non sia da stimolo per interventi di formazione (30,10% sotto i 44 anni; 31,20% tra i 45 e i 54 anni; 38,80% oltre i 54 anni l'Italia è il paese europeo con il maggior numero di insegnanti ultra cinquantenni) (Fig. 1.2);
- l'inerzia mostrata dal corpo docente italiano verso i programmi di istruzione o formazione formale (contenuti disciplinari, pedagogia e pratica in classe) è maggiore rispetto a quella degli altri paesi europei (Fig.1.3).

¹¹Reperibile al sito: <https://www.radioradicale.it/scheda/754474/7a-commissione-cultura-e-patrimonio-culturale-istruzione-pubblica-ricerca-scientifica>

¹²Nell'a.s. 2022-2023 il numero dei docenti della scuola secondaria, esclusi gli insegnanti di sostegno e quelli delle regioni Valle d'Aosta e Trentino Alto Adige, era pari a 261.881 (fonte Openpolis, <https://www.openpolis.it/il-ruolo-centrale-degli-insegnanti-nella-comunita-educante/>). Tale numero non è destinato a ridursi, dato che gli auspici formulati negli ultimi decenni in merito al problema non hanno trovato conferma negli andamenti riscontrati negli anni scorsi (fonte Fondazione Agnelli: https://www.fondazioneagnelli.it/wp-content/uploads/2017/08/Fondazione/Agnelli.-Anticipazione_ricerca_insegnanti..Demografia.e_pensionamenti.Finale.pdf).

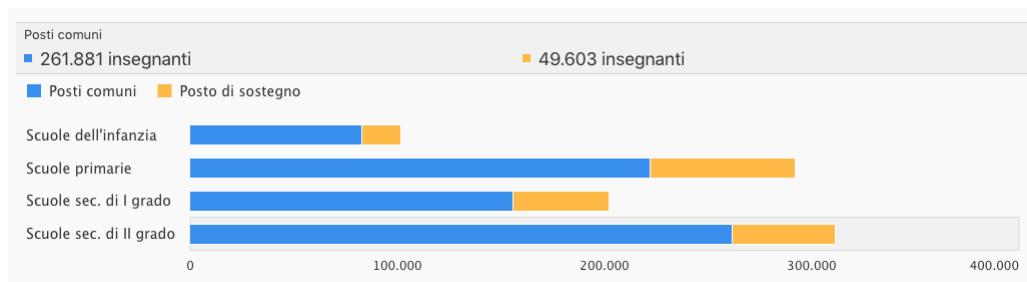


Figura 1.1 l'inerzia mostrata dal corpo docente italiano verso i programmi di istruzione o formazione formale (contenuti disciplinari, pedagogia e pratica in classe) è maggiore rispetto a quella degli altri paesi europei.

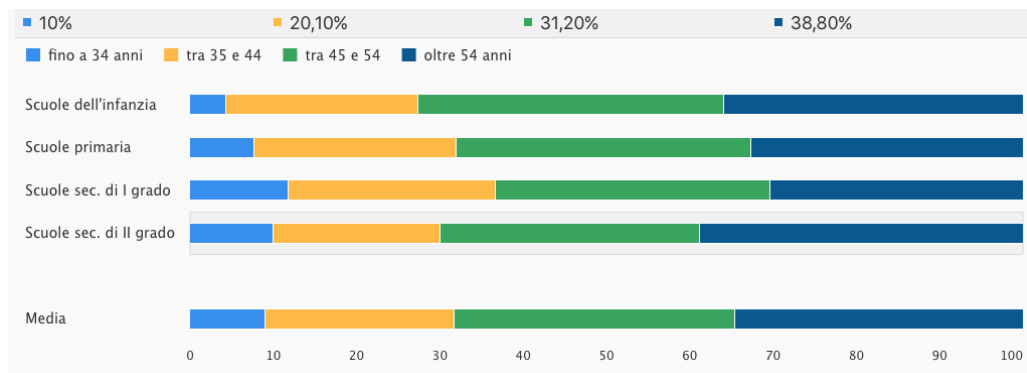


Figura 1.2 percentuale dei docenti suddivisi in classi nei diversi livelli scolastici, le percentuali in capo alla tabella sono riferite alla scuola secondaria di secondo grado (a.s. 2022/2023, sono escluse le regioni Valle d'Aosta e Trentino Alto Adige; fonte Openpolis).

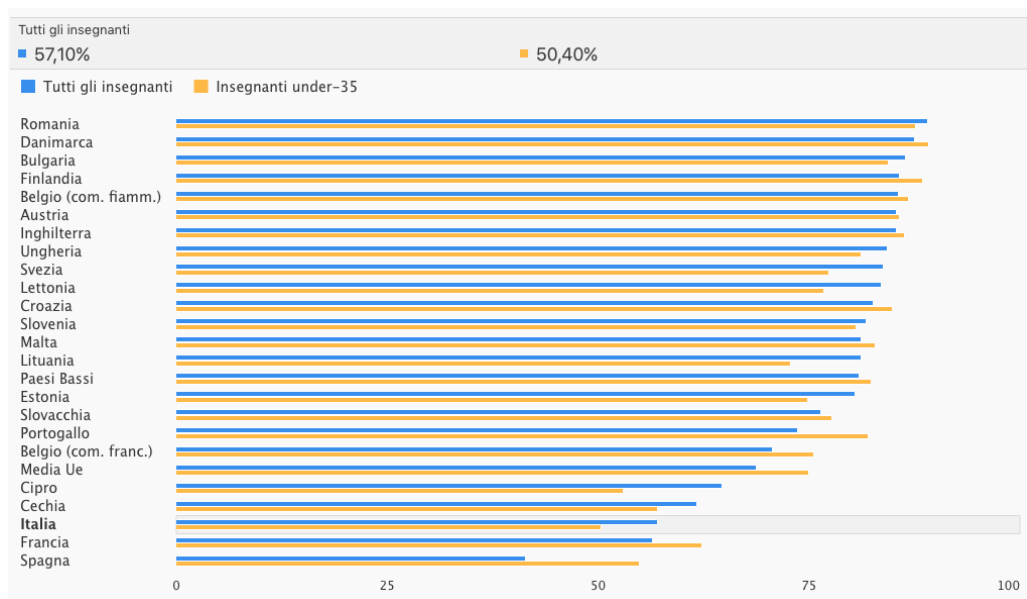


Figura 1.3 percentuale dei docenti della scuola italiana che ha completato un ciclo di formazione formale confrontata con quella degli altri paesi europei secondaria di secondo grado (a.s. 2022/2023, sono escluse le regioni Valle d'Aosta e Trentino Alto Adige; fonte Openpolis).

1.2.5 Cause riconducibili all'inadeguatezza degli strumenti didattici

Se si analizza la sezione di FN dei cinque libri di testo più adottati in Italia nei licei scientifici, emerge un quadro molto omogeneo con poche differenze di taglio editoriale [5, 34]. Se alla fisica atomica vengono dedicati uno o due capitoli per un numero complessivo di pagine attorno a 60, la FN e le sue applicazioni in genere occupano uno spazio che è circa la metà. Le prospettive epistemologiche in cui queste conoscenze vengono inquadrare sono peraltro diverse: la fisica atomica è sempre introdotta attraverso un percorso storico-critico, a partire dagli esperimenti e con un'ampia discussione dei modelli interpretativi dei fenomeni inquadrati nel paradigma della meccanica quantistica. Per la FN, invece, ci si limita all'esposizione di qualche esperimento storico sulle misure di radioattività, senza fare riferimento all'ampia discussione che ne è seguita nei primi decenni del secolo scorso [88] - [9]. Tutti gli autori dei testi analizzati proseguono poi con trattazioni descrittive della fisica del nucleo, senza far riferimento alle problematiche concettuali che questi pongono come per esempio decadimenti ed effetto tunnel, spettro del decadimento beta e ipotesi del neutrino, condizioni energetiche per la fissione nucleare, sezione d'urto e energia di attivazione. Questi autori si concentrano sull'esposizione di alcune applicazioni, non sempre significative, non sempre aggiornate e che non comportano l'acquisizione di competenze fisiche ma solo di informazioni facilmente rintracciabili altrove. I testi non adempiono al loro ruolo di supporti per lo sviluppo di una visione del mondo fisico attraverso modelli interpretativi (*forma mundi*), come auspicato in letteratura [126], ma finiscono per essere più degli zibaldoni medievali contenenti una *imago mundi* cristallizzata. Ciò non permette agli studenti di acquisire né contenuti né competenze specifici, ma tutt'al più solo qualche abilità risolutiva di semplici esercizi più di

conto che di contenuto. Le cause di questo mancato aggiornamento vanno ricercate anche in una diffusa avversione verso la FN, rilevata non solo in Italia [173] a cui si è cercato di rispondere con percorsi didattici informali o curricolari, con più o meno successo.

1.2.6 Il riordino del liceo scientifico

Per avere un quadro completo del contesto in cui si colloca la didattica della FN e più in generale della fisica nei licei scientifici, è utile fare un cenno anche alle trasformazioni che ne hanno recentemente modificato la struttura. Pur senza intaccare le finalità di questo segmento educativo, la legislazione ha infatti operato significativi cambiamenti per quel che riguarda l’offerta formativa. In generale, i già richiamati interventi normativi effettuati in Italia tra il 2008 e il 2010 finalizzati alla semplificazione organizzativa degli ordinamenti e degli indirizzi didattici e al riordino degli insegnamenti della scuola (Tab. 1.1) hanno investito profondamente la scuola secondaria di II grado.

Livello scolastico	Durata in anni	Età scolare degli studenti
Asilo nido	3	0–3
Scuola dell’infanzia	3	3–6
Scuola primaria	5	6–11
Scuola secondaria di I grado	3	11–14
Scuola secondaria di II grado	5	14–19
Università e corsi post-diploma	Da 2 a 6	19–25 (max)

Tabella 1.1 Livelli nell’organizzazione della scuola italiana

Il liceo scientifico in particolare ha visto infatti una profonda trasformazione dei quadri orari con incrementi delle ore di insegnamento della fisica, della matematica, dell’informatica e delle scienze naturali. A fianco dell’indirizzo tradizionale è stata attivata l’opzione Scienze Applicate che enfatizza l’insegnamento di alcune discipline scientifiche, come informatica e scienze naturali, quest’ultima comprensiva anche degli insegnamenti di chimica, biologia e scienze della Terra (Tab. 1.2). Questi cambiamenti hanno generato aspettative sul miglioramento della formazione degli studenti in campo scientifico, già avvertite negli ultimi anni del secolo scorso [27, 53].

Anno di corso	Matematica			Informatica			Fisica			Scienze naturali		
	L.S.*	L.S.	O.S.A.	L.S.*	L.S.	O.S.A.	L.S.*	L.S.	O.S.A.	L.S.*	L.S.	O.S.A.
I	5	–	–	–	–	+2	–	+2	+2	–	+2	+3
II	4	+1	+1	–	–	+2	–	+2	+2	–	+2	+4
III	3	+1	+1	–	–	+2	2	+1	+1	2	+1	+3
IV	3	+1	+1	–	–	+2	3	–	–	3	–	+2
V	3	+1	+1	–	–	+2	3	–	–	3	–	+2

Tabella 1.2 quadro orario delle discipline scientifiche nel liceo scientifico (L.S*.: liceo scientifico pre-riordino 2008-2010; L.S.: liceo scientifico tradizionale; O.S.A.: liceo scientifico opzione scienze applicate;). Per il L.S. e per l’opzione O.S.A. sono indicati gli incrementi orari rispetto al quadro del L.S.*.

A fianco di questa innovazione, si è rafforzato il monitoraggio delle scuole attraverso prove standardizzate, rendendo più incisivo il ruolo dell’Istituto nazionale di valutazione del sistema scolastico (INVALSI), che si avvale anche delle prove internazionali come

OECD-Pisa. Ciò ha permesso analisi dettagliate per alcune materie specifiche, come italiano, inglese e matematica per il liceo scientifico. Gli esiti delle prove sono pubblici, consultabili via web tramite il canale “Scuola in chiaro” per ogni istituto e per ogni classe.

Ciò non accade per l'apprendimento della fisica, che non può essere monitorato con il supporto di una struttura istituzionale di valutazione. Ciò tuttavia non comporta che da studi settoriali, su singole aree di apprendimento e con campioni di studio limitati a territori circoscritti, non si possano ottenere informazioni chiare e utili a direzionare eventuali interventi di modifica delle strategie educative [183].

1.3 Interesse e conoscenza della FN in studenti STEM

1.3.1 Un'indagine

Nella fase iniziale di questa ricerca, prima di pensare alla progettazione di un percorso didattico di FN per studenti e docenti, è sembrato opportuno avere un quadro della preparazione e dell'interesse degli studenti per la FN. Per questo scopo è stata svolta un'indagine attraverso la somministrazione di un questionario a risposte chiuse su un campione di studenti, in parte frequentanti l'ultimo anno del liceo scientifico, in parte già iscritti a corsi di laurea STEM. Si è scelto di analizzare un campione così ristretto in quanto, come già sottolineato, un intervento didattico significativo per la valorizzazione della FN nella scuola secondaria di secondo grado può realisticamente essere immaginato per il liceo scientifico, i cui studenti in uscita dovrebbero aver conseguito una profilatura orientata ai corsi di laurea STEM.

1.3.2 Il sondaggio

Prima di effettuare il monitoraggio, a inizio marzo 2023 è stato condotto un pre-test su un campione ridotto di studenti del corso di Scienze e Politiche Ambientali (Università degli Studi di Milano), per la verifica della comprensibilità logica e per il controllo dei tempi di rilevazione del questionario stesso, che in effetti si sono mostrati eccessivi e che sono stati ridotti di un terzo rispetto a quanto inizialmente preventivato. La somministrazione è avvenuta in presenza, al fine di evitare condizionamenti esterni e di uniformare il setting di svolgimento, in un contesto osservato dal somministratore. Per riunire campioni omogenei e numerosi operanti contemporaneamente, si è preferito raccogliere le informazioni tramite modalità CAWI [129] e BYOD [40], sfruttando mailing list e social community condivisi, ciò che ha permesso anche un'agevole analisi dei dati. Le scelte dei setting, le modalità operative e la composizione dei campioni hanno impedito il verificarsi delle criticità, in genere legati a sottoinsiemi campionari con bassa alfabetizzazione digitale, che in altri contesti statistici hanno fatto preferire la modalità a doppio canale CATI/CAWI alla pura modalità CAWI [112]. Al di là delle modifiche apportate, le modalità operative sono state ripetute identicamente ad ogni successivo campionamento.

A seguito di questa prima attività di validazione operativa del questionario, il monitoraggio dell'interesse per la FN e degli apprendimenti pre- e post-diploma è stato effettuato su campioni di studenti iscritti a corsi di laurea STEM o al termine del percorso liceale. Inizialmente questo è stato sottoposto a studenti del I anno di università dei corsi di laurea in Fisica (gruppo I), in Ingegneria Biomedica (gruppo II), prima dello svolgimento dei corsi di fisica moderna, durante il secondo semestre del I anno di corso. In seconda battuta è stato somministrato a un campione di studenti dell'ultimo

anno di corso dei licei della rete dei licei di Monza e Brianza, di cui fanno parte tre licei scientifici, indicati nel corso di questo lavoro come liceo I, liceo II e liceo III. Questo territorio si caratterizza per alti indicatori BES (Benessere Equo e Sostenibile), per la quasi totalità superiori a quelli della regione di appartenenza e nazionali (Fonte istat) [98]. Gli istituti analizzati nelle prove standardizzate di matematica (INVALSI 21/22) si collocano in una fascia alta: gli esiti delle classi quinte confrontati con istituti con simile ESCS (contesto socio-economico e culturale) sono superiori alla media regionale a quella macro-territoriale e nazionale. Tali istituti coprono in parte il bacino di utenza degli atenei cui afferiscono i gruppi I e II. In questa seconda tornata, il questionario è stato somministrato alla fine del corso di studi.

1.3.3 Struttura del questionario

Entrando nel merito della struttura del questionario, si è fatto riferimento a un esempio già sperimentato con studenti universitari, opportunamente modificato [105] per i due campioni, quello universitario [All. 1] e quello degli studenti liceali [All. 2]. Si è così costruito un insieme di domande, suddiviso in due grandi blocchi di item [12]. Il primo blocco è relativo alle informazioni relative ai soggetti che costituiscono il campione, il secondo è costituito da domande relative alla conoscenza dei fondamenti di FN. Dato che il questionario non è pensato come strumento per la valutazione di abilità/competenze, anche tramite strumenti di autocorrezione o con inclusione di suggerimenti, si è deciso di redarlo secondo la formulazione classica CTT con item a risposta chiusa, che in questo lavoro viene preferita alla teoria IRT [12]. Per le stesse ragioni si è preferito non somministrare domande a imbuto o a imbuto rovesciato, ma si è variato l'ordine dei quesiti per ogni partecipante, per evitare condizionamenti di contesto [97]. Si sono inoltre inseriti quesiti di controllo per la valutazione dell'attendibilità del singolo questionario [96], [128].

Per quel che riguarda il blocco di quesiti di FN, si tratta di 28 domande, ad ognuna delle quali corrispondono quattro possibili risposte di cui una sola corretta. Nel merito dei contenuti, i quesiti di FN sono stabiliti tenendo presente che l'eventuale formazione strutturata dello studente in contesti formali è avvenuta anche attraverso lo studio di manuali scolastici. 8 domande, di cui due di controllo, erano relative a nozioni di tipo narrativo; 9, di cui una di controllo, di livello descrittivo; 11 erano nozioni di tipo applicativo.

Il termine narrativo è riferito a contenuti specifici di FN (isotopo, nucleo, decadimento...), di tipo elementare o primitivo. Con il termine descrittivo si attribuisce ai contenuti (legge del decadimento, concetto di neutrino, ...) una valenza di correlazione con altri contenuti attraverso teorie più o meno semplici e con possibile formalizzazione. Il termine applicativo infine si riferisce a conoscenze in campi sperimentali, di ricerca, di uso civile dell'energia nucleare necessari al cittadino informato.

L'attribuzione di un punteggio unitario alle risposte corrette ha permesso di effettuare comparazioni tra i diversi campioni di studenti. Una soglia S di accettabilità è stata fissata. Si è considerato che la preparazione minima dello studente debba comprendere i contenuti narrativi (8 punti), e il 25% dei contenuti a carattere descrittivo e applicativo ($0.25 \times 11 + 0.25 \times 9$), corrispondenti al punteggio conseguibile nel caso di risposte aleatorie. Il valore di S in termini di punteggio è quindi pari a $S = 8 + 9/4 + 11/4 = 13$. In questo modo la soglia di accettabilità corrisponde al possesso dei semplici contenuti narrativi. Nel caso in cui uno studente avesse risposto casualmente a tutte le domande avrebbe totalizzato un punteggio medio pari a $7/28$. Verificare una correlazione tra l'effettivo insegnamento della FN e il superamento di S è uno degli scopi di questo lavoro.

Per quel che riguarda i contenuti, si può affermare che ogni item è stato pensato per questo test e nessuno di questi è stato prelevato da materiali già utilizzati o presenti in letteratura. Il questionario è stato sottoposto alla validazione dei docenti delle sezioni di Radioattività del dip. di fisica di Unimi, che hanno operato una selezione dei quesiti posti, finalizzata all'adeguatezza delle richieste in considerazione del campione a cui il test era indirizzato. I docenti della sezione di Didattica della Fisica hanno infine operato una validazione del questionario, che è stato considerato idoneo come strumento conoscitivo. La validazione del test è stata effettuata calcolando il p-value con riferimento al valore di accettabilità S. Si è ottenuto un $p\text{-value}=0,051$ che per $\alpha=5\%$ attesta una buona scelta del campione e convalida il test. Un'ulteriore prova di validazione è stata effettuata grazie alle domande di controllo e in particolare quelle riferite ai contenuti narrativi, ovvero a quelle relative ai raggi γ e alla definizione di isotopo. Per ognuna delle due coppie di dati relative a questi item si è valutato l' α di Cronbach che ha fornito valori elevati (0.78 e 0.80, rispettivamente) per il gruppo numericamente più significativo, ossia il gruppo II. Sui dati di ogni sottocampione, i due gruppi universitari e i tre licei, è stata considerata la frequenza con cui gli studenti hanno fornito la stessa risposta a entrambi i quesiti. Indicata con X una delle quattro risposte possibili associate a un quesito, il valore atteso per la probabilità di ottenere casualmente la stessa risposta nella coppia di item con la stessa domanda vale . La frequenza rilevata nel test rivolto allo stesso campione ha invece dato gli esiti riportati in Tab. 1.3. I valori rilevati confermano che le risposte a questa terna di coppie di quesiti non sono state assegnate casualmente.

Item	Gruppo I	Gruppo II	Liceo I	Liceo II	Liceo III
Isotopo	0.87	0.89	0.91	0.80	0.80
Raggi γ	0.94	0.87	0.89	0.92	0.89
Neutrino	0.79	0.76	0.96	0.80	0.82

Tabella 1.3 Valori percentuali delle coincidenze nelle risposte agli item di controllo

1.3.4 L'insieme campionario

Il campione globale che comprende studenti dell'ultimo anno dei licei e universitari è costituito da 316 soggetti, di cui solo 4 di età superiore ai 22 anni. Vi è una lieve prevalenza del genere cis-maschile (55%) su quello cis-femminile (42%) e la componente trans-gender o di chi non esplicita la propria scelta di genere è trascurabile (Fig. 1.4).

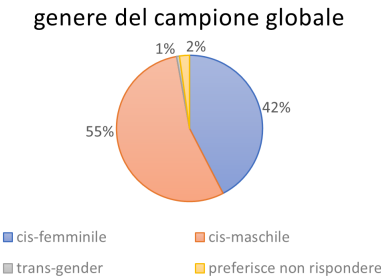


Figura 1.4 composizione per genere del campione globale

Il divario di genere normalizzato alla popolazione totale può essere definito attraverso il seguente rapporto:

$$\Delta_{\text{gender}} = \frac{n_{c-F} - n_{c-M}}{N}$$

dove n_{c-F} è il numero di elementi cis-femminile del campione, n_{c-M} quello di elementi cis-maschile e N il numero complessivo di studenti del campione. Data la bassa incidenza della componente trans-gender si è deciso di non analizzare dati relativi a questo sottoinsieme. Nel campione analizzato risulta pertanto che Δ_{gender} è pari a -13% . Questo risultato, a favore della componente cis-maschile, è in accordo con il dato nazionale rilevato da istituti di ricerca che risulta pari a $\Delta_{\text{gender}} = -18,7\%$, relativamente ridotto se confrontato con quello degli altri paesi UE [137]. Infatti, a differenza di altre nazioni, la disuguaglianza di genere in Italia è più limitata rispetto ad altri Stati europei (Fig. 1.5).

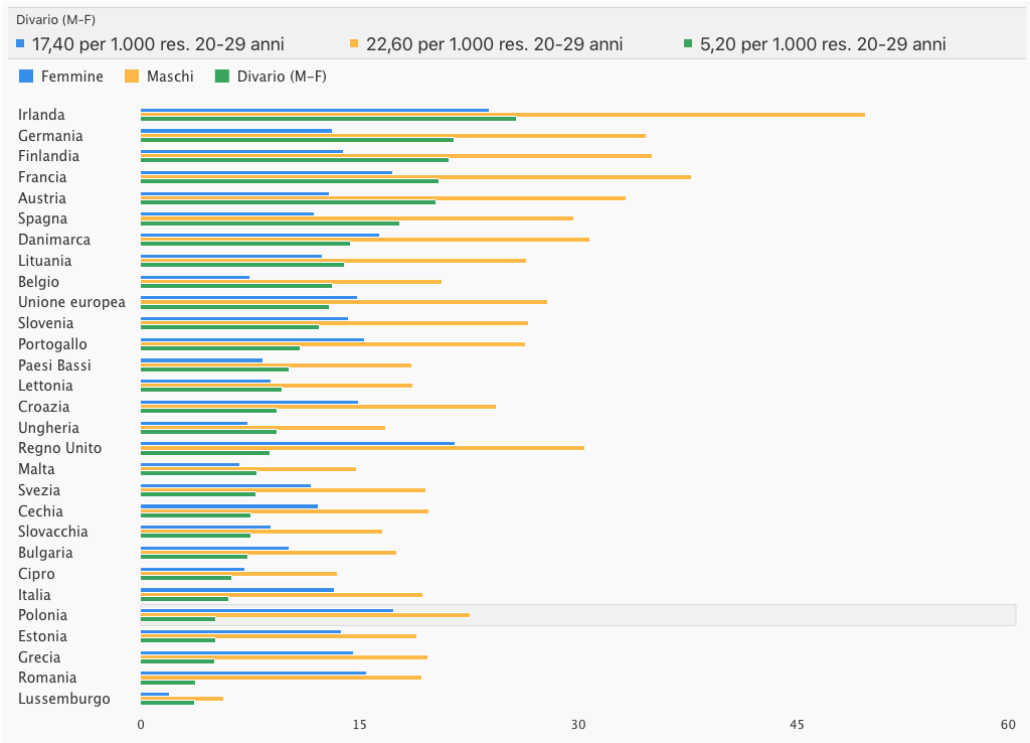
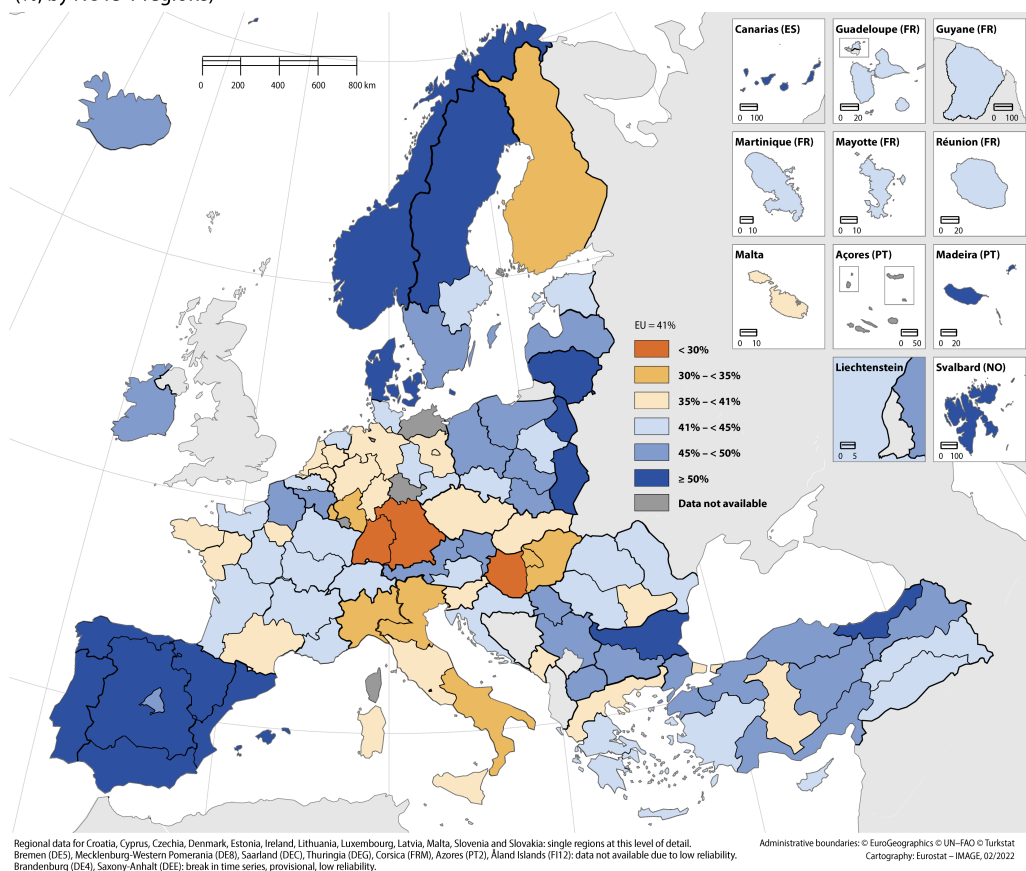


Figura 1.5 disuguaglianza di genere nei laureati in discipline STEM (2019). In Italia il gender gap è di 5,20 unità su 1000 abitanti, corrispondente al 18,7% (fonte Openpolis).

Resta da sottolineare, peraltro, che le studentesse dei corsi STEM iscrivono spesso a corsi di laurea finalizzati all’insegnamento e alla cura della persona, mentre sono presenti nei corsi di laurea scientifici in senso stretto o in economia (Fig. 1.6) con una percentuale che si colloca tra il 30% e il 35% [59].

Proportion of women scientists and engineers, 2020

(%, by NUTS 1 regions)



ec.europa.eu/eurostat

Figura 1.6 percentuale di scienziate e ingegnere (2020), divario di genere riferito alle studentesse laureate in Europa nel 2020 (fonte Eurostat)

Per quanto riguarda i due sottoinsieme di cui è costituito l'insieme campionario, si possono fare ancora alcune considerazioni in merito alla loro composizione.

Il campione universitario è costituito da 171 studenti ed è eterogeneo per provenienza sociale e territoriale, per genere (53% cis-maschile, 44% cis-femminile, 3% preferisce non dichiarare il genere), anche se nel gruppo I c'è una netta maggioranza cis-maschile (63%) rispetto alla componente cis-femminile (31%). Gli studenti hanno un'età che va dai 18 ai 20 anni ed è quindi omogeneo per età. Le esperienze scolastiche pregresse sono diversificate, ma principalmente liceale (Fig. 1.7). Solo l'1% degli studenti ha maturato un'esperienza scolastica pregressa all'estero.

Formazione precedente all'immatricolazione

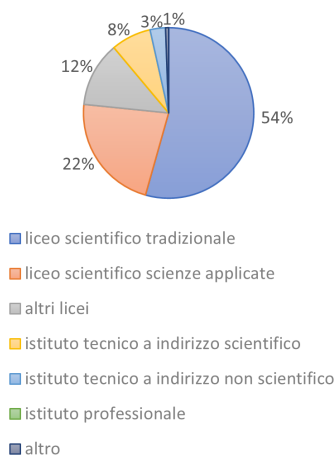


Figura 1.7 composizione del campione relativamente all'indirizzo della scuola secondaria di provenienza

Il campione liceale è equilibrato per età (il 94% ha un'età inferiore ai 19 anni) e per composizione di genere (57% cis-maschile, 41% cis-femminile, 1% trans-gender, 1% non comunica il genere). È omogeneo per provenienza territoriale, caratterizzato da una bassa mobilità interna agli istituti (Fig. 1.8).

Luogo di formazione liceale

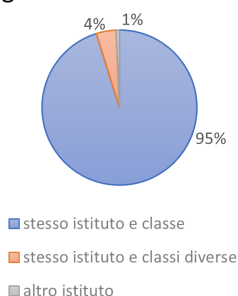


Figura 1.8 il 95% degli studenti liceali ha frequentato il triennio finale del corso di studi nello stesso istituto e nella stessa classe .

1.3.5 I risultati

La distribuzione del punteggio ottenuto dagli studenti del campione globale è rappresentata in Fig. 1.9.

Il valor medio è di 12.61, poco al di sotto della soglia S di accettabilità ed è distribuito su una curva normale, ulteriore prova della validità del questionario.

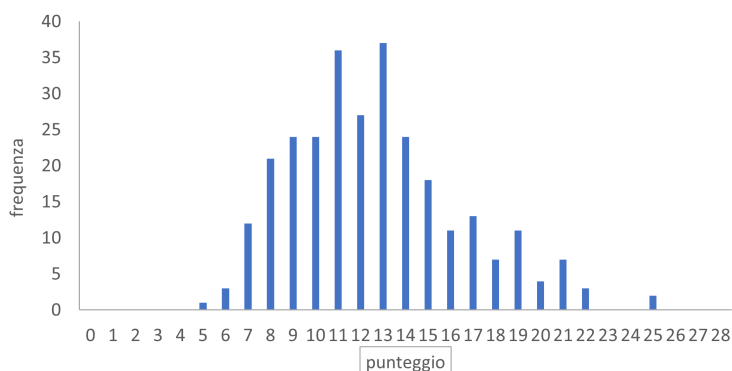


Figura 1.9 frequenza relativa alle diverse fasce di punteggio

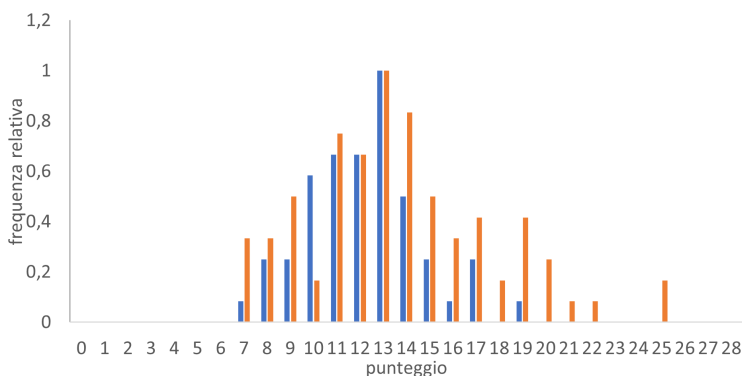


Figura 1.10 frequenza relativa alle diverse fasce di punteggio per i gruppi I (blu) e II (arancione)

All'interno del campione universitario emergono differenze significative sui due gruppi testati (Fig.1.10).

I valori della frequenza si distribuiscono su curve normali, centrate su un valor medio di 13.7 per il gruppo I e di 12.1 per il gruppo II, rispettivamente superiore e inferiore alla soglia di accettabilità S.

Per quanto riguarda i licei, la frequenza degli alunni nelle diverse fasce di punteggio si distribuisce normalmente (Fig. 1.11), anche se dipende fortemente dall'istituto (Fig.1.12).

I valori medi per i tre istituti sono: 14.0 per il liceo I, nettamente superiore al livello di accettabilità S; 9,2 per il liceo II e 11,1 per il liceo III, entrambi al di sotto di S.

Confrontando gli andamenti per i due campioni, si osserva che la frequenza con cui si distribuisce il punteggio ha un massimo più elevato per il campione universitario (Fig. 1.13).

Per i due campioni (università e licei) è stata valutata l'incidenza del numero delle ore di FN somministrate nel corso liceale sul punteggio ottenuto dai soggetti del campione [Fig. 1.14]. Gli andamenti del punteggio in funzione del numero di ore di FN affrontato presenta nei due casi un andamento sostanzialmente simile.

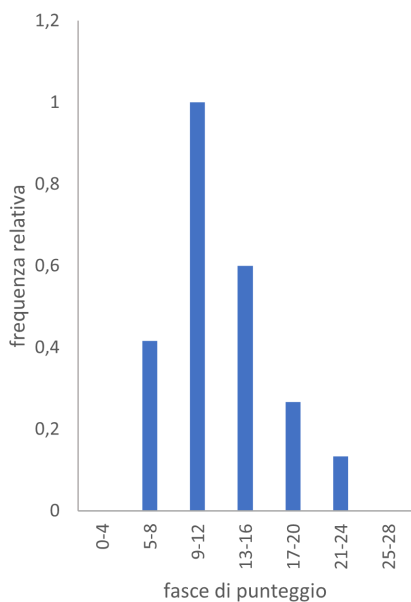


Figura 1.11 frequenza relativa alle diverse fasce di punteggio per i licei

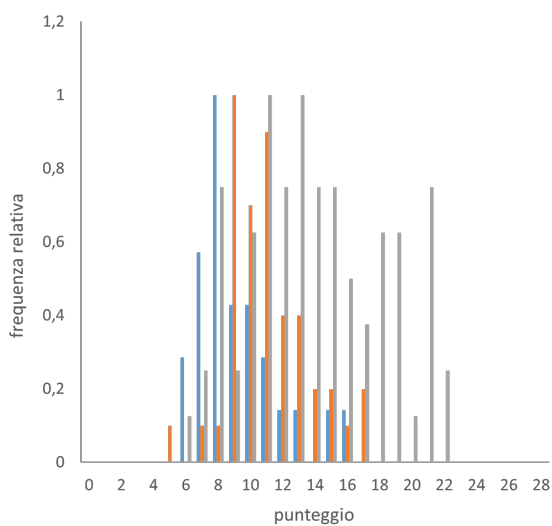


Figura 1.12 frequenza relativa alle diverse fasce di punteggio per i licei: I (grigio, valor medio 14,00), II (blu, valor medio 9,24) e III (arancione, valor medio 11,07)

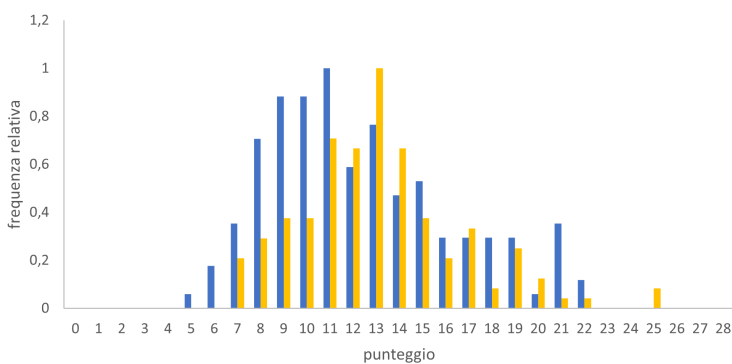


Figura 1.13 frequenza relativa alle diverse fasce di punteggio: licei (arancione), università (blu)

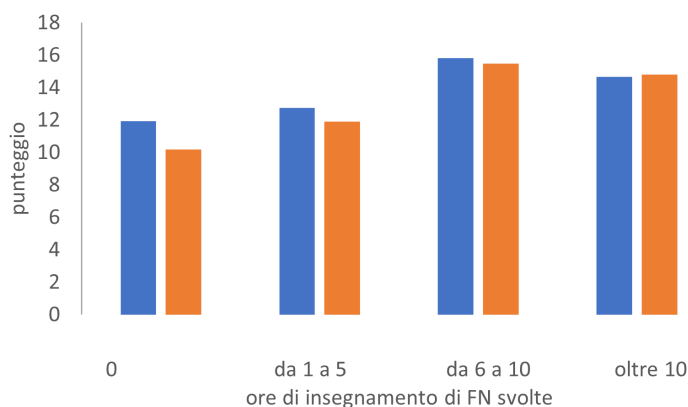


Figura 1.14 distribuzione del punteggio ottenuto in funzione delle ore di insegnamento di FN nel corso di studi liceale (campione licei, arancione; campione universitario blu).

Gli studenti del campione universitario provenienti dal liceo scientifico, nelle due articolazioni ‘tradizionale’ e ‘opzione scienze applicate’, hanno ottenuto punteggi mediamente più elevati nel gruppo I e allineati con la media nel gruppo II (Tab. 1.4).

	Gruppo globale	Studenti L.S.	Studenti L.S. tradizionale	Studenti L.S. O.S.A.
punteggio medio gruppo I	13,7	14,34	14,42	14,18
punteggio medio gruppo II	12,1	12,12	12,19	11,95

Tabella 1.4 Punteggi medi correlati ai licei di provenienza

1.3.6 L’incidenza del genere

Nel campione universitario, la differenza di genere non comporta influenze sul punteggio ottenuto, se non per il gruppo I, anche se non significative (Tab. 1.5).

	Gruppo globale	Cis-femminile	Cis-maschile
punteggio medio gruppo I	13,7	−7%	+5%
punteggio medio gruppo II	12,1	+2 %	−8 ‰

Tabella 1.5 punteggi medi correlati alla differenza di genere. Non si sono considerati i dati relativi a studenti che non hanno comunicato il genere (dato numericamente irrilevante)

Come per i gruppi di studenti universitari, così per il campione di studenti liceali la differenza di genere non ha significative influenze sui dati (Tab. 1.6), anche se nei tre gruppi tra i risultati medi degli studenti dichiarati cis-maschile e cis-femminile si rileva uno scarto in qualche caso non trascurabile.

Allo scopo di far emergere eventuali correlazioni tra gli esiti dei questionari e un divario di genere, nel corso degli anni di dottorato si sono coinvolti altri gruppi di studenti e si è proseguito con l’indagine, ponendo attenzione alle principali tematiche monitorate

	Gruppo globale	Cis-femminile	Cis-maschile
punteggio medio liceo I	14,0	-2%	+2 ‰
punteggio medio liceo II	9,2	-11,1%	+4%
punteggio medio liceo III	11,1	-7,4%	+5,2%

Tabella 1.6 punteggi medi correlati alla differenza di genere. Non si sono considerati i dati relativi a studenti trans-gender o che non hanno comunicato il genere (dato numericamente irrilevante)

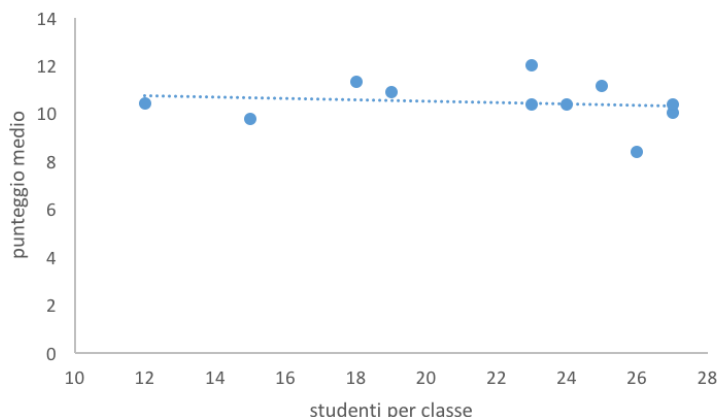


Figura 1.15 andamento del punteggio medio in funzione del numero degli studenti della classe

in analoghi segmenti di ricerca [145, 29, 39]. Per avere un quadro omogeneo, ci si è limitati a undici classi quinte di due licei scientifici, che sono stati testati nel corso del 2024. Di seguito vengono riportati i risultati.

Influenza della numerosità sull'esito del questionario

Si è studiato l'andamento del punteggio medio ottenuto da ogni classe nel questionario in funzione della numerosità della classe (Fig. 1.15).

Risulta evidente che il numero di studenti della classe non ha influenze significative sull'esito.

Influenza della numerosità sull'esito distinto per genere

Indicata con ΔS_{gender} la variazione tra gli esiti S_{c-m} e S_{c-f} rispettivamente della componente cis-maschile e di quella cis-femminile della classe, è stato studiato il comportamento dell'indicatore

$$|\Delta S_{\text{gender}}| = |S_{c-m} - S_{c-f}|$$

in funzione della numerosità della classe (Fig. 1.16).

Risulta evidente che il numero di studenti della classe non ha influenze significative sulla disparità tra gli esiti. Classi numerose o classi ridotte presentano simili discrepanze nei risultati medi della classe.

Influenza del gender gap sull'esito della classe

Si è anche verificato che l'eterogeneità di composizione della classe, a favore di uno o dell'altro genere, non influenza il punteggio medio della classe (Fig. 1.17).

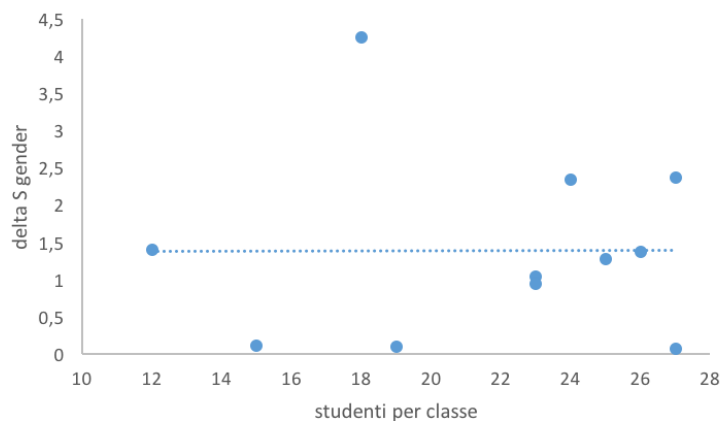


Figura 1.16 andamento della variazione di punteggio per genere $|\Delta S_{\text{gender}}| = |S_{c-m} - S_{c-f}|$ in funzione della numerosità della classe

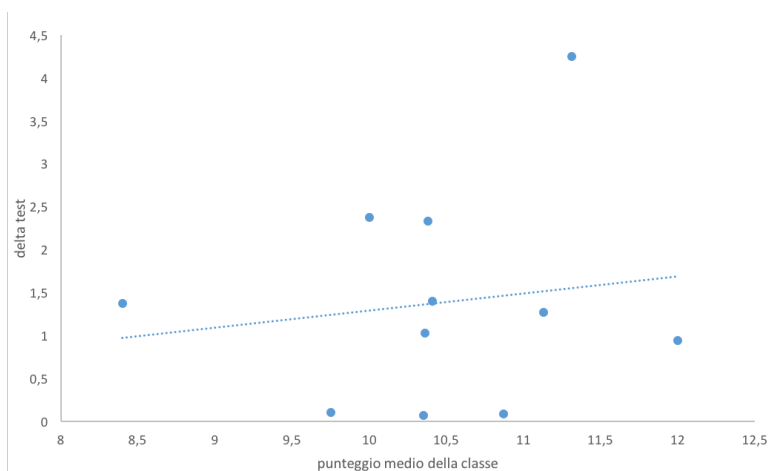


Figura 1.17 andamento della discrepanza di genere nella composizione delle classi in funzione del punteggio medio di classe

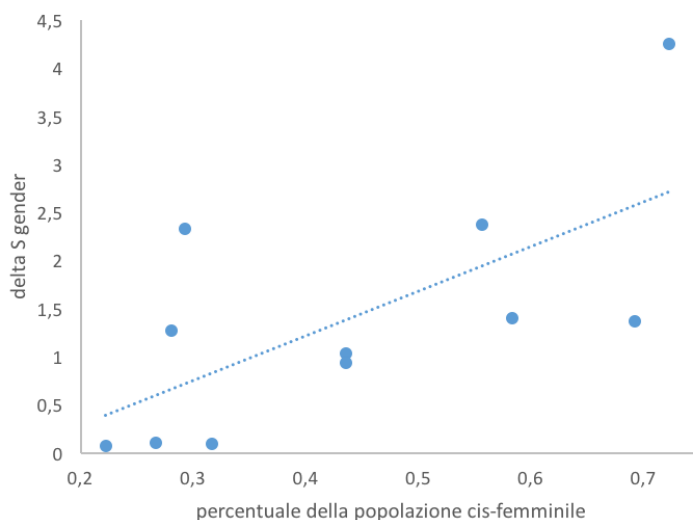


Figura 1.18 andamento della discrepanza degli esiti in funzione della percentuale cis-femminile della classe

Influenza della numerosità cis-femminile sulla discrepanza nel punteggio

Quello che invece si manifesta nettamente, ed è degno di nota, è il legame tra l'eterogeneità di genere nella classe e il divario nei punteggi medi. Si è infatti osservato un fenomeno lineare tra lo scarto nei punteggi dei due principali generi rappresentati (cis-maschile e cis-femminile) e la percentuale di popolazione cis-femminile della classe, definita come $\%_{c-f} = \frac{n_{c-f}}{n_{c-m} + n_{c-f}}$ (Fig. 1.18)

Al momento attuale non è semplice ipotizzare le ragioni di un simile andamento. Si potrebbe pensare che un significativo eccesso di presenze cis-femminili determini una sorta di effetto di gruppo resistente all'apprendimento di contenuti scientifici, in accordo con alcuni risultati internazionali, anche se non con tutti (citare lavori in cui le femmine escono meglio e peggio). Viceversa, una ridotta presenza cis-femminile, potrebbe favorire dinamiche imitative nei confronti dell'altra componente della classe, il cui effetto sarebbe quello di ridurre la differenza negli esiti della prova.

Allo stato attuale della ricerca queste considerazioni sono semplici ipotesi ancora da validare e non forniscono il modello interpretativo dei risultati raccolti, che risentono ancora fortemente di alcuni limiti:

- campione ridotto di classi da incrementare
- non considerazione della storia delle classi - accorpamenti o disgregazioni
- non considerazione della continuità didattica - mantenimento o variazione della figura del docente di fisica e più in generale del corpo docente
- mancata restrizione a un unico indirizzo di studi - liceo scientifico o liceo scientifico opzione scienze applicate
- mancata considerazione della presenza di attività di potenziamento anche per sottogruppi della classe

- mancata considerazione dell'influenza docente-classe.

Alla luce di queste considerazioni risulta auspicabile che questo genere di monitoraggio, anche non necessariamente in FN, venga svolto considerando le precedenti osservazioni. Nell'ipotesi in cui si volesse realizzare un saggio sulle competenze in fisica della popolazione liceale, sarebbe allora opportuno seguire l'evoluzione di un gruppo cospicuo di classi, che nel corso del triennio abbiano mantenuto una continuità didattica e di composizione interna, che abbiano seguito un curriculum regolare di studi senza particolari sperimentazioni o approfondimenti e in cui l'influenza del docente, spesso uno dei fattori determinanti a generare un gender gap nei risultati, sia poco o del tutto irrilevante[36].

1.3.7 Conclusioni

Il sondaggio realizzato evidenzia un interesse/preparazione media in FN poco al di sotto di una soglia di accettabilità, corrispondente all'acquisizione di nozioni elementari (Fig. 1.9), così come riportato anche in recenti pubblicazioni [118].

Per quel che riguarda il campione universitario, gli studenti del gruppo I (corso di laurea triennale in fisica) ottengono un punteggio medio di 13,67, nettamente superiore a quelli del gruppo II (corso di laurea ingegneria biomedica) che conseguono un punteggio medio pari a 12,20 (Fig. 1.10) e superiore alla soglia di accettabilità S. Sempre nel primo gruppo si distinguono gli studenti provenienti dal liceo scientifico (63% nel gruppo I, 90% nel gruppo II), con un punteggio superiore alla media (14,34 rispetto a 13,67). Nel gruppo II, invece, la provenienza dal liceo scientifico non ha incidenza sull'esito del questionario (Tab. 1.4). Una prima conclusione è che gli studenti del liceo scientifico con una buona preparazione si orientano quindi verso corsi STEM più specifici, mentre tra gli iscritti ai corsi di laurea di tipo applicativo quelli provenienti dal liceo scientifico hanno una preparazione pari a quella proveniente da altri istituti superiori.

Il 54% della popolazione di entrambi i gruppi universitari dichiara di non aver affrontato sezioni di FN nel percorso formativo precedente l'immatricolazione universitaria. Questa popolazione ottiene conseguentemente un punteggio medio al di sotto del valore soglia (12,08). Per i restanti, invece, risulta evidente che un'attività pregressa anche ridotta a poche ore di insegnamento, da 1 a 5, comporta il raggiungimento di un punteggio (12,75) di poco al di sotto della soglia S. Incrementando le ore da 6 a 10 si ottiene un risultato molto più elevato (15,8), che si riduce a 14,67 per un'attività di insegnamento superiore alle 10 ore (Fig. 1.15).

Tale risultato conferma una percezione diffusa: gli elementi indispensabili alla comprensione di fenomeni nucleari più o meno semplici e degli ambiti applicativi o di ricerca non richiede un ampio dispiego dell'attività didattica. Risultato interessante è la mancanza di relazione di linearità fra ore di insegnamento specifico e risultati ottenuti. A un eccessivo incremento di ore non corrispondono incrementi di punteggio.

Un andamento pressoché identico si riscontra sul fronte degli studenti liceali (Fig. 1.15). In questo caso occorre evidenziare che uno dei licei ha dedicato all'insegnamento della FN un monte ore in qualche classe anche cospicuo, svolto durante le ore di insegnamento di fisica, mentre negli altri istituti gli interventi sono stati più ridotti e spesso condotti in discipline diverse, non sempre di area scientifica. In particolare, negli altri due istituti, il II e il III, la maggior parte delle ore di FN è stata affrontata nelle ore di scienze naturali (16% liceo II, 23% liceo III) o in discipline di area non scientifica (50% liceo II, 52% liceo III), ciò che può in parte giustificare gli andamenti distinti per liceo (Fig. 1.1b). Nel confronto tra il campione universitario e quello liceale (Fig. 1.14), è interessante notare che la curva relativa al campione universitario è spostata verso i valori più alti,

a causa di due fattori. In alcuni licei l'insegnamento della FN, ridotto e spesso relegato ad aree non scientifiche, non ha permesso agli studenti di conseguire una preparazione accettabile. Una seconda causa che può spiegare l'andamento riportato nella Fig. 1.13 può essere individuato nel fattore di orientamento post-diploma. Gli studenti che accedono a corsi STEM hanno una preparazione mediamente più elevata dello studente liceale al termine del corso di studi, fenomeno che si accentua nel corso più a carattere più specifico (Fig. 1.10), come già evidenziato.

Gli andamenti analizzati relativi alla preparazione degli studenti in FN sono riconducibili esclusivamente alla formazione ricevuta in questo ambito. Come già esposto, il territorio di provenienza degli studenti ha elevati parametri BES, ciò che permette di escludere l'incidenza sugli esiti di fattori socio-economici di contesto. I licei testati presentano esiti elevati in prove scientifiche standardizzate, con un effetto di efficacia sui processi educativi e formativi degli studenti. Infine, la rappresentazione del genere all'interno del campione era relativamente equilibrata, senza differenze significative tra i partecipanti cis-maschi (55%) e cis-femmine (42%).

Le identità di genere transgender e non specificate costituivano una percentuale molto bassa. Tuttavia, sono emerse notevoli disparità di genere all'interno del gruppo di studenti PH (63% maschi cisessuali, 31% femmine cisessuali) e di una scuola superiore (76% maschi cisessuali, 24% femmine cisessuali). In entrambi i casi, le studentesse cis-femminili hanno ottenuto punteggi significativamente inferiori alla media del gruppo (-7% per il PH, -11% per il liceo), mentre gli studenti cis-maschi hanno ottenuto punteggi significativamente superiori (+5% il PH, +4% il liceo). Questo dato suggerisce che un significativo divario di genere in questi casi specifici può svantaggiare gli studenti cis-femminili.

I dati raccolti e le conseguenti osservazioni suggeriscono che l'interesse/preparazione degli studenti in FN non è adeguata alle prospettive di studio per chi intende proseguire con le STEM e, più in generale, per scelte consapevoli di cittadinanza globale attiva che comportino un adeguato background di riferimento anche in FN [184]. Occorre ricordare, per completezza, che in passato altri autori hanno sottolineato che le tematiche nucleari non sono particolarmente stimolanti o rilevanti per gli studenti perché al di fuori delle loro esperienze personali [159, 185]. Ciò non toglie, anzi sottolinea la necessità dell'importante contributo che la FN porterebbe allo studente di corsi STEM e più in generale al cittadino, che attualmente corrisponde a un ruolo del tutto accessorio nel sistema educativo italiano. Per questa ragione si è deciso di non eludere il problema dell'insegnamento della FN, ma di renderlo parte integrante della ricerca in didattica della fisica, progettando lezioni per studenti e docenti della scuola secondaria e valutandone l'efficacia svolgendo ripetuti interventi in platee educative reali, come anche caldeggiato in consessi europei dedicati [134].

Progettazione di un corso di FN per studenti liceali

2.1 La FN nella scuola secondaria di secondo grado

2.1.1 La FN nei manuali scolastici

In uno dei manuali scolastici di fisica più adottati dai consigli di classe delle scuole secondarie [49] la FN occupa lo spazio di un capitolo, per un totale di 47 pagine (Fig. 2.1). Per gli altri manuali, già citati, la proposta editoriale è analoga e quindi, a titolo esemplificativo, si possono fare osservazioni sulle caratteristiche di questo particolare capitolo, che risultano a tutti gli effetti comuni agli altri libri di testo.

Come già anticipato, una disamina specifica dei libri di testo esula dagli scopi di questo lavoro¹. È però utile considerare anche solo in modo grossolano i materiali didattici proposti dagli editori, perché spesso costituiscono l'unica fonte a cui gli studenti, ma soprattutto i docenti, attingono per l'acquisizione della FN.

Ciò che appare dalla lettura dell'indice e che viene confermato anche sfogliando il testo è che la FN viene esposta in modo succinto e esclusivamente descrittivo. La descrizione sommaria del nucleo è esposta in modo apodittico, senza giustificazioni né di tipo storico né di tipo fisico; l'interazione nucleare è utilizzata come sinonimo dell'interazione forte e non come una sua manifestazione; la tavola isotopica di Segrè è posta a margine di una pagina senza una spiegazione della disposizione dei diversi isotopi attorno alla valle di stabilità; risultano assenti i riferimenti alle questioni energetiche dei decadimenti (es.: effetto tunnel), mai citati neppure in forma qualitativa; non si fa riferimento all'equazione differenziale né alla sua soluzione per la descrizione della legge di decadimento, quando quella della risoluzione di un'equazione differenziale ordinaria a variabili separabili è competenza richiesta in matematica. Per quanto riguarda le applicazioni vengono illustrate quelle per le datazioni in campo archeometrico, ma non l'uso della FN per i beni culturali in senso più ampio, quelle energetiche (fissione e fusione, con imprecisioni e scarso aggiornamento), ma non viene trattata né la ricerca di base, né la FN per l'ambiente, né la fisica sanitaria, né il trattamento dei rifiuti nucleari, argomento questo rilevante per una corretta consapevolezza civica in ambito energetico. L'astrofisica nucleare è esposta in maniera sintetica, non evidenziando gli aspetti fisici più profondi della disciplina, ma limitandosi a un elenco delle principali reazioni coinvolte nella nucleosintesi.

¹Durante lo svolgimento del progetto di ricerca si è auspicato un lavoro in questa direzione, coinvolgendo anche il Politecnico di Milano, interessato ad approfondire l'inadeguatezza dei manuali scolastici della scuola secondaria. Le risorse limitate dei due atenei non hanno consentito lo sviluppo di un lavoro così ampio, che resta comunque attuale e degno di essere praticato anche estendendo l'analisi all'editoria scolastica non solo nazionale.

24	Fisica nucleare	
1	La struttura del nucleo	314
2	La stabilità dei nuclei	315
3	La radioattività	318
4	Decadimento radioattivo e attività	323
5	Gli effetti biologici delle radiazioni ionizzanti	327
6	Fissione nucleare	329
7	Reattori nucleari	331
8	Fusione nucleare	333
9	Le stelle e la nucleosintesi	335
LA STORIA DELLA FISICA		
	Enrico Fermi e l'energia nucleare	340
LA FISICA CON PYTHON  		
	Decadimento radioattivo e datazione di reperti archeologici	342
PENSA SOSTENIBILE 		
	Centrali nucleari: vantaggi, svantaggi e progetti futuri	345
MAPPA DEI FONDAMENTALI		
	ESERCIZI	349
	Problemi finali	356
	Test	357
	Pensa sostenibile   	359
VERSO L'ESAME		
		360

Figura 2.1 indice del capitolo di FN estratto dal manuale scolastico "La fisica di Cutnell e Johnson" di John D. Cutnell e al., edizioni Zanichelli

2.1.2 Una proposta di aggiornamento per l'insegnamento della FN

Nell'a.a. 2023-2024 il Politecnico di Milano presentò un'attività di formazione per docenti della scuola secondaria nell'ambito delle STEM, comprensivo di una sezione di FN. Il percorso era suddiviso in due moduli:

- il primo modulo consisteva in un percorso composto da quattro webinar sincroni con accesso a materiali didattici asincroni, da scegliere tra tre proposti, da svolgersi lungo un periodo di sei settimane. Le lezioni sarebbero state tenute da docenti del Politecnico di Milano su temi tecnico-scientifici innovativi, fornendo dispense e video didattici;
- il secondo modulo, distribuito nell'arco di quattro settimane, sarebbe stato composto da due webinar sulla didattica innovativa, accompagnati da dispense con riflessioni su differenti metodologie didattiche, dal connettivismo al TPACK (Technology, Pedagogy And Content Knowledge), dall'Authentic Learning al PBL (Project Based Learning), con riferimenti dettagliati a esperienze svolte nella scuola primaria o secondario del primo ciclo.

Gli argomenti dei tre percorsi a scelta erano i seguenti [All. 3]:

- struttura di internet
- fisica e l'ingegneria nucleare
- personaggi e scoperte della fisica moderna

Per il superamento del corso era richiesta la partecipazione al 90% del monte ore previsto dagli incontri online e la produzione di un project work finale. L'organizzazione e i contenuti del corso di fisica e ingegneria nucleare erano disponibili in una sintesi online, qui riportata [All. 4].

Nel momento dell'effettiva somministrazione del corso rivolto i partecipanti iscritti erano otto docenti di discipline scientifiche, ma di diversa formazione e inserite in diversi cicli e indirizzi scolastici. Vi erano laureati in matematica, fisica, ingegneria, biologia inseriti nella scuola secondaria del primo o del secondo ciclo, ma anche diplomati inseriti nel mondo della scuola come tecnici di laboratorio. Nel gruppo prevalevano docenti di età matura e di sesso femminile.

Ognuna delle quattro lezioni affrontava tematiche riassunte in dispense precedentemente preparate, contenenti una sezione di teoria e una di esercizi, in parte svolti e commentati. Questa attività di formazione è stata caratterizzata da alcuni indubbi punti forti:

1. estrema cura nella progettazione del percorso;
2. chiarezza espositiva del relatore;
3. proposta di esercizi inerenti ai temi trattati e ben calibrata per difficoltà;
4. chiarezza delle dispense soprattutto se riferite alle applicazioni della FN.

$$\begin{aligned}
\vec{P}_A + \vec{P}_X &= \vec{P}_L + \vec{P}_Y \\
E_A + E_X &= E_B + E_Y; \quad E_A = m_A c^2 + E_{KA} \quad \text{con } E_{KA} = m_A (\gamma - 1) c^2 \quad \text{è } \frac{1}{2}. \text{ Il valore del modulo quadro dello spin è quindi (vedi lezione 1):} \\
\vec{I}_A + \vec{I}_X &= \vec{I}_L + \vec{I}_Y; \quad \vec{I}_A = \vec{I}_B + \vec{I}_X \quad \text{etc.} \quad |\vec{S}|^2 = \hbar^2 s(s+1) = \frac{3}{4} \hbar^2 \\
q_A + q_X &= q_B + q_Y \\
\pi_A \pi_X &= \pi_L \pi_Y \quad (\pi_A = \pm 1 \text{ parità di } A \text{ etc.}) \\
B_A + B_X &= B_L + B_Y \quad (B_A = A_A \text{ etc.})
\end{aligned}$$

Figura 2.2 stralci dalle dispense del corso di formazione in FN del Politecnico di Milano, sulla sinistra le leggi di conservazioni espresse con formalismo rigoroso, sulla destra un richiamo al momento di spin.

Emergono tuttavia alcuni limiti dell'esperienza, che possono essere così riassunti:

1. i contenuti del corso coprivano la FN, ma anche sezioni correlate (relatività ristretta, meccanica quantistica, teoria quantistica dei campi), la cui trattazione anche solo parziale ha in qualche caso sottratto tempo e attenzione alle tematiche di FN;
2. in diversi momenti delle lezioni i contenuti sono risultati ostici alla platea dei partecipanti, sia perché specifici, sia perché non immediatamente ritenuti necessari alla comprensione dei temi trattati (Fig. 2.2);
3. le lezioni sono state svolte in modo frontale o dialogato, con scarse opportunità di collaborazione tra partecipanti;
4. nel merito dei contenuti si è preferito descrivere fenomeni e leggi della FN, lasciando spazi più ridotti per la comprensione e la modellazione dei fenomeni;
5. la composizione eterogenea dei partecipanti non ha favorito un'omogeneità di interventi che, nell'evoluzione del corso, sono stati spesso avanzati da pochi che spesso hanno occupato spazi eccessivi e con riflessioni personali non sempre pertinenti;
6. il numero dei partecipanti si è rilevato estremamente esiguo e unitamente alla modalità da remoto di svolgimento ciò ha avuto ripercussioni sull'efficacia del corso;
7. le lezioni si sono sempre protratte oltre il termine previsto (ore 19:00) e ciò ha rappresentato un'evidente criticità, dato che la collocazione oraria a fine giornata non ha favorito l'apprendimento di parti complesse della fisica soprattutto per una platea matura e molto disomogenea per esperienze formative e professionali pregresse.

Il corso organizzato dal Politecnico di Milano ha senza dubbio fornito un riferimento per la ricerca sviluppata in questo progetto, che ne ha recepito sia gli aspetti positivi sia i limiti, che ha cercato di superare nelle attività di insegnamento e formazione per studenti e insegnanti, oggetto di trattazione già a partire dai prossimi paragrafi.

2.2 Lezioni di FN per il liceo scientifico: la progettazione

2.2.1 Le ragioni di una scelta

Chiarito lo stato dell'arte della didattica della FN (cap. 1) e le tipologie di fonti a cui attingere gli elementi minimi per una didattica della FN (par. 2.1), si è quindi dato avvio alla progettazione di un corso di FN per studenti dei licei scientifici. Si è deciso di circoscrivere l'iniziativa solo a questo segmento di allievi per diverse ragioni:

- come già osservato (par. 1.2.4) la normativa ministeriale inquadra la FN tra le sezioni di riferimento per la didattica della fisica solo per il liceo scientifico, sede in cui il docente può deciderne l'insegnamento con diversi gradi di approfondimento;
- la possibilità di dedicare alla FN un ampio spazio nella programmazione didattica dei docenti del liceo scientifico permette di ideare un ciclo completo di lezioni che coprano una parte estesa della FN;
- la curvatura didattica del liceo scientifico, centrata sulle discipline STEM, permette di progettare lezioni di FN con un elevato livello di approfondimento, che possono comprendere nessi interni alla disciplina e pluridisciplinari (matematica, scienze della Terra, ...).

Un percorso di FN che ambisce ad essere completo e approfondito permette di essere validato ex-post, in modo da evidenziarne eventuali punti di forza e correggerlo nei punti in cui prevalgono le criticità. Un ulteriore vantaggio è costituito dalla possibilità di plasmarlo nuovamente, riducendolo nei contenuti o nell'approfondimento, nell'ottica di somministrarlo in altri segmenti educativi dove gli obiettivi formativi non richiedono una trattazione articolata della FN (altri indirizzi della scuola secondaria di secondo grado o altri livelli di istruzione).

Prima di procedere con l'esposizione della progettazione didattica, conviene richiamare le ragioni educative che supportano la scelta di rinnovare la didattica della FN nel liceo scientifico, che vengono di seguito riportate.

La FN ha il vantaggio di:

- ampliare le conoscenze scientifiche di base;
- confrontarsi con un paradigma scientifico completo;
- confrontarsi criticamente con contenuti necessari al compimento di scelte consapevoli di cittadinanza.

La FN si adatta all'insegnamento pre-universitario per le seguenti ragioni:

- è una sezione della fisica storicamente consolidata;
- è una parte circoscritta della disciplina, che comprende tutti gli aspetti caratteristici del metodo scientifico;
- il formalismo della fisica nucleare è semplice e trasmissibile dalla scuola di I grado ai livelli successivi;
- il suo statuto disciplinare è completo (esperimenti storici, interpretazione dei dati sperimentali, modellazione) è universalmente condiviso;

- contempla molteplici applicazioni (fisica nucleare in ambito industriale per la caratterizzazione di manufatti, fisica sanitaria, fisica nucleare per i beni culturali, ...);
- ha un ruolo importante nella sostenibilità energetica presente (reattori a fissione) e futura (fusione);
- è tuttora oggetto di ricerca, che si estende da applicazioni dirette (fusione nucleare, nuove tecniche sanitarie), a speculazioni di base (astrofisica, nucleosintesi, studio del nucleo, ...);
- ha impieghi nell'industria bellica.

2.2.2 Le premesse pedagogiche: active learning e inclusione

Al di là degli aspetti di merito relativi alla scelta dei contenuti di FN da contemplare nel corso, le prime considerazioni hanno riguardato più gli aspetti metodologici. Alla luce della riflessione didattica recente [127], si è cercato di realizzare una didattica inclusiva attraverso metodi di active learning, anche per il superamento del gender gap, così evidente nelle STEM. L'acquisizione delle competenze rappresenta una delle sfide didattiche su cui più si è concentrato il sistema scolastico italiano e, sebbene sia un processo non ancora completato e non sempre accolto con convinzione dal mondo scolastico, ha già dato vita a una varietà di esperienze positive, alcune delle quali hanno lasciato in traccia in letteratura [114]. Se per competenza si intende la

capacità di far fronte ad un compito, o ad un insieme di compiti, riuscendo a mettere in moto e ad orchestrare le proprie risorse interne, cognitive, affettive e volitive, e a utilizzare quelle esterne disponibili in modo coerente e fecondo [141]

una delle modalità per realizzare questa finalità di sistema è l'active learning, inteso come insieme di pratiche didattiche tese a favorire non un semplice apprendimento di nozioni, ma come strumento per il coinvolgimento attivo dello studente, che ne diventa soggetto attivo capace di collaborare coi compagni e interagire con il docente. Gli studi più recenti dimostrano la validità dell'active learning confrontato ai metodi tradizionali più improntati a una trasmissione nozionistica spesso veicolata attraverso lezioni frontali [55]. Queste esperienze rappresentano solo la parte finale di una riflessione didattica plurimillenaria, condotta sulla valorizzazione del coinvolgimento degli studenti, come mostra la seguente puntualizzazione già di Agostino:

"I discepoli considerano nella loro interiorità se le nozioni sono vere, sforzandosi, cioè, d'intuire la verità ideale" [2].

Nel corso dei secoli i contributi a questo ambito sono stati innumerevoli, ma se si pensa alle attuali ricerche di settore che utilizzano l'active learning per la riduzione dell'ansia [46] o la passività degli studenti [116], non si può non pensare all'accelerazione che in questo contesto ha portato il pedagogista Friedrich W. A. Fröbel. Nel corso della sua intera elaborazione teorica il filosofo tedesco ha infatti insistito molto sulla valorizzazione del gioco nei processi di apprendimento attivo durante l'infanzia ma anche nelle fasi successive, individuando nelle attività ludiche un motore per lo sviluppo delle capacità analitiche e nelle attività pratiche quello per lo sviluppo delle capacità di sintesi [72].

L'ultimo passo in questa direzione, la cui fortuna in ambito accademico è stata accompagnata anche da un successo tra gli addetti ai lavori della scuola, è indubbiamente dato dalla serie di lavori dello psicologo statunitense Howard Gardner, che con la teoria delle intelligenze multiple ha fornito una chiave di interpretazione della pedagogia, interessante di per sé ma soprattutto per le possibili declinazioni nell'ideazione di strumenti e prassi didattiche inclusive e innovative [76].

A questo riferimento pedagogico si è affiancata un'ulteriore riflessione in merito alle finalità del corso. Per realizzare l'obiettivo istituzionale di riduzione dell'abbandono scolastico che in Italia si configura come una vera emergenza nazionale, si è cercato di strutturare il corso in modo da rendere partecipi il maggior numero di studenti al processo di acquisizione delle competenze. Come quello dell'active learning, anche il tema dell'inclusione scolastica inteso in senso ampio non è nuovo alla concettualizzazione pedagogica. L'idea di inclusione è fondata sull'idea dell'eguaglianza degli individui: il pensatore francese Marie-Jean-Antoine-Nicolas de Condorcet sviluppa l'idea di una scuola universale libera efficace e inclusiva [45]:

"[...] stabilire tra i cittadini una eguaglianza di fatto e rendere reale l'eguaglianza politica riconosciuta dalla legge. Questo deve essere il primo obbiettivo di una istruzione nazionale e, da questo punto di vista, essa è per il potere pubblico un dovere di giustizia".

Questa impostazione tipicamente illuministica definisce un'uguaglianza di partenza e un'uguaglianza di obiettivi. Averlo come riferimento per la progettazione didattica è fondamentale perché si contrappone a una attuale e fraintesa idea di personalizzazione della scuola, che tende a parcellizzare le esperienze formative per favorire l'emersione delle personalità degli studenti più adatti, in una competizione che sfavorisce gli elementi più deboli finendo per escluderli dal processo di apprendimento.

In questa cornice pedagogica, tra i due poli dell'active learning e dell'inclusione scolastica, si è così inserita la progettazione del corso di FN, che ha tenuto conto anche del quadro normativo europeo, in particolare dei 17 obiettivi dell'Agenda europea per lo sviluppo sostenibile² (Istruzione di qualità (goal 4), Energia pulita e accessibile (goal 7), Imprese, innovazione e infrastrutture (goal 8), Città e comunità sostenibili (goal 11)) e della "Raccomandazione del Consiglio sulle competenze chiave per l'apprendimento permanente"³ a cui ci è riferiti soprattutto per le competenze numeriche, scientifiche e ingegneristiche, per quelle digitali e tecnologiche di base, per quelle interpersonali, per la capacità di imparare nuove competenze, per la cittadinanza attiva e l'espressione delle competenze culturali [65].

2.2.3 Il pragmatismo di C. S. Peirce come riferimento filosofico

La scelta di un modello pedagogico dipende spesso dal periodo storico in cui si colloca l'esperienza didattica, dal contesto di istruzione ma, come è stato fatto emergere, soprattutto dalle finalità educative che si perseguono. L'inclusione e l'active learning sono le priorità formative della pedagogia funzionalistica. Questa corrente di pensiero nasce nella seconda metà del XIX secolo e ha tra i suoi principali protagonisti i filosofi Édouard Claparède e John Dewey. Il primo viene ricordato per aver sistematizzato le pratiche didattiche, valorizzando i momenti di gioco, i processi imitativi e le esperienze

²Reperibili in: <https://sdgs.un.org/goals>

³Reperibile in: <https://education.ec.europa.eu/it/focus-topics/improving-quality/key-competences>

personalizzate. Dewey approfondisce il solco tracciato da Claparède e chiarisce che l'educazione è un processo centrato sull'individuo, che impara facendo (*learning by doing*). In questo processo si alternano suggestioni e dubbi che portano infine a una fase di intellettualizzazione e di formazione di una ipotesi o di una congettura da validare. Entrambi figli del positivismo, definiscono il funzionalismo come paradigma pedagogico in cui diventano centrali le funzioni adattative che portano alla formazione di una conoscenza.

Come ogni pedagogia, anche il funzionalismo si fonda su solide basi filosofiche e prende le mosse, in particolare, dal pragmatismo americano che ha avuto tra i suoi primi padri lo psicologo e filosofo di origine irlandese William James e il semiologo statunitense Charles Sanders Peirce. Per questo lavoro di progettazione didattica si è fatto soprattutto riferimento a quest'ultimo, che del pragmatismo ha fatto una forma di filosofia dell'esperienza tesa anche alla comprensione dei processi di apprendimento. Un breve riassunto dei momenti biografici più significativi può essere utile per tracciare un ritratto filosofico di C. S. Peirce.

Nato nel 1839 a Cambridge (Massachusetts, USA) da una facoltosa famiglia della East Coast, ha una formazione di impronta scientifica, tanto da laurearsi in chimica prima di interessarsi alla logica e alla teoria della conoscenza. Dopo aver preso le distanze dalla filosofia kantiana accostandosi alle teorie hegeliane, con W. James e il matematico Chauncey Wright di forti convinzioni darwiniane partecipa al Metaphysical Club di Harvard, dove vengono poste le prime basi di quello che verrà denominato pragmatismo americano [160]. Se James delinea una curvatura più psicologica del pragmatismo, Peirce ne fonda la dimensione logica, epistemologica e semiotica, in un processo che dallo studio delle categorie (fenomenologia) giunge a tesi del tutto originali e alla teoria della faneroscopia [60]. Semplificando forse eccessivamente i concetti gnoseologici comuni alle teorie pragmatistiche, si può affermare che alla base di tutte c'è l'idea che conoscere significa acquisire delle abitudini [28]:

"Imparare significa acquisire un *habitus*" [TdA]

o, con le parole del poeta Paul Valéry [175], che nello stesso periodo scriveva:

"Non credo che le conoscenze siano quelle che vengono dimenticate una volta chiuse in un libro, ma solo quelle che si sovrappongono alle mie abitudini e possono dar vita a una funzione [...], al limite, la conoscenza è la perfezione dell'automatismo. Sapere è rispondere senza riflettere". [TdA]

Il problema del pragmatista non sta mai nel valutare la veridicità di un predicato: la verità non si autodefinisce, non si autosostiene, non è infallibile a priori. Un predicato non si definisce attraverso la sua coerenza logica interna, ma in funzione delle conseguenze che genera. La verità è un evento, un processo; la verità sta nel suo processo di validazione [99].

Queste considerazioni possono risultare più chiare con un esempio. Si supponga di fornire a uno studente della scuola secondaria di I grado, che ha appena imparato il teorema di Pitagora e capito la dimostrazione, di risolvere questo problema P_1 :

P_1 : Un uomo si trova nel cortile di casa e si sposta di 4 m dalla posizione che occupa in direzione N-S, verso Sud. L'uomo procede poi verso Est, lungo la direzione O-E, di 3 m. Di quanto si è spostato complessivamente l'uomo?

Con buona probabilità lo studente risponderà sfruttando il teorema di Pitagora, appena appreso, e otterrà che lo spostamento complessivo è pari a 5 m.

Si supponga ora che allo studente venga assegnata una consegna analoga, il problema P_2 :

P₁: Un uomo si trova al Polo Nord (P) e si sposta di 3648 km dalla posizione che occupa in direzione N-S, verso Sud, raggiungendo il punto A. L'uomo procede poi verso Est, lungo la direzione O-E, spostandosi di 3648 km, raggiungendo il punto B. Di quanto si è spostato complessivamente l'uomo?

Se lo studente dovesse applicare il teorema di Pitagora al triangolo $\triangle PAB$ rettangolo in A otterrebbe per lo spostamento complessivo un valore pari a $BP = 3648\sqrt{2} \approx 5144$ km. Nel momento in cui allo studente viene fornito il risultato corretto di 3468 km, questi probabilmente non avrà dubbi sulla validità del teorema di Pitagora e neppure sulla sua dimostrazione, vale a dire sulla coerenza logica della teoria che sta applicando. Può essere che controlli ulteriormente lo sviluppo della risoluzione del problema, cercando errori nei procedimenti di calcolo. Alla fine dovrà però scontrarsi con il fatto che il modello, non la teoria, che ha applicato non permette di ottenere la risposta corretta. Il problema P₂ pone lo studente di fronte a una sfida nuova, in termini di validazione e falsificazione delle proprie verità. Risolvere il problema P₂ significherà allora riformulare non solo un procedimento di calcolo, ma un'intera visione del mondo in modo che attraverso nuove regole di corrispondenza tra la teoria e il "mondo degli oggetti" possa arrivare alla risposta corretta. Quando lo studente capirà che la geometria euclidea comporta necessariamente una visione piana intrinsecamente coerente ma inadatta a risolvere i

problemi come la consegna P₂, allora tornerà a ragionare sulla natura del triangolo $\triangle PAB$ che rettangolo, in $\hat{A}$ ma anche in $\hat{B}$ e $\hat{C}$, e che la geometria più adatta a risolvere questo genere di problemi è quella sviluppata sulla sfera. Questo genere di considerazioni, sviluppate dal matematico britannico Frank Plumpton Ramsey [148], nello stesso ambito dei problemi P₁ e P₂ sopra proposti, permettono di affermare che una teoria è considerata vera non solo se essa è intrinsecamente coerente o se è coerente con altre teorie, ma se le conseguenze che genera a livello pratico permettono la risoluzione di problemi, ossia se essa è coerente non con altre teorie ma con la realtà. La verità non è quindi una proprietà delle teorie, non si colloca neppure in un contesto rappresentazionalistico in cui la teoria deve corrispondere al dato reale, ma è il risultato di un'esperienza in cui le teorie sono utensili in una ideale cassetta degli attrezzi di cui disporre all'occorrenza.

Al di là delle considerazioni che un simile discorso filosofico apre e che non sono lo scopo di questo lavoro, può essere utile ricordare che in seguito alla riflessione gnoseologica di stampo pragmatistico attorno al concetto di verità scientifica si è sviluppata la successiva epistemologia novecentesca, che ha fornito specificazioni più profonde e per certi versi divergenti su cosa si intende per scienza, verità e certezza scientifica. Basti pensare all'opera del filosofo austriaco Karl Popper e dei suoi allievi come Imre Lakatos o Paul Feyerabend e al concetto di falsificazionismo da lui introdotto [144, 143], o alle critiche a lui mosse dal fisico e epistemologo statunitense Thomas Kuhn, con la teoria delle rivoluzioni scientifiche e con argomenti anche polemici sul concetto di "scoperta scientifica" [109, 110] o ai contributi critici di Ludovico Geymonat [78]. Ampliamenti, critiche, divergenze non devono far pensare che nell'ambito delle teorie della conoscenza e della rappresentazione il pragmatismo sia una filosofia superata: sono proprio i contributi ad esso successivi che lo rendono tuttora attuale e fonte di riflessione per la ricerca epistemologica [80].

Se la teoria pragmatistica è stata in qualche modo aggiornata per quel che concerne la sua visione della scienza, il suo contributo in ambito educativo resta valido e ancora poco esplorato. In questo lavoro è stato il principale riferimento per porre le basi di una didattica inclusiva e basata sull'apprendimento attivo.

Come l'individuo conosce? Quali sono le tappe della sua formazione? Come fa esperienza, come interpreta una serie di dati, come acquisisce e come rielabora un sapere? Quali sono le strategie per far riconoscere l'errore e favorire lo sviluppo di un sapere efficace? Una delle riflessioni più originali che dà risposta alle domande precedenti si incontra proprio nella teoria della rappresentazione di Charles S. Peirce, in particolare nella sua faneroscopia. Per Peirce anche le esperienze più eterogenee – chiamate *phanerons* o *faneron* – sono accomunate da tre momenti particolari, che chiama “tre universi dell'esperienza”: *firstness*, *secondness* e *thirdness* [92]. Sono categorie tra loro correlate e non afferrabili nella loro purezza, scrive Rossella Fabbrichesi nella già citata analisi ampia e precisa del pensiero di Peirce [60]. Se ne possono dare sommariamente alcune caratteristiche, che risultano più comprensibili attraverso un esempio. Supponiamo di analizzare l'esperienza (*faneron*) che un bambino compie la prima volta che si accorge di un fulmine e ne sente il rumore del tuono associato. Come possiamo scomporre senza troppo alterare le tre categorie che si intrecciano nell'esperienza del bambino?

Firstness: è la sensazione immediata, una qualità di feeling nella sua immediatezza, è la manifestazione pura del fulmine.

Secondness: è la dualità rispetto alla *firstness*, è la reazione. È un'esperienza di shock, che in questo caso si manifesta come stupore o paura e continua ad intrecciarsi nel compimento della *firstness* (alla visione del fulmine è associato il rombo del tuono, temporalmente successivo, perché la *firstness* non è necessariamente immediata).

Thirdness: è il momento della mediazione, del riconoscimento, dell'interpretazione, non necessariamente successivo agli altri ma spesso inanellato alla *firstness* e alla *secondness*. È il momento della rappresentazione, che dà la regola di condotta. Non è più la fase della reazione, ma è la categoria della relazione tra il soggetto e la manifestazione pura del fenomeno. Il fenomeno non esiste più soltanto: il fenomeno proprio perché percepito e rappresentato, diventa reale. Il fulmine è un fatto esistente, è il vero fatto svincolato da tutto, il vero fatto astratto. Per Peirce l'esperimento come fatto che accade è l'unico momento astratto del processo di conoscenza. Ma quando il fulmine viene visto da qualcuno non solo esiste, diventa reale. Non è più un fatto svincolato da tutto, è un fatto entrato in relazione. Con la *thirdness* l'individuo perviene alla presa di coscienza.

2.2.4 Dalla faneroscopia di Peirce all'Inquiry Based Learning

Le precedenti considerazioni di carattere generale possono essere declinate nel contesto specifico dell'apprendimento, una volta che lo si consideri alla stregua di una delle tante esperienze possibili. Lo studente che si prepara a conoscere attraverserà i “tre universi dell'esperienza”. Tornando a uno degli obiettivi specifici di questa ricerca, cioè al rinnovamento della didattica della FN, l'impianto gnoseologico peirciano si è reso utile nell'introduzione delle tematiche di FN trattate in ogni lezione prevista dal corso per gli studenti, permettendo anche l'integrazione di tecniche educative innovative, ma consolidate, nella recente didattica [61]. Se si vuole rendere significativa l'esperienza dell'apprendere, è necessario realizzare le condizioni perché nei setting educativi si abbiano i tre momenti individuati da Peirce, la *firstness*, la *secondness* e la *thirdness*. È stato già ricordato (par. 2.2.2) che l'active learning fornisce buone strategie didattiche per superare l'ansia prodotta da una didattica tradizionale e ridurre la passività degli studenti [46, 116]. Per realizzare contesti di *firstness*, non si tratta certamente di far vivere agli studenti esperienze particolarmente traumatiche in cui si manifesti uno shock cognitivo. Si tratta di porre problemi, a volte non banali a volte soltanto indirizzati a scardinare misconoscenze pregresse o nozioni non motivate, in modo che lo studente individualmente o confrontandosi coi compagni possa attivamente acquisire informazioni

o conoscenze più ampie, formulare mappe logiche, fino ad arrivare a semplici modelli scientifici per la spiegazione di fenomeni. Così, a livello didattico, insegnante diventa colui che agevola questi processi, costruendo diverse possibilità di *faneron*, graduandole per difficoltà e monitorando i processi cognitivi. Per favorire un approccio utile a spiegare i principali fenomeni di FN e tenuto conto che una pratica di laboratorio diffusa non è di semplice applicazione, si è deciso di affrontare la FN per problemi teorici finalizzati alla formulazione di concetti, concordemente a un approccio pragmatistico, «osservando e partecipando all'applicazione di questi concetti nella soluzione dei problemi» [109]. Questo genere di approccio didattico è speculare e fondativo dell'*Inquiry Based Learning* (IBL), una metodologia didattica che pone al centro del processo cognitivo lo studente che costruisce i concetti step-by-step [124] attraverso diverse fasi. Questi momenti sono *l'engagement*, *l'exploration*, *l'explanation*, *l'elaboration* e *l'evaluation* [32] e possono essere realizzati completamente o parzialmente, ma sempre con lo scopo di realizzare una didattica attiva. In questo progetto di ricerca, in particolare, si sono costruiti esempi, quesiti, problemi in cui l'esposizione di un fenomeno nuovo genera una sorpresa, utile a tradire le attese degli studenti. In questo modo l'apprendimento diventa l'esito di un'esperienza contraddittoria, una relazione oppositiva con le aspettative [140] e può realizzarsi sia individualmente, sia costruendo setting per lavori peer to peer, in modo che il processo di conoscenza nasca da dinamiche di confronto tra studenti, che possono far uso occasionalmente di ausili (internet, smartphone, conti e bozze su carta, grafici e immagini) [161, 174]. Tale pratica si realizza così attraverso un processo creativo detto *abduzione* che è al tempo stesso inferenziale e intuitivo, un ragionamento caratterizzato da una struttura logica entro la quale trova posto una componente intuitiva [33]. I contenuti del corso sono quindi dettati dall'obiettivo di far acquisire agli studenti gli strumenti per una comprensione profonda della varietà dei fenomeni di FN e dalla scelta metodologica appena illustrata. Per superare l'attuale pratica didattica in cui si privilegia una descrizione del nucleo atomico in forma assiomatica (nucleoni, isotopi, legge del decadimento radioattivo, descrizione dei processi di fissione e fusione, applicazioni), si è progettato un percorso teso a indagare le ragioni profonde che spiegano i fenomeni di FN come i decadimenti o le reazioni nucleari e le cause che li determinano (caratteristiche del legame nucleare, barriera di potenziale, effetti quantistici). Una simile metodologia richiede tempi non brevi per la sua realizzazione, soprattutto se in ogni fase della pratica didattica è richiesta una partecipazione attiva degli studenti. Per questo motivo non sono stati contemplati, se non parzialmente, i contenuti relativi alle applicazioni (dosimetria e effetto delle radiazioni, produzione di energia da fissione e fusione, applicazioni in campo artistico e archeologico, incidenti nucleari), per i quali tuttavia è possibile reperire riferimenti bibliografici esaurienti.

2.2.5 Strumenti e setting didattici

Il corso di FN è stato progettato per uno sviluppo in forma dialogata e partecipata. Si è scelto di utilizzare la soluzione della forma dialogata per l'introduzione di contenuti semplici, attraverso domande o problemi posti ad hoc, in modo da favorire gli interventi individuali e la possibilità di guidare la discussione. In questo modo possono essere introdotti la relazione massa-energia, il concetto di energia di legame, l'instabilità nucleare, i prodotti dei decadimenti, le condizioni per la fissione e l'energia di attivazione nella fissione indotta da neutroni termici.

Per i contenuti complessi (per es.: forma del potenziale nucleare) e per la costruzione di modelli fisico-matematici più o meno semplici adeguati alla spiegazione dei fenomeni (per es.: densità nucleare, forma del potenziale nucleare, numero atomico massimo degli

isotopi stabili) si è ipotizzata la lezione partecipata, in cui ai problemi posti dal docente segue il contributo degli studenti come sintesi di una attività autonoma di analisi e studio. In questo caso è previsto che il problema potesse essere affrontato individualmente dagli studenti o in gruppo.

Nel caso delle lezioni partecipate, gli strumenti didattici progettati per le pratiche di active learning sono stati i seguenti: questionari on line tramite smartphone, questionari cartacei e il metodo del puzzle descritto successivamente.

I questionari on line sono stati preferiti per ricognizioni rapide di conoscenze pregresse in ambiti circoscritti, per l'introduzione di contenuti elementari o per la valutazione del gradimento degli studenti [90, 130]. Si tratta di attività che non richiedono particolare impegno da parte dei soggetti coinvolti e che dopo la somministrazione del questionario [All. 2] permettono al docente una rapida analisi quantitativa dei dati.

Per quanto riguarda i questionari cartacei, questi rappresentano un utilissimo strumento quando allo studente è richiesta un'analisi di contenuti complessi (testo, dati, grafici) da correlare tra loro e inquadrare in un'ipotesi interpretativa né semplice, né immediata. Un esempio è dato in App. 3.

Somministrare il questionario a inizio lezione realizza lo scopo duplice di verificare quanto si può considerare come già acquisito e soprattutto di stimolare la curiosità e generare in modo giocoso una discussione su tematiche ancora incognite. Con questa modalità vengono così formalizzati alcuni temi complessi della fisica nucleare: la forma del potenziale nucleare, l'impossibilità di avere elettroni nel nucleo in una configurazione stazionaria, il riconoscimento degli stati permessi o proibiti a partire dall'analisi della buca di potenziale $V(r)$ e dei livelli energetici E del nucleo.

Il metodo del *Puzzle* è invece originale ed è stato pensato e svolto per questo progetto. Inizialmente è stato testato su due gruppi di studenti universitari (A e B), per valutarne l'efficacia, le criticità e le eventuali correzioni da apportare. Il gruppo A era costituito da studenti di formazione scientifica, iscritti a un corso di laurea fortemente interdisciplinare in ambito ambientale. Nel gruppo B, invece, gli studenti erano orientati alla professione docente di scuola superiore e hanno partecipato e riflettuto sull'esperienza del *Puzzle* all'interno delle attività laboratoriali dell'insegnamento PED (Preparazione di Esperienze Didattiche) dei corsi di laurea in Fisica e matematica a cui sono iscritti. Il metodo si rifà alle esperienze dei cloze, usati spesso in ambito linguistico ma non solo [165, 176] e può essere visto come un suo ampliamento. A una classe di studenti, suddivisi in gruppi, viene distribuito un testo a loro incognito, in cui alcune frasi/periodi sono incompleti. Le lacune, o campi vuoti, sono segnalate da lettere. A ogni lettera la coppia di studenti deve assegnare un lemma, un numero, un'intera frase che completa il periodo, scelta tra una serie di proposte in un foglio separato, che contiene anche risposte non plausibili e quindi non utilizzabili. Il foglio con le possibili risposte contiene quindi molte più scelte dei campi da riempire. Un esempio è dato in App. 9.

I campi vuoti sono stati individuati in posizioni che permettessero allo studente di intuire e quindi identificare le risposte, evitando la scelta casuale. Anche le possibili alternative ad ogni risposta corretta, erano sempre plausibili ma inevitabilmente scorrette. Attraverso deduzioni logiche o da inferenze ottenute a partire dal testo, o attraverso la coerenza interna di un elemento simbolico o figurativo, o attraverso la relazione o la concatenazione di elementi di diverso tipo (immagini, formule, testo) lo studente poteva sempre riconoscere la soluzione corretta, sfruttando le diverse forme di intelligenza, in particolare quella linguistica e logico-matematica [75]. I test sui gruppi universitari hanno dato questi esiti:

- la maggioranza del gruppo A ha affermato che il metodo del *Puzzle* è più efficace

della lezione frontale (8/12), che l'operazione di riempimento non distrae dai contenuti esposti nel testo (11/12), e che l'uso di immagini con campi da completare arricchirebbe l'attività e la renderebbe più efficace (9/12).

- secondo gli studenti del gruppo B la metodologia Puzzle è utile per veicolare nozioni di base, meno per contenuti di media difficoltà o complessi. In termini di efficacia, la modalità del Puzzle è vista come un'ottima alternativa alla flipped classroom ed è confrontabile a una lezione frontale.

Attraverso questo metodo possono essere introdotti concetti fondamentali relativi alla densità nucleare e al legame tra il raggio nucleare e il numero di massa. L'utilizzo degli strumenti didattici appena esposti ha il compito di favorire l'attivazione del pensiero critico degli studenti, sia nella fase della riflessione individuale, sia nel confronto peer to peer. Nella fase operativa, infatti, si sono costituiti dei gruppi di lavoro e per la selezione degli studenti di ogni gruppo si è operato con il supporto degli insegnanti. In questo modo in ogni esperienza sul campo si sono sempre venuti a formare aggregati piccoli formati da 3-4 studenti eterogenei e in cui c'era sempre almeno una figura leaderistica capace di guidare e far partecipare tutti i componenti del gruppo, coinvolgendo i livelli di intelligenza interpersonale e intrapersonale [77]. Quella del leader non è tanto una figura dominante-repressiva, ma assume un ruolo maieutico. Porta il compagno nella zona di creatività tipica della *thirdness* peirciana. In questa accezione la conoscenza non è mai l'esito di un automatismo, non è il risultato di un meccanicismo deterministico, ma si può realizzare dove c'è la negazione di un automatismo: la conoscenza nasce come possibilità di errore. Tra lo stimolo esterno e la risposta di chi sta per imparare cade un intervallo, dove può esserci esitazione, indeterminazione dell'efficacia causale, in un processo creatore di effetti [35]. Mentre nella lezione frontale vengono spesso presentati contenuti da assimilare istantaneamente, nelle dinamiche di insegnamento attivo il confronto dialettico diluisce nel tempo l'esperienza della conoscenza. Quando gli studenti lavoravano in queste attività cooperative, il processo didattico si configurava quindi come un vero e proprio Problem Based Learning (PBL) training (definizione del problema, analisi del problema attraverso un brainstorming, ricerca di ipotesi risolutive attraverso risorse individuali o ausili esterni al gruppo, discussione dei risultati e formulazione di una risoluzione condivisa, valutazione collettiva in aula dei risultati e autovalutazione di processo) [155], in cui la conoscenza si realizza in un rapporto di trazione più che come astrazione [125]. Nonostante l'efficacia del metodo PBL sia stata ampiamente discussa e in qualche caso anche contrastata [154, 4, 100] in questo contesto si è mostrato un valido strumento di progettazione didattica, come sperimentato nell'insegnamento della fisica o in altri campi [24], [38], [153].

Nel confronto tra pari l'uso degli apparati didattici (questionari su carta, Puzzle, smartphone per la ricerca online, appunti e libri di testo) non rivestono un semplice ruolo strumentale. Sono anche il mezzo con cui attraverso il gesto fisico (la scrittura in primis, ma anche lo scambio di informazioni, la rappresentazione grafica, il calcolo) l'individualità dello studente può emergere nello spazio e occupare l'alterità, conglobandola, facendola propria, permettendo una modificazione dell'io che è alla base di qualsiasi apprendimento. Si conosce nella misura in cui ci si modifica e ogni metamorfosi di sé è possibile solo attraverso un percorso che ha tutte le caratteristiche della trasformazione iniziatica e che avviene dentro ma anche fuori di sé, attraverso procedure e tecniche ripetute. La modificazione del mondo esterno comporta l'evoluzione di sé e così la tecnica intesa come sfruttamento di utensili, diventa da strumento di distruzione (mito di Prometeo) [123] strumento di evoluzione positiva (mito di Demetra) [124]. La conoscenza permette all'uomo di estendersi fuori di sé [152]:

"[...] il vero corpo dell'uomo è ben al di là del suo corpo. Il suo cervello regna sulle sue città e sulle sue fabbriche".

Non è l'uomo che inventa la tecnica. Sono i processi tecnici a determinare l'uomo [20], [146].

2.3 Lezioni di FN per il liceo scientifico: l'esperienza sul campo

2.3.1 Il corso extracurricolare per studenti di quarta

Per cogliere gli elementi qualificanti la progettazione del corso di FN può essere utile considerare le due principali esperienze in cui è stato sviluppato. Grazie alla collaborazione con alcuni docenti di matematica e fisica del liceo scientifico "F. Enriques" di Lissone (MB), sono stati realizzati infatti due corsi di FN per studenti, uno pomeridiano in forma extracurricolare a cui gli studenti hanno aderito per interesse personale, l'altro in forma curricolare nelle ore di lezione di fisica.

Per quanto riguarda il primo le caratteristiche possono essere così elencate:

- Numero di studenti: 30 suddivisi in due classi da 15
- Classe di appartenenza: studenti provenienti da cinque classi quarte
- Numero di ore: 10 ore complessive suddivise in lezioni pomeridiane da 2 ore l'una
- Periodo: 31 ottobre 2023 - 8 febbraio 2024
- Modalità: corso extracurricolare, pomeridiano, in presenza
- Docente: Paolo Teruzzi

Una classe è stata considerata come classe Test (T) e l'altra come classe di Controllo (C). Nella classe Test il percorso è stato affrontato secondo la progettazione innovativa illustrata nei paragrafi precedenti. Nella classe di Controllo, invece, si è seguito un approccio in cui gli stessi argomenti venivano presentati in forma tradizionale, con lezioni frontali, aderendo alla sequenza di contenuti proposti dal testo in adozione e secondo le prassi didattiche usuali impiegate nell'insegnamento della FN nei licei.

Sono stati individuati problemi da sottoporre a entrambe le classi, in cui sono stati formati gruppi di lavoro di due/tre studenti ciascuno con le caratteristiche già illustrate nei paragrafi precedenti, con lo scopo di attivare dinamiche inclusive tese a ridurre i conflitti cognitivi degli alunni più fragili. In generale, per la classe Test le attività fornivano spunti e problemi con cui costruire elementi di teoria o veri e propri modelli per la spiegazione di fenomeni. Per la classe di Controllo sono stati spesso usati come verifica della validità del percorso tradizionale.

Di seguito vengono quindi presentate le caratteristiche della generica lezione per la classe Test. In ogni lezione individuate diverse esperienze (faneron), suddivise nei tre momenti firstness, secondness e thirdness, ognuno dei quali veniva affrontato con strumenti didattici e modalità di confronto diversi (Tab. 2.1):

Il faneron si articolava quindi nello studio di un problema semplice o complesso, il cui contesto era poco o per nulla noto, da risolvere con intuizioni, idee, proposte di leggi fisiche indirizzate alla costruzione di un modello adatto alla risoluzione dei problemi stessi. Nella Tab. 2.2 sono elencati alcuni esempi di quesiti e problemi sottoposti durante

Faneron	Strumenti didattici	Modalità di confronto
<i>Firstness</i>	Problemi teorici semplici o complessi	Individuale (problemi semplici) Di gruppo (problemi complessi)
<i>Secondness</i>	Costruzione di una semplice spiegazione, teoria, modello	Individuale (problemi semplici) Di gruppo (problemi complessi)
<i>Thirdness</i>	Esposizione del modello, delle leggi fisiche, della teoria	Uno studente (portavoce) espone oppure compila il materiale cartaceo per l'intero gruppo

Tabella 2.1 suddivisione degli strumenti didattici e delle modalità di confronto in funzione dei tre universi dell'esperienza: *firstness*, *secondness* e *thirdness*.

Faneron	Strumenti e metodi didattici	Esempi di quesiti e problemi
<i>Firstness</i> (Peirce) <i>Engage</i> (IBT)	Puzzle Questionario Problemi su carta	- Costruzione del potenziale nucleare - Perché è necessario ipotizzare l'energia di legame? - Da cosa dipendono e quale forma assumono i diversi termini dell'energia di legame? - Dalla barriera di potenziale all'effetto tunnel: stati permessi e proibiti - Perché nel suo stato stazionario il nucleo non contiene elettroni? - A quali proprietà deve soddisfare il decadimento nucleare? - Spiegazione della stabilità e dell'instabilità: perché il bismuto è l'ultimo elemento della tavola periodica a possedere almeno un isotopo stabile?
<i>Secondness</i> (Peirce) <i>Explore</i> (IBT)	Lavoro individuale Riflessione di gruppo L'insegnante partecipa solo alla fine dei lavori e non interviene nelle discussioni	Esposizione scritta o orale
<i>Thirdness</i> (Peirce) <i>Explain</i> (IBT)	Accesso a internet per la risoluzione di problemi complessi	

Tabella 2.2 esempi di quesiti e problemi, relativi strumenti e metodi didattici, in funzione dei tre universi dell'esperienza": *firstness*, *secondness* e *thirdness* o della fasi dell'IBL.

le lezioni, i metodi con cui sono stati affrontati dagli studenti, in funzione dei tre momenti dell'esperienza sia nella lettura peirciana, sia nel modello Inquiry Based Learning (IBL).

Nelle tabelle successive sono illustrati i risultati ottenuti nelle due diverse classi, in

particolare sono mostrati i casi in cui nella classe è emersa una risposta corretta immediata, senza l'ausilio del docente, corretta ma ottenuta tramite una discussione guidata dall'insegnante o errata. Nella Tab. 2.3 gli esiti sono relativi alle prime lezioni, mentre in Tab. 2.4 all'ultima lezione, dedicata alla fissione nucleare.

Problema	Risposta corretta immediata	Risposta corretta guidata	Risposta errata
Perché i nuclei decadono?	T	C	
Perché in un decadimento alfa viene emesso un nucleo di elio 4?	T		C
Quali sono le condizioni che, in generale, rendono preferibile un decadimento alfa a un decadimento beta?	T	C	
Perché un decadimento non è istantaneo?			C, T
Qual è la legge del decadimento?	T		C
Qual è la legge con cui decadono i nuclei in funzione del tempo? (si faccia un'ipotesi non necessariamente analitica, da esporre anche in modo discorsivo)		C, T	
Totale	0C, 4T	3C, 1T	3C, 1T

Tabella 2.3 problemi posti e relative risposte delle classi, Test (T) e Controllo (C) – I batteria

Problema	Risposta corretta immediata	Risposta corretta guidata	Risposta errata
Why are fission and fusion possible?	C		T
Why are neutrons released in fission?	C, T		
On average, is more energy released in a fission or a fusion?	T		C
How much energy is generated in a fission of Uranium-235?	T		C
A uranium-235 nucleus fission and displaces a grain of sand. What altitude does the grain reach?		C, T	
Totale	2C, 3T	1C, 1T	2C, 1T

Tabella 2.4 problemi posti e relative risposte delle classi, Test (T) e Controllo (C) – II batteria

Gli esiti riportati nelle tabelle precedenti evidenziano che per la prima batteria di quesiti gli esiti positivi (risposte corrette, immediate e guidate) hanno rappresentato l'80% del totale per la classe Test e il 50% della classe di Controllo. Per la seconda batteria, costituita da quesiti relativi a un fenomeno più complesso, i due valori sono stati, rispettivamente dell'83% e del 60%. Ciò permette di validare la progettazione adottata per le lezioni di FN e di rifinirla anche in base alle criticità emerse, sia in termini di svolgimento che di valutazione degli esiti. Queste possono essere così riassunte:

- Campione ridotto su cui valutare l'effetto del corso
- Difficoltà a mantenere due approcci didattici diversi nelle due classi, dovuta alla presenza dello stesso docente
- Difficoltà a introdurre concetti di elettromagnetismo per studenti di quarta liceo.

In merito all'ultima criticità, si era inizialmente pensato che il percorso didattico di FN per studenti ignari della sezione di elettromagnetismo, potesse essere un punto di

forza del corso. Dato che i fenomeni di FN si sviluppano in un contesto in cui i livelli atomici non sono pressoché coinvolti e così come in generale i fenomeni di fisica atomica, si era inizialmente pensato che l'assenza di conoscenze e quindi anche di misconoscenze di fisica atomica o anche soltanto l'impossibilità di una sovrapposizione dei due ambiti potesse essere un vantaggio per l'esperienza didattica. La semplice introduzione del problema elettrostatico, le unità di misura e, prima tra tutte, lo studio della repulsione coulombiana tra protoni nel nucleo hanno però rappresentato un ostacolo concettuale a cui è stato dedicato un tempo non ridotto, inizialmente non preventivato.

2.3.2 Il corso curricolare per studenti di quinta

A seguito del corso pomeridiano per gli studenti di quarta liceo, nello stesso istituto è stato organizzato un intervento curricolare per una classe quinta, nel periodo di chiusura d'anno in cui solitamente viene lasciato spazio alla fisica moderna[169]. L'attività ha preso le mosse da quella svolta al pomeriggio, anche se nella fase di co-progettazione con l'insegnante della classe si sono rifiniti alcuni dettagli (contenuti, strumenti di lavoro, processi didattici) relativi alle criticità emerse. Si è inoltre arricchito il percorso didattico, con la formulazione di prove di valutazione, poi utilizzate dall'insegnante per l'assegnazione della proposta di voto per lo scrutinio di fine anno.

Questo è stato in sintesi il quadro in cui si sono svolte le lezioni:

Per quanto riguarda il primo le caratteristiche possono essere così elencate:

- Numero di studenti: 17
- Classe di appartenenza: studenti di un'unica classe
- Numero di ore: 10 ore complessive comprensive della prova orale finale
- Periodo: 6 marzo 2024 - 27 marzo 2024
- Modalità: corso curricolare, mattutino, in presenza
- Docente: Paolo Teruzzi

Di seguito vengono esposti gli argomenti trattati ad ogni lezione e le modalità didattiche.

I lezione

Argomenti

1. I contributi dell'antichità all'ipotesi atomistica
2. Richiami sulle leggi ponderali e le ipotesi di Avogadro e Cannizzaro
3. Il modello di Thomson e la struttura atomica
4. I costituenti dell'atomo
5. Richiami sul modello di Rutherford e sulle dimensioni del raggio nucleare (Fig.2.3)

Modalità di svolgimento

1. Questionario con discussione sulle risposte
2. Questionario aperto assegnato per lo studio domestico

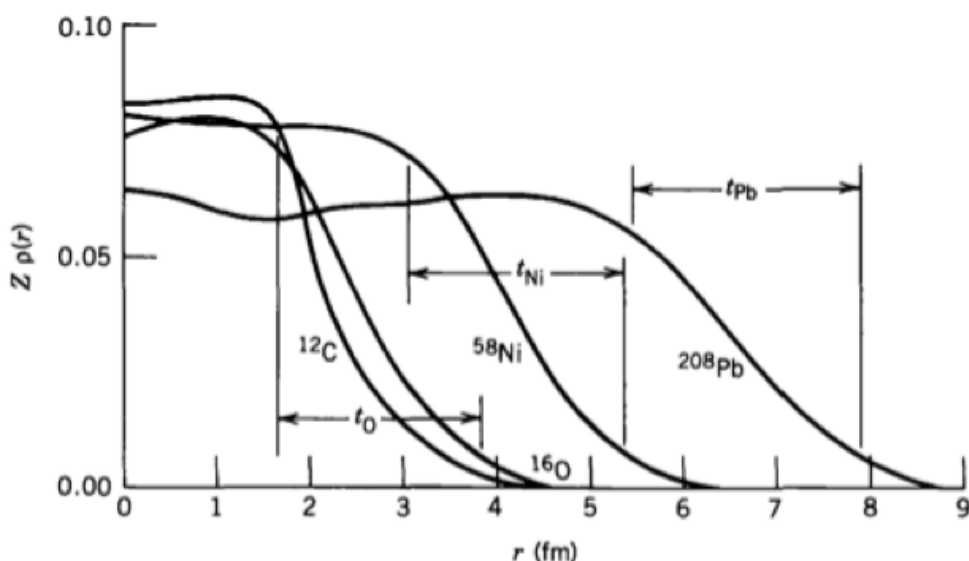


Figura 2.3 distribuzione radiale della carica per diversi elementi

3. Metodo Puzzle Da questo modello è possibile ricavare un primo legame tra il valore del raggio atomico e il numero di massa A : $R \propto A^{\frac{1}{3}}$. Assumendo che la regione atomica abbia una densità costante, ed essendo il volume proporzionale al peso atomico A e al cubo del raggio, si ottiene la tesi.
4. Lezione dialogata, finalizzata all'introduzione dell'argomento, in forma di problema: perché gli elettroni non sono nel nucleo? Perché è necessario ipotizzare una particella come il neutrone nel nucleo? Perché al crescere del numero atomico Z (numero di protoni) il numero di neutroni N deve superare anche di molto Z ?
5. Lezione frontale. Richiami all'esperimento di Rutherford. Discussione sulle dimensioni e la densità del nucleo, illustrazione dei grafici dell'andamento del raggio nucleare in funzione del numero di massa.

II lezione

Argomenti

1. L'energia di legame E_B
2. Massa-energia
3. La formula semiempirica delle masse di Weizsäcker

Modalità di svolgimento

- (a) Lezione dialogata introdotta in forma di problema: perché il nucleo di deuterio ha una massa inferiore alla somma delle masse dei suoi costituenti? L'energia di legame viene così spiegata come una forma di energia necessaria a istituire un legame tra nucleoni, viene usata l'analogia dell'energia potenziale elastica e l'idea di un gancio che lega tra loro i nucleoni

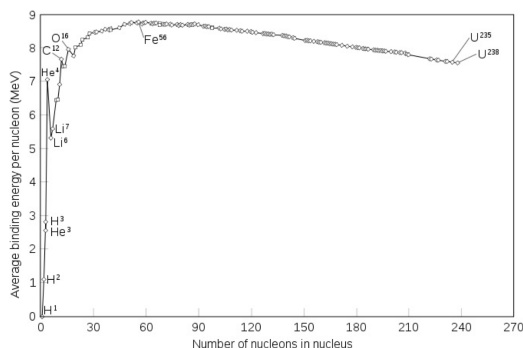


Figura 2.4 energia di legame media per nucleone

- (b) Questionario [App. 3]. Con questa modalità si risponde anche al problema dell'impossibilità per gli elettroni di occupare la regione nucleare, attraverso l'introduzione del principio di indeterminazione
- (c) Lezione dialogata. Si rimanda alla sezione Sperimentazione per le evidenze didattiche

III lezione

Argomenti

- (a) L'energia di legame per nucleone E_B/A
- (b) Il potenziale gravitazionale
- (c) Il potenziale nucleare

Modalità di svolgimento

- (a) Lezione dialogata. Si richiede una rappresentazione dell'energia di legame per nucleone E_B/A in funzione del numero di massa A. Sfruttando la formula semiempirica delle masse gli studenti possono dapprima ipotizzare un andamento costante che per i nuclei leggeri. Il docente può poi discutere l'andamento nelle zone del grafico (nuclei leggeri, A basso; nuclei pesanti, A elevato), con riferimento ai valori dell'energia di legame e al caso dell'elio 4 (Fig. 2.4)
- (b) Lezione frontale. È utile richiamare il potenziale gravitazionale, scritto per il centro di massa di un sistema a due corpi, tenendo conto della conservazione del momento angolare del sistema (Fig. 2.5).

Tale elemento può essere utile per una discussione degli stati permessi e proibiti per il moto, in funzione dell'energia meccanica e del potenziale stesso del sistema. Si possono infatti illustrare i casi classicamente permessi ($E > V$) e proibiti ($E < V$), spiegando che $E = K + V$, che $K > 0$ implica $E > V$. Si può far notare che per $E < 0$ il moto è consentito tra le posizioni di perielio e di afelio e che per $E > 0$ si hanno orbite aperte, come nel caso di alcune comete. La discussione permette di istituire un'utile analogia con la buca di potenziale nucleare, spesso utilizzata nell'esposizione dei rudimenti di fisica nucleare.

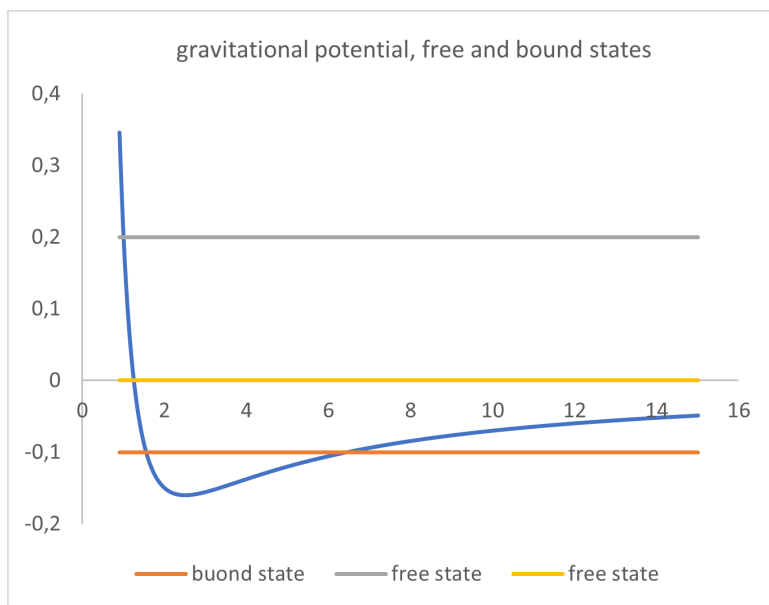


Figura 2.5 potenziale gravitazionale

- (c) Questionario [App. 5]. Si richiede la costruzione del potenziale nucleare come combinazione dei due contributi (repulsione coulombiana e attrazione tra nucleoni). Per l'ultimo quesito si richiedono quali sono gli stati permessi e proibiti in funzione dell'energia meccanica e del potenziale.

IV lezione

Argomenti

- (a) La stabilità
- (b) La tavola di Segré dei nuclidi
- (c) I decadimenti: le tre tipologie di decadimento, le serie naturali.
- (d) La legge del decadimento

Modalità di svolgimento

- (a) Lezione dialogata. Si può richiedere di formulare un modello semiempirico che dimostri che gli elementi della tavola periodica che presentano almeno un isotopo stabile hanno numero atomico $Z \leq 83$ (Bismuto). Il docente guida la discussione in modo che gli studenti possano modellare il nucleo come una sfera contenente $(N+Z)$ nucleoni, soggetti alla forza repulsiva dei protoni e a quella attrattiva dovuta alla forza nucleare. Gli studenti possono quindi immaginare il nucleo come un insieme di coppie n-p legate che la forza coulombiana tende a rompere. Gli isotopi di un elemento saranno tutti instabili quando l'energia potenziale coulombiana EC non supera quella di

legame nucleare EN. Ipotizzando che per nuclei massicci vale la relazione $Z(Z-1)/Z^2$ e che l'energia di legame nucleare sia dovuta a N coppie neutrone protone trattate come un deutone legato con energia di legame pari a -2,24 MeV, si può impostare la disuguaglianza che determina la stabilità: $E_C < E_N$. Sostituendo i valori $E_C = \frac{Z(Z-1)}{4\pi\epsilon_0 R} \approx \frac{Z^2}{4\pi\epsilon_0 R}$ e $E_N = 2,24 \text{ MeV} \cdot N$, si ottiene il risultato $Z < 82,42$, in buon accordo coi valori della tavola di Segrè.

- (b) L'impostazione di questo calcolo è basata su un approccio semiempirico, ma giustificato anche dallo studio dell'hamiltoniana del nucleo. Si può infatti dimostrare che l'interazione tra i nucleoni e il campo nucleare è approssimata al primo ordine dal termine di deutone [87]
- (c) Lezione. Gli studenti conoscono la tavola periodica ma non la tavola isotopica ed è necessario, anche per la discussione delle tematiche del corso mostrarne le caratteristiche
- (d) Lezione frontale. Può essere interessante far emergere dalla discussione la necessità di ipotizzare l'effetto tunnel (decadimento alfa) e l'esistenza del neutrino (decadimento beta). Per una discussione degli esiti di questa discussione si rimanda al paragrafo Sperimentazione
- (e) Lezione dialogata. Si rimanda al paragrafo Sperimentazione

V lezione

Argomenti

- (a) Fissione nucleare: le reazioni nucleari. La fissione nucleare. Le condizioni per la fissione spontanea. La fissione indotta. Esempi. Le ragioni della fissionabilità dell'uranio 235. Elementi fissili, fissionabili e fissibili.
- (b) Fusione nucleare: fondamenti, reazioni, stato dell'arte della ricerca. Aspetti favorevoli e criticità.

Modalità di svolgimento

- (a) Lezione frontale con domande in itinere, basata sullo storico articolo di Bohr e Wheeler [139].
- (b) Lezione frontale.

Al termine delle lezioni sono state svolte due prove di valutazione, una orale per un gruppo ridotto di studenti in allegato[App. 6] in cui vengono riportate le risposte degli studenti e i commenti relativi, l'altra scritta per tutta la classe [App. 7].

Alcuni momenti del corso sono sembrati particolarmente significativi e vengono di seguito illustrati.

I lezione: le premesse filosofiche dell'atomismo e la fisica del nucleo

Gli esiti del questionario relativo ai fondamenti concettuali dell'atomismo antico, hanno fatto emergere lacune diffuse soprattutto in riferimento a conoscenze specifiche della filosofia eleatica (numero medio delle risposte esatte: 3,8/12). Questo risultato non stupisce ed è un'ulteriore prova della mancata realizzazione di percorsi

multidisciplinari in campo umanistico e scientifico dovuto a un ancestrale pregiudizio culturale per cui in Italia si distingue, privilegiandola, la cultura umanistica a svantaggio di quella scientifica [13, 149].

II lezione: il nucleo, descrizione e energia di legame

Nella seconda lezione si è iniziato a trattare il problema dell'energia di legame. Agli studenti è stata sottoposta la domanda "perché la massa del nucleo deuterio è minore di quella del deutone? (avendo spiegato ai ragazzi che il deutone è il sistema composto da un protone e un neutrone)". Le due risposte ricevute sono risultate significative perché hanno stimolato la discussione con i ragazzi. La prima (errata) "*per via dell'elettrone*" ha consentito di specificare la differenza fra nucleo e atomo, in particolare di precisare che il fenomeno è di sola natura nucleare e che non prevede a quelle dimensioni l'esistenza dell'elettrone.

La seconda risposta (corretta) "perché il deuterio è un sistema legato" permette di introdurre una ampia riflessione sulla natura dei sistemi legati.

In merito a questo problema sono inoltre emerse interessanti misconcezioni. Sulla base di una di queste il legame tra due corpi è riferito solamente all'impossibilità del loro moto relativo. Di questo si dibatte. La discussione complessiva ha dato modo di definire esattamente l'energia di legame ponendo espressamente la domanda *Qual è la differenza tra sistema legato e sistema libero?*

Dopo un breve confronto in cui intervengono diversi studenti si formalizza quindi il concetto che il legame comporta una riduzione di energia del sistema a favore del legame stesso (si utilizza l'analogia del legame elastico e dell'energia potenziale elastica che gli studenti conoscono). La discussione viene guidata dal docente che suggerisce di immaginare che l'energia di legame sia associata a vincoli fisici che tengono legati tra loro i nucleoni, vincoli che possiamo immaginare come molle molto rigide o corde tese o ganci.

Successive domande portano a correlare il difetto di massa tra deutone e deuterio con l'energia di legame attraverso la relazione relativistica.

La massa di un nucleo $M(Z, N, A)$ è quindi la somma dei suoi costituenti $Zm_p + Nm_n$ ridotta dell'energia di legame E_B . definita infatti come difetto di massa.

Vale cioè $M(Z, N, A) = Zm_p + Nm_n - E_B$

Un secondo quesito affrontato nella seconda lezione è sulla dimensione del nucleo emersa dall'attività con metodo puzzle. La classe lavora per gruppi sfruttando il modello di Thomson e arriva alla relazione $R \propto A^{\frac{1}{3}}$. Questo risultato si rivela utile per definire con gli studenti un'espressione per l'energia di legame E_B , che, solo alla fine, verrà confrontata con la formula semi-empirica delle masse di Weizsäcker per loro sconosciuta:

$$E_B = a_V A - a_S A^{\frac{2}{3}} - a_C \frac{Z(Z-1)}{A^{\frac{1}{3}}} - a_A \frac{(A-2Z)^2}{A} \pm \delta$$

dove $a_V A$ è detto termine di volume, $a_S A^{\frac{2}{3}}$ termine di superficie, $a_C \frac{Z(Z-1)}{A^{\frac{1}{3}}}$

termine coulombiano, $a_A \frac{(A-2Z)^2}{A}$ termine di simmetria e $\pm \delta$ è termine di pairing con a_V , a_S , a_C e a_A costanti ottenute per interpolazione con i dati relativi a masse nucleari note.

Attraverso una discussione ragionata con gli studenti, come suggerito in letteratura [14], si procede a modellizzare l'energia di legame identificando i vari contributi che vengono poi formalizzati in un elenco di termini. Per ogni termine sono riportati i passi salienti delle discussioni con gli studenti.

- **Termine di volume** $E_{\text{vol}} \propto A$

Studente: l'energia di legame dipende dal numero di vincoli che ci sono, maggiore è questo numero, maggiore è l'energia di legame e quindi è un termine proporzionale al volume del nucleo,

si deduce quindi che poiché $R \propto A^{1/3}$ e quindi $V \propto R^3 \propto A$

$$E_{\text{vol}} \propto A$$

- **Termine di superficie** $E_{\text{sup}} \propto A^{2/3}$

Prof.: è vero che tutti i nucleoni sono legati allo stesso modo? *Studente:* i nucleoni più esterni, quelli sulla superficie esterna del nucleo, sono meno legati perché prossimi a un minor numero di nucleoni rispetto a quelli più interni.

Si deduce quindi che l'energia di legame va ridotta di un termine proporzionale alla superficie del nucleo. La superficie S del nucleo, immaginato come una sfera, è proporzionale a $S \propto R^2 \propto A^{2/3}$.

$$E_{\text{sup}} \propto A^{2/3}$$

- **Termine coulombiano** $E_{\text{coul}} \propto \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$

Uno studente propone spontaneamente, senza essere stimolato, che l'energia di legame debba essere ridotta per effetto della repulsione coulombiana e quindi propone di sottrarre un termine

$$E_{\text{coul}} \propto \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$$

- **Termine asimmetrico dovuto all'eccesso di neutroni** $E_{\text{asim}} \propto \frac{(A-2Z)^2}{A}$

Uno studente propone di sottrarre un termine che tenga conto del fatto che la forza di legame tra nucleoni è a corto range. Il docente fornisce l'espressione del termine:

$$E_{\text{asim}} \propto \frac{(A-2Z)^2}{A}$$

Questo termine avrebbe meritato riflessione riferita ai livelli fermionici occupati dai nucleoni, rimandata a una fase successiva del corso.

- **Termine di pairing** $\pm\delta$ o di accoppiamento.

Questo termine numerico, positivo per i nuclei pari-pari, negativo per i nuclei dispari-dispari e nullo negli altri casi viene illustrato dal docente. È così completata la formula semi-empirica delle masse.

Vengono infine forniti dal docente i valori numerici delle costanti presenti nella formula.

III lezione: stabilità e energia di legame

Sull'argomento della stabilità dei nuclei riportiamo un interessante dialogo con gli studenti

Prof. *Perché i nuclei sono instabili?*

Studente 1: *al crescere del numero dei protoni la repulsione coulombiana domina sull'attrazione nucleare.*

Studente 2: *al crescere di Z l'energia di legame si riduce e a un nucleo può risultare conveniente trasformarsi in un nucleo vicino con un minor numero di protoni.*

Prof.: *perché questo comportamento accade anche per nuclei con eccesso di neutroni?*

La domanda resta senza risposta e si decide di rinviare la trattazione in seguito. Non verrà più ripresa se non nell'ultimo incontro, quando si parlerà dei nuclei pari-pari e dispari-dispari nel processo di fissione e della rilevanza della natura fermionica dei nucleoni.

Dall'analisi dell'andamento dell'energia di legame vengono individuate dagli studenti le regioni dei nuclei interessate dalla fissione o dalla fusione

IV lezione: i decadimenti

Nella quarta lezione è stato affrontato il problema del decadimento e della legge del decadimento. È interessante riportare il confronto avvenuto sull'analisi del decadimento alfa.

Prof. *Perché un nucleo decade alfa?*

Dopo un'ampia discussione uno studente fornisce la risposta corretta.

Studente: *tra tutti i possibili prodotti l'energia di legame per nucleone è massima per il nucleo di elio 4, che rappresenta quindi la miglior configurazione energetica per i prodotti nel caso di decadimento.*

Si discute poi se nel decadimento alfa l'energia cinetica viene attribuita al frammento più leggero o più pesante e se la ripartizione energetica tra prodotti avviene sempre nella stessa misura.

Si tratta l'effetto tunnel con esempi e spiegazione qualitativa finale.

Vengono poi illustrati i decadimenti beta e si discute la perdita di energia rivelata negli spettri di decadimento. Dopo una discussione in cui sembra prevalere l'idea che si trasformi in energia di legame, uno studente propone che si trasformi l'energia cinetica sia ripartita tra i prodotti di decadimento. Dato che lo spettro evidenzia che gli elettroni (o positroni) emessi nei decadimenti beta hanno energie variabili, lo studente guidato dal docente ipotizza che ci sia un'ulteriore particella che acquisisce parte dell'energia rilasciata nel decadimento. Il docente quindi illustra brevemente l'ipotesi del neutrino e completa la formalizzazione del decadimento beta.

In seguito, per introdurre il problema di come decadono i nuclei nel tempo, il docente ha suggerito agli studenti la seguente situazione, a cui sono seguiti gli interventi dei ragazzi.

Prof.: *supponiamo di avere 10000 nuclei all'istante $t_0=0$ che dopo un intervallo di tempo t si riducono a 5000. Dopo un tempo pari a $2t$ quanti nuclei restano?*

Due studenti propongono: zero, perché a ogni intervallo di tempo se ne perdono 5000.

Un altro studente afferma: ne troviamo 2500 perché a ogni intervallo di tempo il numero di nuclei si dimezza.

Ragionando sul fenomeno dell'effetto tunnel come processo stocastico si intuisce che la prima ipotesi renderebbe il fenomeno del decadimento più probabile per nuclei presenti in un numero ridotto (Nel primo intervallo la probabilità di decadere è $5000/10000 = 0,5$, nel secondo intervallo $5000/5000 = 1$). Se vogliamo che il fenomeno del superamento della barriera sia equiprobabile ad ogni istante la seconda ipotesi è quella che mantiene costante la probabilità di decadere.

Si ragiona poi sui rapporti incrementali (in forma discreta, poi in forma differenziale) e si scrive l'equazione differenziale del decadimento:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N(t)$$

(nel corso della lezione uno studente propone l'analogia con la legge di scarica del condensatore).

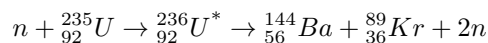
Infine si risolve l'equazione ottenendo la legge del decadimento radioattivo a cui fanno seguito vari esempi.

V lezione: fissione e fusione (lezione frontale)

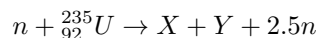
È degno di essere riportato un episodio accaduto nella quinta lezione.

Come pianificato nella progettazione del corso, il problema della fissione nucleare viene affrontato seguendo la classica esposizione della teoria di Bohr e Wheeler [139]. Al termine della spiegazione, vista l'inadeguatezza dei testi in adozione, vengono anche comunicati siti on-line che discutono il problema con sintesi didattiche efficaci e che possono costituire un valido supporto per lo studio. Gli aspetti più interessanti della lezione sono due. Il primo consiste nel determinare le condizioni fisiche per la fissione spontanea, impostando lo stesso calcolo algebrico fornito da Bohr e Wheeler e che porta al risultato $17.2A < Z^2 < 49A$. Questa condizione, necessaria per la fissione spontanea, esclude la quasi totalità dei nuclei della tavola periodica, anche pesanti.

Come secondo risultato si ha che per gli altri nuclei il processo di fissione deve essere provocato da un agente esterno, che permetta la formazione di un nuovo nucleo in uno stato eccitato detto nucleo composto e faciliti la scissione del nucleo in due frammenti. Il riferimento alla scoperta di Fermi [62] e all'interpretazione di Hahn, Meitner e Strassmann è un'utile contestualizzazione che consente di fissare le idee [89]. Viene ad esempio citata la reazione:



e generalizzata al caso



Si discute il fatto che tra i prodotti devono risultare alcuni neutroni liberi, dato che i figli della fissione, avendo un numero atomico minore, devono disporre di un numero di neutroni per unità di massa inferiore rispetto a quello dell'uranio.

Nel descrivere la reazione di fissione dell'uranio 235 indotta da neutroni termici (energia dell'ordine dei keV), il docente fa notare che l'energia del neutrone termico non è sufficiente a superare la barriera di fissione (Fig.2.6).

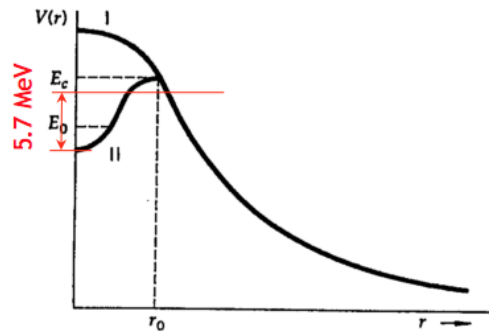


Figura 2.6 rappresentazione della barriera di fissione per due nuclei (I, fissione spontanea; II fissione indotta)

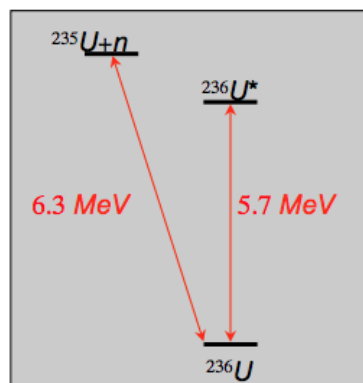


Figura 2.7 rappresentazione dell'energia di attivazione dell'uranio 236 e del sistema uranio 235 + neutrone

L'energia di attivazione della fissione dell'uranio 235 è infatti di 6,3 MeV (Fig. 2.7).

Uno studente interviene a questo riguardo sottolineando che per giustificare la fissione dell'uranio 235 non è necessario considerare l'energia del neutrone. Infatti il nucleo composto di uranio 236 che si viene a formare è un nucleo pari-pari, più legato del nucleo padre ed è quindi disponibile nel nucleo un'energia che permette di portare il nucleo composto ${}_{92}^{236}\text{U}$ ha un'energia che differisce di soli 0,6 MeV da quella di attivazione. Trovandosi immediatamente al di sotto della barriera, il nucleo composto può quindi scindersi in due frammenti per effetto tunnel. Questo non accade invece nel caso dell'uranio 238 che è già pari-pari.

Questo risultato mostra che gli studenti possono arrivare a comprendere fenomeni complessi e risolvere problemi, istituendo nessi tra contenuti differenti acquisiti nello studio della disciplina.

2.3.3 Esiti

La validazione del percorso didattico è stata svolta seguendo due approcci.

Attraverso una prova orale di alcuni studenti e una prova scritta sostenuta dall'intera classe è stata valutata l'acquisizione dei contenuti di base affrontati e delle competenze per la risoluzione di problemi complessi, sia con l'applicazione di abilità individuali sia di gruppo.

Attraverso un questionario di gradimento rivolto alla classe è stata invece valutata la risposta degli studenti a questioni inerenti l'insegnamento della fisica nucleare con la metodologia didattica proposta.

Questi strumenti non rispondono se non parzialmente alla questione della validazione del percorso didattico. Risulta evidente che l'esperienza è stata condotta anche se in più riprese su un campione circoscritto di studenti, appartenenti a un istituto che fornisce una preparazione medio/alta ai propri iscritti senza particolare problemi di contesto, soprattutto se si osservano i dati relativi alla proiezione universitaria ⁴. Ci si potrebbe perciò attendere che la riedizione dell'esperienza su un campione più ampio, in altri territori, magari connotati da difficoltà riconducibili o non riconducibili a quelle scolastiche (sociali, economiche, ...), dia esiti diversi o addirittura contraddittori con quelli appena esposti. I dati riportati vanno perciò letti come una valutazione del percorso fatto, anche se esiti così positivi in termini di efficacia possono far sperare che la replica dell'esperienza possa dare esiti analoghi in platee più ampie, più complesse e per un tempo di analisi più ampio di quello a disposizione di questo progetto.

La prova orale [App. 6]

Con il supporto dell'insegnante, all'interno della classe sono stati selezionati 4 studenti per la prova orale, avvisati una settimana precedente la prova che sarebbero stati oggetto di valutazione. Tutti gli studenti hanno sostenuto la prova orale suddivisa in tre parti. Nella prima parte, diversa per ogni studente, sono state valutate le conoscenze e le abilità di base. Nella seconda parte gli studenti hanno costituito un unico gruppo e hanno risposto a una consegna per la valutazione del possesso

⁴Il 64% degli studenti diplomati nell'indirizzo scolastico dell'istituto nell'a.s. 2023/2024 si iscrivono a corsi STEM, dato che si colloca al centro della forchetta 53%-76% delle scuole del territorio. L'istituto risulta peraltro il migliore, nello stesso territorio, per capacità degli immatricolati di permanere in università dopo il I anno di corso. I dati sono reperibili in: eduscopio.it

di abilità non meccaniche. In questo caso gli studenti hanno potuto riflettere, formulare ipotesi, condividerle nel gruppo, confutarsi a vicenda con lo scopo di arrivare a un'unica risposta al quesito proposto. Si sono infine confrontati all'interno del gruppo anche per l'ultimo problema, finalizzato alla valutazione del possesso di competenze disciplinari e trasversali, facendo uso dell'ulteriore possibilità di sfruttare appunti, libri di testo, smartphone.

La prima domanda, svolta individualmente dai candidati, è relativa a processi di decadimento. Due studenti rispondono correttamente, il terzo si corregge dopo aver formulato ipotesi errate condizionate dalle risposte precedenti, il quarto risponde in modo errato. Nelle due domande di gruppo senza ausili è stato interessante notare come gli studenti siano riusciti a individuare il decadimento corretto (doppio beta), pur non affrontato a lezione, ma che non siano riusciti a portare a termine un semplice calcolo di emivita in quanto sprovvisti delle relative abilità matematiche. Infine, alla domanda con ausili sulla formazione del carbonio 12 viene trovata una risposta esauriente e presentata ai compagni.

Le valutazioni riportate dagli studenti sono risultate: 8/10, 8/10, 8/10, 7/10. I dettagli dello svolgimento della prova orale sono riportato in allegato [App. 6]

La prova scritta [App. 7]

La prova scritta è stata proposta a tutta la classe e ha coinvolto 14 studenti su 17 per 50 minuti. I tre studenti assenti erano impegnati in altra attività. La prova seguiva la tripartizione analoga a quella della prova orale:

- (a) Consegna individuale
- (b) Consegna per il gruppo
- (c) Consegna per il gruppo con sfruttamento di ausili (appunti, libro di testo, smartphone)

Nella prima parte della prova gli studenti hanno risposto individualmente alle consegne, dopodiché di sono riuniti formando il gruppo di lavoro a cui erano già stati destinati lungo il periodo dello svolgimento del corso. Gli esiti sono riportati nella Fig. 2.8

Per la valutazione della parte della prova sostenuta dall'intero gruppo si sono ottenuti questi valori medi:

- gruppo I (studenti: 1, 9 e 15): 5,83
- gruppo II (studenti 4, 5, 7, e11): 6,25
- gruppo III (studenti 2, 6, 10 e 13): 7,88
- gruppo IV (14, 16 e 17): 6,16

Risulta evidente che sulle valutazioni complessive dei gruppi (5,83/10, 6.25/10, 7.88/10, 6.16/10; media: 6,53/10) incidono gli esiti scarsi di alcuni componenti dei gruppi stessi. Nonostante questo, il commento dell'insegnante è stato molto positivo e ha evidenziato come ci sia stata una crescita complessiva del profitto di almeno un punto [50] rispetto alla situazione media della classe di partenza. Infatti, come

		Sezione individuale				Sezione di gruppo			
Max score	Es. 1			Es. 2	Es. 3	Ex 4	Ess. 5 e 6 Con ausili	Punteggio totale	voto/10
	a	b	c						
	2	2	2	4	4	8	8	30	10
Studente									
1	2	0	2	3	1	5	6	19	6
2	2	0	2	2	1	6	8	21	7
4	2	0	2	4	3,75	6	6	23,75	8
5	2	1	1,5	0	2	6	6	18,5	6
6	2	1	2	2	3,5	6	8	24,5	8
7	0	0	0	0	0	6	6	12	4
9	2	0	2	1	0	5	6	16	5,5
10	2	2	0	4	4	6	8	26	8,5
11	2	0	2	2	3,75	6	6	21,75	7
13	2	0	0	4	4	6	8	24	8
14	2	0	2	4	4	7	4	23	7,5
15	2	0	1	3	1	5	6	18	6
16	2	2	2	1	4	7	4	22	7
17	2	0	0	0	0	7	4	13	4

Figura 2.8 Punteggi ottenuti e valutazioni finali della prova scritta. Nell'ultima colonna a destra sono riportati i voti in decimi per ogni studente.

si deduce dalle valutazioni del primo periodo scolastico (I quadrimestre) condivise con l'insegnante, la classe non ha un profitto mediamente sufficiente (6/10) e il giudizio della docente è negativo sia per la scarsa partecipazione alle lezioni, sia per l'impegno profuso nello studio. Questo giudizio è condiviso dal consiglio di classe che giudica la classe apatica e spesso resistente all'offerta formativa del corpo docente.

Questionario di gradimento

Al termine del percorso è stato somministrato un questionario di gradimento, con 11 livelli da 0 a 10, sufficienza fissata (e comunicata agli studenti) a 6 (quando non diversamente indicato). Riportiamo il questionario suddiviso per aree tematiche, con commenti dove necessari (Tab. 2.5).

Dal questionario di gradimento emergono dati generalmente positivi e in qualche caso vengono espresse valutazioni elevate, soprattutto in merito alle figure dei docenti e all'efficacia del metodo. Analizzando le risposte date ai singoli item si possono trarre le seguenti osservazioni:

- Gli studenti hanno frequentato il triennio nella stessa classe in una continuità educativa favorita anche dalla figura del docente di fisica che nel corso degli anni non è cambiato.
- Il profitto medio della classe è di poco al di sotto della sufficienza, dovuto al fatto che alcuni elementi mostrano gravi difficoltà nel conseguire risultati positivi nella disciplina.
- Le risposte alle domande 4, 5 e 6 mostrano un generale apprezzamento dell'attività peer to peer.
- Nel blocco di domande relativo alla figura del docente, che viene mediamente molto apprezzato, le risposte alle domande 10 e 12 evidenziano un gradimento appena sufficiente rispetto alla scelta del docente di lasciare autonomia nel lavoro dei gruppi e di commentare saltuariamente le loro proposte. Un'analisi del campione fa emergere che questo risultato è enfatizzato per gli studenti più capaci, che si sentono in qualche modo poco valorizzati o meno di quanto non avvenga abitualmente nell'attività didattica ordinaria.
- Alcune valutazioni assegnate al blocco successivo, dalla domanda 13 alla 17, sono caratterizzate da valori attorno a 6/10 (domande 13 e 14) e/o un'elevata deviazione standard (domanda 13), che l'utilizzo degli ausili mediamente apprezzato è comunque stato sfruttato in maniera variegata dalla classe.
- Nei blocchi successivi si evidenzia un generale apprezzamento del corso, in particolare in merito alla possibilità di discutere degli argomenti trattati con i compagni e con l'insegnante, con modalità che per gli studenti favoriscono la curiosità per la disciplina e il miglioramento dell'apprendimento.
- Va notato come l'active learning in presenza, fortemente apprezzate, sono viste come difficilmente declinabili con modalità di didattica a distanza.

Al termine dell'anno scolastico la classe ha affrontato l'Esame di Stato. Tutti gli studenti sono stati ammessi all'esame e tutti l'hanno superato. Può essere interessante

Tema	#	domanda	valutazione media	deviazione standard
Informazioni generali	1	Quante lezioni del corso hai seguito?	96%	0,4
	2	Hai frequentato il triennio del liceo nella stessa classe?	100%	-
	3	Il tuo voto in Fisica nella pagella del primo quadrimestre è stato:	5,82	1,08
Comunicazione di gruppo	4	Quanto ho comunicato con gli altri studenti del mio gruppo?	7,45	1,29
	5	Quanto gli altri studenti del gruppo hanno collaborato con me?	7,45	1,44
	6	Quanto nel mio gruppo si sono condivise e rielaborate idee?	7,64	1,91
La figura del docente	7	Quanto il docente ha incoraggiato la partecipazione degli studenti?	8,18	1,66
	8	Quanto il docente risponde subito alle domande degli studenti?	8,09	1,87
	9	La risposta del docente aiuta a capire questioni prima non chiare?	7,64	1,75
	10	Quanto il docente ha commentato i lavori dei gruppi?	6,09	1,81
	11	Quanto spesso il docente ha proposto domande rapide attraverso questionari?	6,55	1,81
Il ruolo degli ausili	12	Quanto il docente ha partecipato alle discussioni dei gruppi?	6,09	2,17
	13	Quanto Internet è stato usato come fonte di informazioni?	5,36	3,67
	14	Quanto l'uso dei materiali è stato stimolante?	6,55	1,57
Efficacia del metodo	15	Sono stato in grado di comprendere autonomamente i materiali?	7,18	1,33
	16	Quanto i materiali utilizzati migliorano l'apprendimento?	7,64	1,36
	17	Quanto la discussione all'interno del mio gruppo è utile all'apprendimento?	7,64	1,50
Efficacia del corso	18	La discussione col docente successiva al lavoro di gruppo è utile all'apprendimento	8,45	1,21
	19	Gli argomenti trattati nei questionari erano interessanti?	7,27	1,62
	20	Queste lezioni di fisica nucleare hanno reso più interessante la materia?	7,82	1,94
	21	Quanto gli argomenti trattati erano semplici da capire?	5,18	2,04
	22	Le lezioni potevano essere svolte online con la stessa efficacia?	3,27	1,17
I contenuti	23	Con quale efficacia le lezioni potrebbero essere svolte in modo tradizionale (lezione frontale)?	7,27	2,76
	24	La fisica nucleare affrontata per problemi ha migliorato la mia capacità di padroneggiare i concetti?	7,45	1,69
	25	A seguito di questa esperienza posso dire che mi sarebbe piaciuto affrontare lo studio della fisica con questa modalità	7,82	1,94

Tabella 2.5 esiti del questionario di gradimento. Le valutazioni medie non espresse come percentuale vanno riferite a un valore massimo di 10.

analizzare le scelte post-diploma. Il 47% della classe si è immatricolato in corsi di laurea STEM, con una percentuale al di sotto della media di istituto (64%) e al di sotto del limite inferiore della forchetta 54%-76% in cui si collocano i dieci migliori istituti del territorio all'interno di un raggio di 20 km⁵. Indagando ulteriormente

⁵Dati reperibili in: eduscopio.it

le scelte fatte, si osserva che il 29% degli studenti ha optato per corsi STEM scientifici (fisica, informatica, chimica, ...) e non tecnici (tipicamente i corsi di laurea in ingegneria), percentuale al di sopra di quella di istituto (26%) per questo tipo di scelta. Ciò permette di affermare che in un istituto in cui l'offerta formativa è molto proiettata verso il successo universitario⁶ una classe che in ambito scientifico ha avuto un percorso di apprendimento debole lungo il triennio, confermato dallo scarso orientamento verso le STEM tecniche, ha tuttavia maturato una preferenza per i corsi STEM di classe scientifica più elevata della media di istituto. Non è certo possibile trarre da questi dati considerazioni in merito all'efficacia del corso di FN. Tuttavia è possibile ipotizzare che all'interno di una didattica uniforme che non ha favorito incrementi di profitto nel corso del triennio, l'unica novità didattica affrontata dalla classe attraverso il corso di FN può avere in qualche caso favorito una riflessione positiva relativamente alla scelta post-diploma verso lauree di tipo scientifico in senso stretto.

Si possono infine individuare alcune conclusioni al termine di questa esperienza di progettazione e realizzazione di un corso di FN per studenti del liceo scientifico. La progettazione ha tenuto conto di un approccio che valorizza la partecipazione attiva degli studenti, suddivisi in gruppi di studio. Gli strumenti di lavoro previsti in classe sono stati diversi e hanno comportato sempre la discussione di problemi più o meno semplici: lezione dialogata, questionario per l'introduzione di nuovi contenuti o per la verifica dell'acquisizione di competenze, metodo del Puzzle, ricerca con ausili esterni (smartphone o tablet) per la risoluzione di problematiche complesse. Nella fase di sperimentazione in classe tutte le fasi progettate e tutti gli argomenti sono stati sviluppati. Le modalità di lavoro sono state molto efficaci e hanno coinvolto tutti i ragazzi, anche i più riservati e quelli che hanno mostrato nel corso dell'anno meno familiarità con i temi affrontati nella disciplina. Si è potuto infatti seguire il percorso di FN non attraverso la presentazione di un quadro completo e formalizzato, come può risultare dal libro di testo. Viceversa, ogni singola parte è stata introdotta con la richiesta di un'indagine da svolgere su problemi semplici o complessi che gli studenti, attraverso un confronto reciproco, hanno dovuto risolvere per poi arrivare alla formalizzazione teorica guidata dall'insegnante. Le misurazioni effettuate attraverso le prove hanno fornito esiti buoni e al di sopra della media di ingresso della classe, reperibile sul Documento di classe, stilato dai docenti al termine del corso di studi [56]. Gli esiti del questionario di gradimento evidenziano che le principali caratteristiche del percorso proposto, cioè la novità didattica e l'inclusività, sono state colte dagli studenti e che le hanno apprezzate come pratica didattica.

⁶In un territorio di raggio 20 km l'istituto ha la più alta percentuale di studenti iscritti in corsi di laurea e che superano il primo anno (86% in una forchetta che va dal 68% all'86%) e uno tra i minori tassi di abbandono, 5% in una forchetta che va dal 3% al 15%

Parte II

Formazione

Proposta di un corso di FN per docenti

3.1 Le premesse per una progettazione

3.1.1 Dall'apprendimento con gli studenti alla formazione dei docenti

I risultati ottenuti dall'esperienza didattica con gli studenti (v. cap. 2) hanno costituito la matrice per un corso di formazione per docenti della scuola secondaria di secondo grado avente per oggetto la FN, innovativo per temi e metodologie didattiche. Le lezioni svolte con gli studenti hanno permesso non solo di trasferire loro contenuti e far loro acquisire competenze in FN, ma anche di perfezionare le lezioni stesse e le diverse attività per migliorare l'apprendimento dei partecipanti. Le diverse platee a cui le lezioni sono state rivolte sono perciò state uno strumento di monitoraggio continuo di processo, che ha consentito la validazione di ogni fase del corso, sfruttando i luoghi di apprendimento come spazi in cui lo studente era il soggetto di un personale orientamento verso gli argomenti della lezione e non un oggetto direzionato dal docente [181]. Rispetto all'usuale processo didattico docente - studente, si è preferito infatti seguire una modalità di interazione docente - studente in cui, pur salvaguardando il ruolo guida dell'insegnante, le classi con il loro contributo attivo hanno potuto concorrere alla rivisitazione di parti delle lezioni stesse [133]. Il risultato finale è quello di un corso di lezioni in FN per studenti dei licei, che ha assunto una forma sempre perfettibile, ma comunque caratterizzata da una buona stabilità e replicabilità in contesti di apprendimento rivolti anche a un pubblico non necessariamente di studenti del liceo scientifico.

3.1.2 Le relazioni tra le figure professionali nel contesto scolastico

Nel momento in cui ci si appresta a progettare un corso di formazione per docenti, il contesto e i vincoli da considerare sono diversi. Se in una fase avanzata dei lavori è possibile concentrarsi sul merito dell'iniziativa (contenuti, metodi, tempistica, aspetti organizzativi), inizialmente conviene analizzare il pubblico a cui l'intervento è rivolto, studiarne le caratteristiche (età, laurea, anzianità di servizio, esperienza didattica maturata) e dettagliare le relazioni interne (ruoli assunti nell'istituzione scolastica, collaboratore della dirigenza, funzione strumentale, responsabile di progetto, coordinatore di materia, coordinatore di classe), al fine di definire un progetto calzante e al tempo stesso potenzialmente efficace. Per la fattispecie di

questo corso, l'aspetto più evidente consiste nel profilo professionale dei destinatari, ossia i docenti della scuola secondaria di secondo grado e in particolare gli insegnanti di matematica e fisica dei licei, principalmente scientifici tradizionali o delle scienze applicate. Sul fronte della vita scolastica quotidiana, si può affermare senza timore di smentita che questi si confrontano spesso con un sincero interesse per la FN di buona parte degli studenti del secondo biennio e dell'ultimo anno di corso, nonostante la cornice normativa non offra elementi di contesto che favoriscano tale interlocuzione tra docenti e studenti (v. par. 1.2.3). Tuttavia, come già osservato, l'assenza di un quadro analitico in cui collocare contenuti indispensabili da trasferire agli studenti tende a collocare il docente in un'ottica rinunciataria rispetto alla FN, il cui insegnamento non viene peraltro indicato come necessario dalla normativa di riferimento¹.

L'altro fattore, anche questo già discusso (v. par. 1.2.4) che determina la quasi totale esclusione della FN dalle pratiche didattiche è ravvisabile in qualche caso nell'inadeguata preparazione dei docenti. Diplomiati spesso nei corsi di laurea in matematica, a volte perfino in ingegneria, in numero minore in fisica, questi docenti hanno raramente avuto modo di approfondire temi di fisica nucleare, se non in una fase successiva della formazione, attraverso corsi estemporanei o individualmente, con materiali divulgativi o sommari. Così, all'espressione della curiosità degli studenti corrisponde sporadicamente l'insegnamento dei fondamenti di FN, a differenza di quello che accade in paesi che ospitano tecnologie e impianti per il nucleare civile e militare e che sono contraddistinti da una "cultura del nucleare" diffusa, dove tale didattica nelle scuole superiori è indubbiamente più sviluppata e svolta come pratica ordinaria[181]. Come corollario non marginale si aggiunge che il confronto interdisciplinare tra docenti di area scientifica (docenti di scienze naturali, chimica e di fisica) e anche di altre aree (docenti di storia, filosofia, letteratura) è spesso estremamente limitato e anche nelle aree transdisciplinari - come quello dell'educazione civica o dei percorsi per l'orientamento PCTO - che dovrebbero costituire un terreno di confronto comune e agevolare la progettazione didattica trasversale, si impongono spesso tematiche che esulano dalla riflessione scientifica e epistemologica, privilegiando quelle letterarie e giurisprudenziali [117]. I tentativi di superare queste prassi resta marginale e discrezionale, spesso lasciato all'autonomia dei singoli istituti o di gruppuscoli di docenti che attivano percorsi pluridisciplinari a volte in modo disorganico, talora contraddittorio e non necessariamente efficace. Questa frammentarietà delle esperienze lavorative all'interno della scuola è studiata da decenni. In particolare si sottolinea la natura flebile delle relazioni tra i diversi attori del mondo della scuola, definito come "sistema a legami deboli" [179]. Insegnanti, dirigenti e operatori in ruoli apicali, collaboratori esterni, famiglie interagiscono senza modificarsi profondamente, mantenendo la propria identità e indipendenza, la loro separazione fisica e ideologica dagli altri e dal contesto. I loro legami sono saltuari e circoscritti, con scarsi effetti sulle loro attività. Come sottolineato in sede internazionale (OECD 2013², in questo quadro gioca un ruolo fondamentale il funzionamento dell'organizzazione scolastica e la riflessione pedagogica entro cui un istituto colloca la propria azione educativa [106]. Conviene soffermarsi su questi due aspetti, cruciali anche per questo progetto di ricerca. Per quel che riguarda la dirigenza scolastica, non vi sono stati

¹Indicazioni nazionali per il liceo scientifico, v. par. 1.2.2.

²Reperibile in: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2012/12/education-today-2013_g1g24871/edu.today-2013-en.pdf

margin di azione. Una volta identificata la scuola con cui co-progettare e realizzare il corso di formazione, si poteva soltanto auspicare la presenza di un dirigente scolastico (DS) collaborativo. Sulla profilatura del DS la letteratura che ne traccia le caratteristiche è vasta. In questo progetto ci si auspicava che la figura del dirigente, coadiuvato dai collaboratori scolastici, dalle funzioni strumentali e dai referenti di materia diventasse un catalizzatore di processi positivi. Privilegiando un ruolo equidistante tra un profilo "laissez-faire" e quello gerarchico autoritario o illuminato[52], il DS può in effetti favorire per l'istituto un'evoluzione verso la "scuola auto-organizzata", in cui i docenti diventano essi stessi promotori di riflessioni autonome o di gruppo capaci di prassi efficaci. Questo è quello che effettivamente è accaduto nell'istituto in cui il corso è stato definito e attuato. Indubbiamente la relazione tra il gruppo di docenti che hanno esercitato un'azione di leadership, collaborando con l'università, ha permesso di incardinare il corso di formazione nella riflessione pedagogica di istituto, grazie ai momenti di confronto tra docenti previsti dalla normativa scolastica (riunioni di materia/dipartimento, collegio dei docenti, consiglio di classe). Per la valorizzazione del progetto ci si è avvalsi infatti di esempi di pratiche tipiche dello sviluppo delle organizzazioni aziendali o istituzionali. Si è fatto riferimento a un paradigma utilizzato quasi esclusivamente nelle aziende, quello della ricerca-azione, che non è stato difficile estendere al contesto scolastico e su cui vale la pena tratteggiare alcune caratteristiche.

3.1.3 Il metodo della ricerca-azione e la scuola dello Human Resource Management

Nel 1911 Frederick Taylor pubblica per i tipi della Harper & Brothers Publishers una monografia che diventerà un testo rivoluzionario nell'organizzazione industriale: *The Principles of the Scientific Management* [164]. L'opera propone una progettazione centralizzata della produzione, finalizzata alla massimizzazione dell'efficienza industriale, ma anche capace di benefici per industriali e operai. La catena produttiva viene vista come unico sistema integrato, dove ogni operaio/ingranaggio ha un ruolo predefinito, mansioni chiare da espletare e in cui l'unico ostacolo alla realizzazione dell'obiettivo è l'esecuzione erronea delle operazioni da parte dei lavoratori. Questa progettualità su cui fondare la fabbrica permette inoltre vantaggi economici per l'industriale in termini di efficienza produttiva e quindi di profitto e per gli operai che possono ridurre gli sforzi e accedere ad aumenti salariali. Il successo di *The Principles of the Scientific Management* determinò infatti un cambiamento di prospettiva non solo nella pianificazione industriale, ma divenne un modello che si diffuse oltre la catena di montaggio, mirato a forgiare un nuovo modello di uomo, capace di rinunciare alla propria autonomia di giudizio e di sottomettersi passivamente alle istanze e alle logiche padronali. Un giudizio così aspro è ancor più avvalorato dalla posizione di molti storici che oggi, sulla scia di Zygmunt Bauman, vedono il taylorismo alle radici dei totalitarismi degli anni Trenta del secolo scorso. Gli eccessi di questo modello furono individuati dai contemporanei solo dopo una ventina d'anni dalla pubblicazione del testo di Taylor. Il principale oppositore alle teorie tayloriste fu Elton Mayo, che nel 1933 diede alle stampe il testo che lo rese celebre [123]: *The human problems of an industrial civilisation*. Secondo Mayo il benessere psicologico dell'individuo, le dinamiche di riconoscimento sociale, il senso di appartenenza a una collettività di lavoro sono connesse alla produttività e la partecipazione attiva del lavoratore determina una personale soddisfazione che determina, tra gli altri effetti, una maggior efficienza

nell'esercizio delle pratiche lavorative. Questa contrapposizione, che nel corso di un secolo si è evoluta, è tuttora oggetto di studio e l'attuale sociologia ha evidenziato che non solo le dinamiche lavorative, ma l'intera vita civile delle società fondate sul capitalistico è riconducibile a un modello neo-taylorista [26]. Non solo al lavoratore è richiesto di adeguarsi alle logiche della produzione industriale, ma la normalizzazione performativa ha permeato l'intera stratificazione sociale nelle sue molteplici manifestazioni e coinvolge ogni cittadino. L'efficienza della sanità, l'offerta formativa della scuola, i ruoli e le mansioni nell'amministrazione, le strategie nella mobilità sono plasmati da un unico modello neo-taylorista teso a massimizzare indicatori legati alla produzione e quindi al profitto, giovandosi anche della potenza e della permeabilità delle nuove tecnologie. In questo contesto l'unicità e la creatività dell'individuo non trovano diritto di cittadinanza.

Un gruppo internazionale di sociologi e psicologi facenti capo allo *Human Resource Management* si è proposto di riprendere e aggiornare le tesi di Elton Mayo, con lo scopo di formulare modelli alternativi di azienda, tesi a superare le logiche neo-tayloriste basate sul solo miglioramento delle prestazioni e sull'accentramento del potere decisionale, favorendo al contrario una condivisione delle responsabilità basata sulla diffusione delle capacità e delle competenze e una promozione delle capacità di progettualità autonome o di gruppo. Sulla scia del metodo della ricerca-azione sviluppato negli anni Sessanta-Settanta del secolo scorso, sulla base di esperienze inclusive anche nelle sezioni organizzative e direttive del mondo del lavoro, la scuola dello *Human Resource Management* sviluppa modelli di gestione aziendali capaci di valorizzare le risorse interne, favorendo gruppi di lavoro misti, investendo sulla capacità proattiva dei singoli, superando i ruoli stereotipati del modello taylorista, sfruttando modalità democratiche di confronto collettivo [119]. Secondo gli autori di questi studi che hanno avuto un significativo seguito anche nei confini nazionali [37], i livelli prestazionali non sarebbero compromessi e allo stesso tempo verrebbero migliorate le condizioni non solo lavorative ma complessive dei cittadini.

3.2 La progettazione del corso di formazione

3.2.1 Un nuovo approccio progettuale, il ruolo del docente Tutor

Nonostante il comparto scolastico non sia facilmente assimilabile a quello aziendale o più in generale produttivo, il metodo della ricerca - azione si presta di buon grado alla pianificazione didattica. L'organizzazione della scuola si è sempre distinta per un forte carattere inclusivo delle parti che la compongono, soprattutto a seguito delle riforme degli organi collegiali degli anni Settanta del secolo scorso. A una scuola verticistica, chiusa su se stessa, spesso sclerotizzata in ritualità sconnesse dal mondo reale, si è sostituito un modello partecipativo, più fortemente democratico teso alla valorizzazione di ogni sua componente, da quella studentesca a quella dei docenti, dei genitori e del personale tecnico e applicato [122]. Lo stesso collegio dei docenti nella stesura del principale documento di pianificazione didattica e formativa, il PTOF (Piano Triennale dell'Offerta Formativa) deve confrontarsi con realtà interne ma più spesso esterne all'istituto scolastico per adempiere all'obbligo della progettazione dei servizi offerti. Si assiste spesso alla co-progettazione e all'erogazione dell'offerta formativa della scuola da parte di enti e istituzioni anche tra loro diversi ma aventi un ruolo nel mondo educativo. È

tuttavia difficile riscontrare questo approccio nella pianificazione degli interventi di formazione dei docenti. Spesso il riconoscimento delle esigenze del corpo docente, quando non si riducono ai momenti obbligatori per legge come quelle per la sicurezza, la stesura delle attività di formazione, la ricerca dei formatori, delle sedi e dei partecipanti è ricondotta al solo ente erogatore, quale che sia: l'istituto scolastico stesso, la rete di scuole, l'accademia, gli enti per la formazione. Per superare questa anomalia, nella progettazione del corso di formazione si è deciso di avvalersi di una componente di docenti attivi nei licei, motivati a collaborare con l'università nelle diverse fasi del progetto. Si è pertanto fatto leva, più che sull'obbligo di formazione³, sulla possibilità per i docenti di partecipare attivamente a un processo dalle ricadute positive sul profilo professionale e anche a livello personale. Una delle modalità sfruttate in questo progetto per stimolare gli insegnanti di questa categoria, è stata quella di avvicinare le due realtà positive del mondo della formazione e che negli ultimi decenni hanno dato vita a progetti di successo: a) la proposta accademica, b) la richiesta di aggiornamento da parte di insegnanti già attivi in gruppi di lavoro con un'esperienza pregressa di *learning by doing* o in pratiche di *long life learning*. Con questo si è anche colmata la frattura tra l'esigenza di conoscenza della FN degli studenti e l'assenza di proposte di didattica della FN, oltretutto la lacuna spesso riscontrabile anche nell'offerta istituzionale di Alta Formazione per la fisica moderna che, per citare un esempio, nel 2022 comprende la fisica dei quanti, la relatività ristretta, l'ottica quantistica e i laser, la fisica delle particelle elementari, la fisica della materia condensata, l'astrofisica e la cosmologia, ma non la FN [47].

Tenuto conto di tutti questi aspetti, si è deciso di sfruttare la struttura fortemente democratica dei consessi scolastici (riunioni di materia, collegio dei docenti, consigli di classe) per informare gli insegnanti dell'iniziativa e per permettere loro di contribuire in forma critico-propositiva in una fase di co-progettazione iniziale che ha occupato circa due mesi all'inizio dell'a.s. 2023-2024. In questo periodo è stato centrale il Tutor d'aula, figura che spesso è relegata a ruoli organizzativi o esecutivi, sulla quale invece recentemente la letteratura nell'ambito delle Scienze della Formazione si è spesa con riflessioni che ne hanno valorizzato il profilo, facendo assumere alla figura del Tutor d'aula un vero e proprio riferimento attivo del corso [131]. Così è effettivamente stato per questo progetto, in cui il Tutor d'aula si è fatto carico di un ampio confronto con i colleghi per la discussione dei temi da affrontare durante il corso e le modalità di realizzazione, con la dirigenza per le questioni più strettamente normative e amministrative, con il coordinatore scientifico per gli aspetti di merito e per l'individuazione dei relatori⁴. In particolare si possono distinguere le azioni del tutor, spesso concordate con il coordinatore scientifico:

- rapporto con il coordinatore scientifico: nella fase iniziale le due figure si sono relazionate per definire la coerenza delle finalità dell'istituto con il percorso didattico curricolare sviluppato in aula per gli studenti (cfr. par. 2.3.2), nell'ottica di riproporlo a un gruppo di insegnanti dell'istituto. Il tutor si è attivato per *valutare l'interesse dei colleghi* e una volta ottenuto un riscontro positivo in discussioni informali e attraverso il confronto nelle riunioni istituzionali di materia ha chiesto al coordinatore scientifico di sottoporre una proposta al gruppo di insegnanti.

³La formazione in servizio dei docenti è obbligatoria, permanente e strutturale (Legge 107/2015, art. 1 c. 124)

⁴Il coordinatore scientifico del corso di formazione è chi scrive [All. 3]

- rapporto con il dirigente scolastico: il tutor si è attivato per favorire l’inserimento dell’iniziativa nel progetto RinnovaMenti del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), di cui l’istituto è diventato capofila per un *progetto nella linea di investimento* relativa alla “Didattica digitale integrata e formazione sulla transizione digitale del personale scolastico”. Nel continuo scambio tra tutor e dirigente, nonché tra figure referenti della didattica e dell’amministrazione, e tra tutor e coordinatore scientifico si è quindi potuto concepire inizialmente un primo nucleo di 5 lezioni sui fondamenti di FN e sulla ricerca di base (modulo I). A seguito di questo e dei risultati positivi confermati dal gradimento dei partecipanti, in accordo con il dirigente il corso è stato ampliato alle applicazioni della FN con altre 5 lezioni (modulo II), per poi essere completato con un workshop di 5 incontri, rivolto anche a studenti degli anni terminali del corso di studi, coinvolti a gruppi di interesse in un confronto con relatori e docenti dell’istituto sulle tematiche transdisciplinari relativi alla storia della bomba atomica e al disarmo nucleare. Si vuole insistere su questi aspetti, che saranno precisati nei paragrafi seguenti, non è tanto per esporre la struttura del corso, quanto per evidenziare che se questa esperienza è stata possibile uno dei fattori che l’ha determinata è stato indubbiamente l’aver praticato da subito e in itinere il metodo della ricerca soprattutto nell’interazione tra le figure coordinatrici del progetto e i responsabili della direzione e organizzazione di istituto (dirigente scolastico, referente di materia, personale amministrativo). Ciò ha reso possibile la progettazione e la realizzazione del corso che, fasi che nel periodo di svolgimento si sono vicendevolmente condizionate, in un processo di reciproca influenza continuamente monitorato dalle figure coinvolte.
- rapporto con il *collegio dei docenti*: non va dimenticato che proprio in virtù di quanto già sottolineato, ossia del carattere estremamente dialettico degli organi scolastici proponenti e deliberanti, il tutor si è fatto carico di presentare il progetto nella sede del collegio dei docenti per la definitiva approvazione in seno alla comunità educativa dell’istituto.
- rapporto con gli *istituti della Rete dei licei di Monza e Brianza*: avvalendosi anche di relazioni instaurate nel corso della propria carriera professionale, una volta approvato il progetto del corso di formazione, il tutor e il coordinatore scientifico hanno potuto pubblicizzare l’iniziativa presso la Rete dei licei di Monza e Brianza, estendendo così la platea dei destinatari alla quasi totalità dei licei scientifici a nord di Milano

3.2.2 Il corso di formazione nell’alveo del PNRR

Come anticipato nel paragrafo precedente, si è presentata l’occasione di realizzare il corso grazie alla richiesta di un liceo scientifico statale di partecipare alle attività di formazione dei docenti. Il gruppo dei docenti di matematica e fisica del liceo “A. Banfi” di Vimercate (MB) - questo il nome dell’istituto - si è infatti rivolto a quello che sarebbe diventato il coordinatore scientifico del progetto per valutare la possibilità di realizzare un’attività di formazione in FN. Il liceo “A. Banfi” è stato individuato infatti come il capofila di un progetto per la scuola secondaria di secondo grado nella provincia di Monza e Brianza, in particolare per i licei scientifici,

sviluppato all'interno del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR)⁵, di cui di seguito vengono riportati gli estremi:

Linea di Investimento M4C1I2.1 – Didattica digitale integrata e formazione sulla transizione digitale del personale scolastico Codice avviso: M4C1I2.1-2023-1222 CUP: H44D23003690006 Codice Progetto: M4C1I2.1-2023-1222-P-36049 Titolo del progetto: RinnovaMenti

Seguendo le modalità di progettazione sopra esposta, ossia quelle della ricerca-azione, attraverso un'interlocuzione continuativa che si è svolta a cavallo tra la fine del 2023 e l'inizio del 2024 tra le diverse figure dell'istituto e il coordinatore scientifico, si sono precisati gli obiettivi del corso, le modalità di intervento, i relatori coinvolti, le tempistiche e il calendario, di cui si allega a titolo esemplificativo una prima versione comunicata al corpo docente e relativa inizialmente alla sola prima fase del progetto [All. 2]. Come già sottolineato, il quadro generale del corso si è delineato infatti non da subito, ma in itinere, e questo effetto della dinamica di ricerca-azione, ha senza dubbio permesso di operare scelte meno precipitose e più oculate rispetto alle esigenze dei partecipanti e ai vincoli di contesto.

Diversi sono stati i vantaggi di poter operare con questo istituto, ma principalmente due, che vale la pena sottolineare. Come capofila di progetto il liceo "A. Banfi" ha potuto informare capillarmente gli istituti della rete dei licei di Monza e Brianza, territorio di cui sono già stati evidenziati gli aspetti positivi per attività di sperimentazione didattica (v. par. 1.3.2.), valorizzando la propria autonomia responsabile verso le comunità vicine e lontane, che costituisce una delle competenze istituzionali su cui fondare un buon futuro scolastico territoriale [31]. In secondo luogo l'individuazione dell'ambito della provincia di MB ha permesso di svolgere l'attività di formazione dei docenti in completa sovrapposizione con l'esperienza pregressa svolta con gli studenti sia per l'indagine preliminare (v. par. 1.3.2.) sia per le lezioni di FN (v. parr. 2.3.1. e 2.3.2.).

3.3 Struttura, metodi e obiettivi del corso

3.3.1 La struttura del corso

Al termine della progettazione si è formulata la struttura del corso che, come anticipato, ha preso forma durante lo svolgimento stesso delle attività. Il corso risulta così definitivamente suddiviso in tre moduli e così come la genesi del primo modulo è stato l'esito della relazione tra le diverse parti afferenti al corso stesso (i docenti partecipanti, il tutor, il coordinatore scientifico, i relatori, la dirigenza scolastica, il personale amministrativo), anche i successivi sono stati progettati al termine del modulo precedente, valutando anche le istanze dei partecipanti e le esigenze di contesto. Va segnalato che la progettazione prevista dal PNRR è stata caratterizzata da una forte flessibilità, che ha permesso di strutturare i primi dei moduli come veri e propri seminari accademici, mentre per il terzo è stato possibile avvalersi

⁵Per quel che riguarda le attività educative previste da Italia Domani, ossia il PNRR italiano, il MIM ha istituito la piattaforma digitale "Futura", che ha fornito il supporto all'intero corso di formazione, per gli aspetti di contenuto (cloud per i materiali, repository condiviso), di relazione tra partecipanti e tutor, di verbalizzazione e registrazione delle attività e infine di rendicontazione e supporto amministrativo

della forma del workshop, inteso come momento di condivisione/dialogo tra il relatore e la platea dei partecipanti che, in quest'ultima fase hanno coinvolto su adesione volontaria anche alcuni studenti delle classi terminali dell'istituto.

La struttura del corso di formazione che si è venuta a creare è stata quindi la seguente:

Sede: liceo scientifico statale "A. Banfi", Vimercate (MB) Progetto: Piano nazionale di ripresa e resilienza, Missione 4 – Istruzione e ricerca, Codice Progetto: M4C1I2.1-2023-1222-P-36049 Titolo del progetto: RinnovaMenti

Modulo I: Fisica nucleare con metodi e strumenti di didattica digitale

- Destinatari: docenti dei licei della rete di Monza e Brianza
- Periodo: maggio-settembre 2024
- Incontri: 5 lezioni da due ore l'una, in presenza e da remoto
- Relatori, temi e date:
- I lezione (Dott. Paolo Teruzzi): Fondamenti di FN (I parte); 2 maggio;
- II lezione (Dott. Paolo Teruzzi): Fondamenti di FN (II parte); 15 maggio;
- III lezione (Dott. Simone Bottoni): Ricerca di base (I parte); 29 maggio;
- IV lezione (Prof.ssa Silvia Leoni): Ricerca di base (II parte); 19 settembre;
- V lezione (Prof. Nicola Ludwig): Archeometria; 26 settembre.

Modulo II: Fisica nucleare con metodi e strumenti di didattica digitale

- Destinatari: docenti dei licei della rete di Monza e Brianza
- Periodo: gennaio-marzo 2025
- Incontri: 5 lezioni da due ore l'una, in presenza e da remoto
- Relatori, temi e date:
- I lezione (Prof.ssa Alessandra Guglielmetti): Astrofisica nucleare; 14 gennaio;
- II lezione (Prof. Nicola Ludwig): FN per i beni culturali; 28 gennaio;
- III lezione (Prof.ssa Roberta Vecchi): Tecniche di FN per misure di radioattività ambientale e di particolato atmosferico con acceleratore; 13 febbraio;
- IV lezione (Ing. Ivan Lonati): Reattori nucleari; 3 marzo 2025;
- V lezione (Ing. Annafrancesca Mariani): Trattamento dei rifiuti nucleari, Deposito nazionale e parco tecnologico; 11 marzo.

Workshop: Laboratorio di formazione "La fisica nucleare in classe"

- Destinatari: docenti e studenti del liceo “A. Banfi” di Vimercate (MB)
- Periodo: marzo-aprile 2025
- Incontri: 5 lezioni da due ore l’una, in presenza
- Relatori, temi e date:
- I lezione (Dott. Paolo Teruzzi): Richiami di FN e tappe fondamentali della storia della bomba atomica (I parte); 18 marzo;
- II lezione (Prof. Nicola Ludwig): Esplosioni di fantasia. Armi nucleari: effetti biologici delle radiazioni fra scienza e immaginazione artistica; 26 marzo;
- III lezione (Prof. Nicola Ludwig): L’era atomica: le influenze sulla produzione artistico-culturale; 10 aprile;
- IV lezione (Dott. Paolo Teruzzi): Tappe fondamentali della storia della bomba atomica (II parte); 15 aprile;
- V lezione (Dott. Paolo Teruzzi): Trattati per il disarmo e origini storiche del pacifismo; 29 aprile.

3.3.2 I metodi e gli obiettivi del corso

Come risulta evidente dalla sinossi del par. 4.1.1, il corso presenta uno sviluppo delle tematiche di FN ordinato e consequenziale, dato la progettazione secondo il metodo della ricerca-azione è stata l’esito di un percorso articolato nel tempo, dialogato tra le diverse parti e ha reso possibile un’organizzazione capace di rendere efficace il processo di formazione e rispondente alle istanze dei partecipanti. Il primo modulo aperto ai docenti della rete dei licei di Monza e Brianza, si è sviluppato su un tempo lungo per ragioni legate alla didattica della scuola (chiusura dell’anno scolastico, svolgimento dell’Esame di stato, interruzione didattica estiva). Ciò ha permesso ai docenti partecipanti di avere a disposizione un tempo ampio per la rielaborazione dei concetti di base della FN affrontati durante i primi tre incontri ed è stato un elemento fortemente apprezzato come è emerso dal questionario di gradimento (cfr. par. 4.2.6). Durante questo primo modulo i docenti hanno così potuto affrontare i fondamenti di FN o irrobustire la loro formazione se già presente. Il fatto che molti docenti fossero laureati in matematica o che avessero avuto una scarsa frequentazione degli argomenti di FN ha fatto preferire un’esposizione elementare degli argomenti che, al tempo stesso, non è stata vista come una riproposizione di questione note da chi era già in possesso di una cultura nucleare. Il coinvolgimento attivo dei docenti soprattutto nei primi due incontri, in cui sono stati riproposti i temi e in particolare i metodi e gli strumenti didattici già utilizzati con gli studenti nelle lezioni svolte in aula (v. II parte, cap. 2) ha reso infatti vivaci e partecipate le lezioni e il punto di vista innovativo sulla FN è stato apprezzato dai docenti presenti in aula e collegati da remoto. Nel secondo modulo si sono invece affrontate questioni legate più alle applicazioni, spesso ignorate o conosciute in modo approssimativo per via di materiali divulgativi non specialistici o di cui si ha una frammentaria conoscenza spesso ricavata dalla consultazione dei libri di testo liceali che a volte forniscono letture parziali o fuorvianti. Con i cinque incontri del secondo modulo si quindi è cercato di fornire un contributo solido per gli aspetti scientifici e al tempo sesso accessibile, che coprisse una vasta

area delle applicazioni di FN. Se alcune di queste (asrofisica nucleare, FN applicata ai beni culturali) potevano anche essere parzialmente già state incontrate dai docenti, questo non era accaduto per le tecniche di FN applicate all'ambiente o anche alle applicazioni energetiche e di trattamento dei rifiuti nucleari, che spesso sono misconosciute e il cui studio condotto da una prospettiva non ideologica è spesso arduo per un docente della scuola superiore, poco agevolato nella ricerca di fonti autorevoli e non viziate da condizionamenti preconcepiuti. Le tematiche affrontate nei due ultimi incontri sono state per questo molto apprezzate e hanno ampiamente coinvolto i docenti per motivi legati alla formazione personale ma anche professionale, dato che spesso in aula sono chiamati dagli studenti a fornire precisi chiarimenti proprio su questi ambiti applicativi (produzione di energia da processi nucleari, rischio nucleari e incidenti, smaltimento e trattamento dei rifiuti nucleari). Per quel che riguarda il terzo modulo, invece, la struttura, i destinatari e gli obiettivi individuati sono stati sostanzialmente diversi. Innanzitutto il corso è stato rivolto ai soli docenti del liceo "A. Banfi" di Vimercate, per via di condizioni previste dal format del PNNR. Lo si è tuttavia esteso anche agli studenti delle classi terminali del liceo scientifico, dato che gli argomenti transdisciplinari legati alla fisica e alla storia della bomba atomica avrebbe potuto coinvolgerli anche in vista della preparazione dell'Esame di stato. Lo svolgimento degli incontri in presenza, la mescolanza di docenti di diverse aree disciplinari e degli studenti, la varietà dei temi sviluppati ha reso quest'ultima parte del corso fortemente innovativa e ha dato vita a un confronto serrato tra relatori e partecipanti, spesso originale, in qualche caso inatteso.

3.4 I moduli del corso di formazione

3.4.1 Modulo I

Considerando il profilo dei partecipanti al corso, per la maggior parte insegnanti dei licei scientifici con laurea in matematica, si è co-progettato il primo dei tre moduli di formazione ipotizzando che la preparazione in FN degli iscritti non fosse né troppo estesa, né troppo robusta. Per questo, le due lezioni introduttive sono state impiegate per fornire un quadro generale dei rudimenti di FN, anche se esposti in modo da spiegare i fenomeni nucleari attraverso un approccio di tipo energetico, preferendolo a una descrizione sistematica ma poco approfondita dei fondamenti. Si è seguita la linea già tenuta con gli studenti (v. par. ...) , sia per la condivisione dei contenuti, sia per la metodologia di active learning utilizzata. Per quanto riguarda le altre tre lezioni, anche in vista di un possibile prosieguo dell'attività di formazione pressoché garantita dall'istituto, si è deciso di illustrare alcune tecniche di FN riscontrabili nella ricerca di base, in modo da favorire l'idea che la FN pur essendo una branca della fisica solida nei suoi fondamenti e dalle molteplici applicazioni, è ancora un settore in parte inesplorato e che nella ricerca fondamentale i progetti di FN sono vari e molteplici i legami con altri settori della fisica o transdisciplinari. Per questo alcuni ricercatori e docenti del dipartimento di fisica dell'Università degli Studi di Milano sono stati chiamati a illustrare come sia ancora possibile compiere indagini sperimentali per lo studio del nucleo (forma, struttura energetica, massa, ...) o, diversamente, come sia stato possibile concepire e realizzare procedure che hanno superato i confini della FN di base per essere applicate a ambiti apparentemente lontani (astrofisica, medicina, beni culturali).

Di seguito vengono riportati i contenuti e alcuni episodi significativi delle cinque lezioni del modulo I del corso di formazione⁶.

3.4.2 I e II lezione, modulo I: Fondamenti di FN

I primi due incontri del corso sono stati tenuti da chi scrive.

Come già anticipato, l'obiettivo di questi primi due incontri era strettamente legato alla tipologia degli iscritti al corso, caratterizzati da profili professionali estremamente diversificati, come è stato già sottolineato. Dato che alcuni di questi docenti avrebbero poi seguito tutti e tre i moduli previsti dal piano di formazione, queste sarebbero state le prime due lezioni di una sequenza di quindici incontri. Si è perciò deciso di fornire tutti i fondamenti elementari della FN, in un'ottica che privilegiasse le spiegazioni dei fenomeni in base a considerazioni energetiche a una rappresentazione esclusivamente descrittiva e nozionistica dei rudimenti di FN [108] [167]. Visto il successo ottenuto con i seminari pomeridiani e le lezioni curriculari con gli studenti, si è seguito lo stesso canovaccio sia per la scelta e l'ordine di presentazione dei contenuti, sia per l'uso degli strumenti didattici utilizzati. In questo modo di docenti hanno sperimentato in qualità di soggetti di apprendimento l'intera sequenza didattica già svolta con gli studenti. Al di là della novità dei contenuti, non solo per i docenti laureati in fisica, ma anche per i fisici stessi, i corsisti hanno perciò affrontato le due lezioni in parte svolte in modo frontale, in parte con il contributo attivo degli stessi docenti, chiamati a lavorare come già avevano fatto gli studenti, singolarmente o in gruppo su singoli quesiti, questionari, puzzle, esercizi e problemi (v. par. 2.2.5) e sfruttando gli stessi materiali didattici.

Dopo aver tracciato un quadro della didattica della FN in Italia, riassumendo le informazioni già esposte in questa tesi (v. cap. 1), si sono delineate le finalità del corso e si è divisa la platea dei partecipanti in gruppi, che hanno preso il nome da quello dei fisici che maggiormente hanno contribuito allo sviluppo della FN (Becquerel, Madame Curie, Fermi, Segrè, Oppenheimer, Teller, Rotblat, Heisenberg, Weizsäcker).

La prima parte della lezione si è svolta facendo lavorare i gruppi con i materiali ideati per gli studenti (v. par. 2.2.6). Si è così iniziato con un test individuale relativo all'atomismo antico e alle discussioni sulla divisibilità della materia fiorite in ambito rinascimentale, svolto dai corsisti tramite smartphone. Ogni domanda prevedeva quattro risposte, di cui una sola era corretta. I risultati del test sono stati deludenti, in quanto il punteggio medio rilevato è stato di 2,53/12 con deviazione standard dalla media pari a 1,07. Il dibattito che ne è seguito ha messo in luce principalmente la scarsa diffusione della storia della fisica e dei principi filosofici ad essa sottesi, con l'auspicio che una maggiore cooperazione con i colleghi di area umanistica possa sanare le lacune diffuse [App. 8]. A questa è seguita una seconda prova, il puzzle, che come per gli studenti era centrata attorno all'atomo di Thomson [App. 4]. In questo caso i corsisti hanno lavorato per gruppi e al termine dell'esercitazione sono state commentate le scelte fatte, per la maggior parte corrette. Il questionario di chimica atomica, già somministrato agli studenti, non viene rivolto ai docenti, in quanto la materia dovrebbe essere nota [App. 9]. Questa prima ricognizione introduttiva, che ha avuto anche il merito di segnare il

⁶Le immagini di questa sezione così come di quelle relative agli altri due moduli sono tratte dalle diapositive delle presentazioni dei docenti coinvolti e da loro cortesemente fornite

perimetro della cornice in cui le questioni sono inquadrare, ha preceduto una parte frontale in cui sono stati richiamati concetti di base, necessari alla comprensione della FN. Con i richiami all'equivalenza massa-energia e con l'analisi del deutone, si è potuto introdurre la questione del difetto di massa e dell'energia di legame e poi dell'energia di legame per nucleone, di cui è stato mostrato e discusso l'andamento in funzione del numero di massa. Come accaduto per gli studenti, anche con i docenti si sono affrontate questioni relativi all'andamento del potenziale nucleare e ad altre questioni energetiche attraverso questionari e discussioni ad essi susseguite [App. 3 e 5]. Anche la formula semiempirica delle masse dovuta a Carl Friedrich von Weizsäcker è stata scritta, termine a termine, deducendo la forma di ogni singolo addendo da considerazioni di tipo semiempirico sul nucleo, sull'interazione coulombiana, sulla forza debole, e sfruttando l'analogia del nucleo assimilato a una goccia d'acqua.

Per quel che riguarda la seconda lezione, affrontata in modo pressoché frontale, sono stati introdotti i decadimenti, ricavandone la legge e mostrando un programma elementare sviluppato col foglio di calcolo per la valutazione della frazione residua dei nuclei non decaduti in funzione del tempo. Questo esempio di didattica digitale da sfruttare in aula, benché estremamente semplice, ha il merito di avvicinare gli studenti al foglio di calcolo utilizzato come strumento di programmazione. Ci si aspetterebbe infatti che gli studenti al termine del ciclo scolastico sappiano utilizzare anche in questo modo il foglio di calcolo, ma per alcuni di loro non è ancora uno strumento familiare e per la maggior parte è utilizzato come archivio di dati su cui operare con semplici comandi elementari. La lezione prosegue come già avvenuto per quelle con gli studenti, con un ritmo più serrato e si conclude con l'analisi della teoria della fissione dovuta a Bohr e Wheeler, già citata.

Questa prima esperienza di formazione di docenti in FN ha permesso al termine delle prime due lezioni un confronto informale con i partecipanti, le cui osservazioni possono essere così sintetizzate:

- I contenuti sono interessanti, ma non sempre immediati e richiedono un'ampia frequentazione domestica dopo la lezione,
- I tempi delle lezioni sono stati serrati e un'eventuale ripetizione del corso dovrebbe prevedere una maggior durata di questi primi due interventi,
- La mancanza di testi in adozione che trattano la FN con il punto di vista adottato nel corso rende più impegnativa una declinazione didattica in aula dei contenuti affrontati.

3.4.3 III lezione, modulo I: Ricerca di base (I parte)

Nella lezione del Dott. Simone Bottoni, ricercatore del dip. di fisica di Unimi, sono stati esposti i risultati più importanti della ricerca sperimentale di base e le sfide attuali a cui è chiamata.

Nella sintesi successiva sono riportati i temi trattati:

- Studio e produzione di nuclei in laboratorio, per descrivere più compiutamente la struttura nucleare.

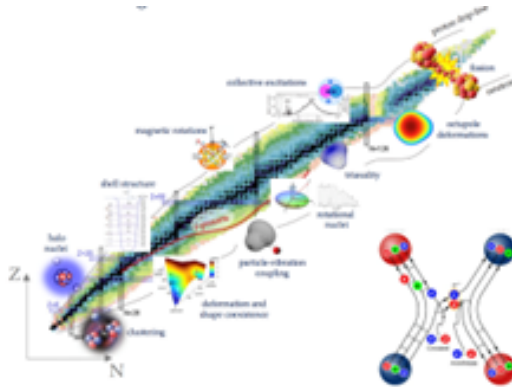


Figura 3.1 tavola isotopica di Segrè e classificazione dei nuclei per comportamenti

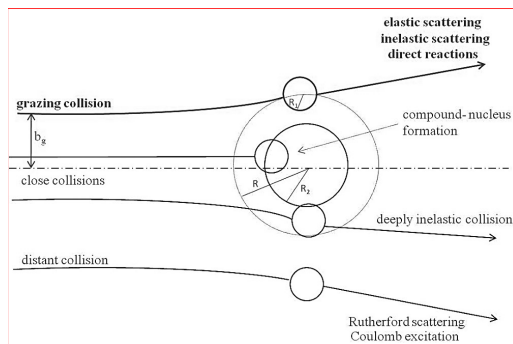


Figura 3.2 schematizzazione delle tipologie di reazioni nucleari indotte da ioni in funzione del parametro di impatto

- Esposizione della tavola dei nuclidi di Segrè (Fig.3.1), con riferimento alle dip-line protonica e neutronica, ai nuclei non sferici (esotici, con elevato numero di neutroni, massicci), a nuclei come di cluster di deutoni o particelle alfa, ai nuclei leggeri con elevato numero di massa che assumono forma ad alone, raggiungendo dimensioni dell'ordine degli isotopi stabili del piombo.
- Descrizione delle reazioni nucleari indotte da ioni, in funzione del parametro di impatto b_g (Fig. 3.2)
- Trattazione della casistica delle reazioni:
 - (a) $b_g = 0$, fusione-evaporazione del nucleo: il nucleo composto che si viene a formare nella reazione emette particelle (neutroni, alfa, trizio, ...). In gergo si dice che "evapora".
 - (b) $b_g > 0$, reazioni in cui non si forma un nucleo composto e possono avvenire sopra o sotto barriera in funzione dell'energia degli ioni incidenti. Ioni accelerati spostano la reazione sopra barriera (Fig. 3.33.4)

Grafico del potenziale nucleare forte e del potenziale coulombiano

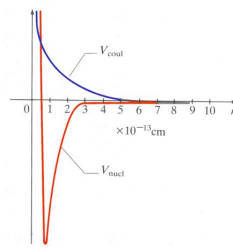


Figura 3.3 rappresentazioni del potenziale coulombiano (in nero) e nucleare (in rosso)

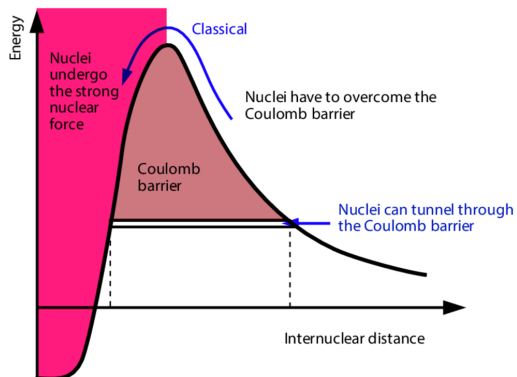


Figura 3.4 effetto combinato fornisce l'andamento della buca di potenziale

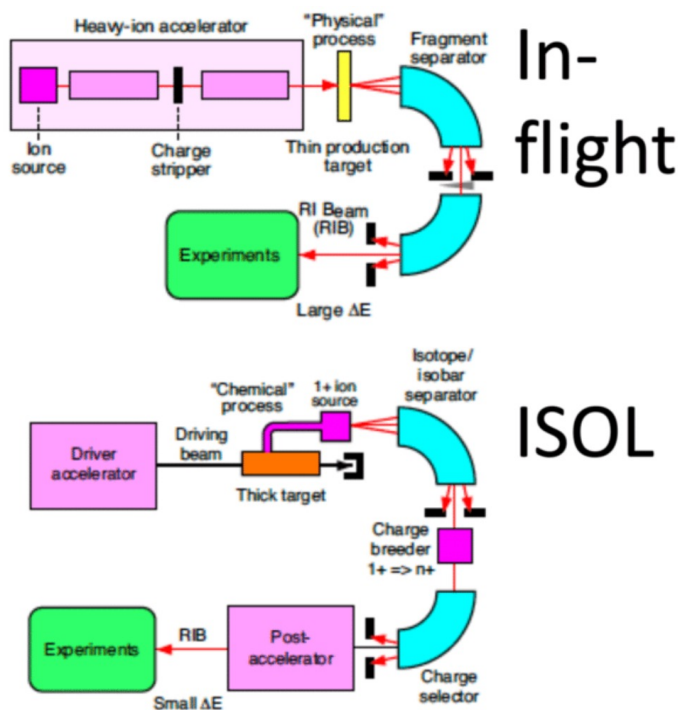


Figura 3.5 schematizzazione delle facility per misure In-flight e ISOL

- **Facilities:** vengono presentate i principali laboratori di ricerca che lavorano con tecniche In-Flight per ottenere ioni ad alte energie o con tecniche ISOL (Fig. 3.5). In questo ambito vengono anche esposte le tecniche di misura di radioattività con rivelatore e il progetto AGATA.

3.4.4 IV lezione, modulo I: Ricerca di base (II parte)

La lezione della Prof.ssa Silvia Leoni, del dipartimento di fisica dell'Università degli Studi di Milano, è stata pensata in stretta continuità con quella del Dott. Simone Bottoni. I temi trattati nell'incontro sono stati tre: descrizione delle problematiche dell'astrofisica nucleare, principali tecniche innovative di fisica sanitaria, misure di masse nucleari.

Nella parte dedicata all'astrofisica nucleare vengono distinte due fasi di vita dell'universo: i primi tre minuti trattati dalla fisica delle particelle, e il tempo successivo che è di competenza della FN. Si illustra il problema dei nuclei presenti nell'universo (da circa 7000 a 9000, di cui solo circa 3000 noti), accennando alla nucleosintesi stellare. Viene poi illustrata una metodologia sperimentale, relativa alla rivelazione delle novæ. In particolare un'eventuale presenza di sodio 22 nelle osservazioni, consentirebbe di garantire la presenza di una nova come sorgente [167]. Tale risultato dovrebbe essere conseguito dall'esperimento AGATA, in corso

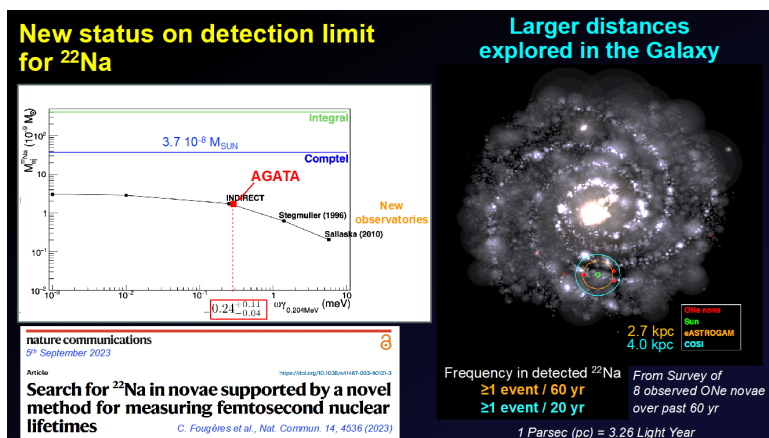
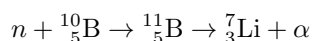


Figura 3.6 diapositiva della presentazione relativa all'efficienza di rivelazione del sodio 22 dagli attuali telescopi e da quelli di futura generazione

presso i laboratori nazionali di Legnaro, grazie all'efficienza di rivelazione, di due ordini superiori a quella delle facility attuali (Fig. 3.6).

Quando viene trattata la sezione di fisica sanitaria, la docente espone le tecniche nucleari più innovative (adroterapia, boron neutron capture therapy, iniezione di radioisotopi). Anche per favorire una maggior conoscenza del territorio scientifico prossimo alla sede del corso, la docente cita il Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (C.N.A.O.) di Pavia e i trattamenti terapeutici con protoni da 250 MeV e ioni carbonio da 4800 MeV. Vengono illustrati i principi di funzionamento della tecnica adroterapica, sottolineando il vantaggio di operare con ioni la cui perdita di dose è funzione della profondità del tessuto, cosa che permette il rilascio di energia nelle zone compromesse dalla presenza di cellule tumorali. Per quanto riguarda la boron neutron capture therapy utile per il trattamento di tumori superficiali, viene ricordata la reazione



e le energie dei prodotti (1,47 MeV per la particella alfa con capacità di penetrazione di circa 5 m e 0,84 MeV per il litio 7 che penetra per circa 8 m) che viene rilasciata a particolari profondità nel tumore che, prima dell'irraggiamento con neutroni, ha assorbito boro tramite somministrazione esterna. Analoga è la tecnica che fa uso di radioisotopi, che rilasciano energia a corto range per la modifica dei DNA cellulari. Vengono poi forniti riferimenti bibliografici per una consultazione più dettagliata degli argomenti [91, 147].

Per quanto riguarda la parte più focalizzata sulla ricerca di base, la relatrice illustra i metodi principali di misura delle masse nucleari. Dopo un breve excursus sull'evoluzione della spettroscopia di massa (Fig. 3.7), vengono messi in luce i vantaggi delle tecniche sperimentali, rispetto alle valutazioni teoriche, che consentono di ridurre di circa tre ordini di grandezza l'incertezza relativa $\frac{\delta m}{m}$ sulla valutazione delle masse nucleari.

A brief history of mass spectrometry

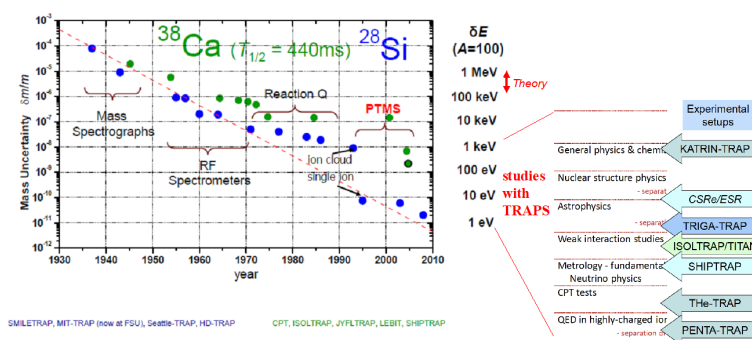


Figura 3.7 diapositiva della presentazione: evoluzione della spettroscopia di massa e valutazione dell'incertezza relativa (1 eV – 1 keV dalle valutazioni sperimentali, 100 keV – 1 MeV dalle modellazioni teoriche)

3.4.5 V lezione, I modulo: Archeometria

La lezione viene divisa in due parti dal docente, il Prof. Nicola Ludwig del dipartimento di fisica dell'Università degli Studi di Milano. La prima più generale sulle tecniche scientifiche adottate in campo artistico e culturale in senso ampio, la seconda più specifica sui metodi di datazione basate sulla FN. Prima parte: vengono analizzate alcune tecniche d'analisi chimiche e fisiche, per la caratterizzazione di manufatti artistici, anche in funzione della loro invasività e distruttività dei campioni (Fig. 3.8).

Vengono confrontate le due tipologie di tecniche e viene sottolineato che nelle analisi chimiche la massima sensibilità raggiungibile è dell'ordine della p.p.b. (part per billion), ossia di 10^{-9} , mentre in quelle fisiche è possibile ottenere dati con una soglia minima relativa a circa 1000 atomi per mole, ossia circa $\frac{10^3}{10^{23}} = 10^{-20}$, con un incremento di sensibilità di circa undici ordini di grandezza rispetto a quelle di tipo chimico. Un ulteriore limite di queste ultime è rappresentato dall'alterazione del reperto per via di ossidazioni, il cui effetto cresce all'aumentare dell'età del reperto e che in sede di misura rappresenta un ostacolo alla raccolta di dati. Il degrado dei campioni, indotto anche da altre cause, spesso è un fenomeno accelerato, non lineare con il trascorrere del tempo.

Seconda parte: si chiarisce la distinzione tra datazione relativa a un riferimento noto, che può essere un reperto di cui si conosce già l'età, e datazione assoluta che si può ricavare attraverso metodologie di analisi, spesso di tipo nucleare. Per questo ultimo tipo di tecniche è necessario che il reperto in analisi contenga una sorta di "orologio" nucleare, capace di correlare una grandezza fisica allo scorrere del tempo (Fig. 3.9).

A titolo esemplificativo vengono trattate diverse tecniche di datazione: quella che fa uso degli isotopi dell'uranio, il metodo del radiocarbonio, la termoluminescenza. Per quanto riguarda il metodo del radiocarbonio, che più ampiamente è stato trattato nella lezione, si mettono in evidenza il ciclo del carbonio (formazione co-

Analisi INVASIVE				Analisi NON INVASIVE		
Distruttive del campione (prelievo)	Non Distruttive del prelievo	Microdistruttive	Nanodistruttive	Uso di radiazioni ionizzanti	Uso di radiazioni non ionizzanti	Raccolta passiva
Tecniche analitiche e di datazione				Imaging		

Fig.1: Schema indicativo dei concetti di invasività e distruttività delle analisi. La non invasività rispetto all’oggetto studiato aumenta procedendo da sinistra verso destra fino alla “raccolta passiva” della radiazione o altro perso spontaneamente dal campione

Figura 3.8 sinossi delle tecniche di analisi su campioni di interesse artistico e culturale in successione da sinistra verso destra per invasività decrescente

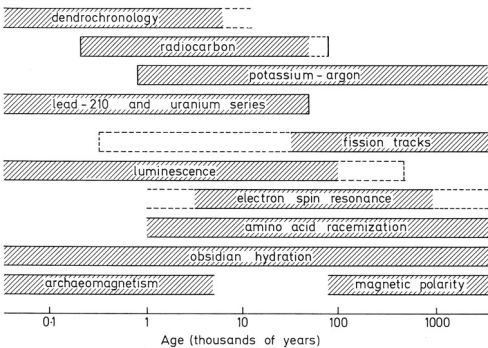


Figura 3.9 metodologie di datazione assoluta e range temporale relativo

PROBLEMI nella determinazione dell'età con il metodo del radiocarbonio

Frazionamento isotopico: il C14 viene assorbito meno del C12 da alcune piante.
Rimescolamento oceanico: negli oceani profondi il C14 risiede un tempo talmente lungo (migliaia di anni) che quando torna in superficie è parzialmente spento.
Effetto di rimescolamento locale dalle acque profonde, alterazioni locali possono portare in superficie acque con quantità di C14 parzialmente spento. L'effetto è rilevante fra emisfero Nord e Sud
Effetti locali quando vengono metabolizzati (conchiglie) carbonati di origine minerale (privi di C14) invece della CO2 atmosferica
Eruzioni vulcaniche giganti che immettono in atmosfera C12 minerale alterando l'equilibrio C14/C12
Effetto Suess (1850-1950): immissione in atmosfera di particelle carboniose dovute alla combustione di carbonio fossile spento (petrolio/carbone/metano)
Effetto Bomba: dagli anni '50 del XX sec. alterazione delle concentrazioni di radio-nuclidi in atmosfera dovuta a test nucleari.

Variazioni nel tasso di produzione del C14 in atmosfera a causa di variazioni del flusso solare o del campo magnetico terrestre

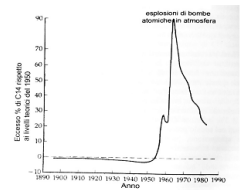


Figura 3.10 limiti della tecnica di datazione con il radiocarbonio

smogenica, assunzione da parte degli organismi viventi), i limiti della tecnica (Fig. 3.10) e la necessità di curve di taratura dendrocronologiche.

A corredo della trattazione teorica vengono discussi gli esempi della datazione degli anelli degli alberi, della Sindone (Fig. 3.11), delle cere di supporto alle gemme nei castoni della Corona Ferrea e si riporta la variazione di concentrazione del carbonio 14 in diverse epoche storiche.

3.4.6 Esiti del questionario di gradimento

Al termine del modulo I è stato rivolto ai docenti partecipanti un questionario di gradimento per la valutazione del corso di formazione rispetto a una batteria di indicatori [App. C]. Hanno risposto al questionario 16 docenti (55% dei partecipanti). Gli esiti sono riportati in Tab. 3.1 . Segue un breve commento.

Tabella 3.1: Risultati del sondaggio sul corso di formazione

Domanda	Esito
Età	8 oltre i 55 anni 4 tra 46 e 55 anni 2 tra 36 e 45 anni 2 tra 25 e 35 anni
Laurea	12 matematica 3 fisica

(continua nella pagina successiva)

(continua dalla pagina precedente)

Domanda	Esito
Numero N di anni di insegnamento nei licei (triennio)	1 altro 2 $N < 6$ 2 $5 < N < 11$ 3 $10 < N < 16$ 9 $N > 15$
Numero N di anni di insegnamento nell'ultimo anno	2 $N < 3$ 2 $2 < N < 8$ 5 $7 < N < 13$ 6 $N > 12$
Numero N di anni di insegnamento di FN	9 $N < 3$ 4 $2 < N < 8$ 2 $7 < N < 13$ 0 $N > 12$
Gli argomenti trattati nel corso sono stati interessanti?	Valutazione media: 8,88 Deviazione standard: 0,96
Gli argomenti trattati nel corso hanno risposto alle sue aspettative?	Valutazione media: 8,44 Deviazione standard: 1,21
Gli argomenti trattati nel corso erano accessibili?	Valutazione media: 8,25 Deviazione standard: 1,24
I metodi utilizzati durante le lezioni erano adeguati ai contenuti sviluppati?	Valutazione media: 8,69 Deviazione standard: 1,30
I metodi utilizzati durante il corso erano favorevoli per il coinvolgimento dei partecipanti?	Valutazione media: 8,56 Deviazione standard: 1,26
I materiali utilizzati e condivisi con i partecipanti sono stati utili al processo di formazione?	Valutazione media: 8,94 Deviazione standard: 1,25

(continua nella pagina successiva)

(continua dalla pagina precedente)

Domanda	Esito
Il numero degli interventi è stato sufficiente a sviluppare le tematiche del corso?	14 sì 2 no (meglio più interventi)
La durata degli interventi era adeguata?	15 sì 1 no (meglio più corta)
Come reputa la modalità di svolgimento mista del corso "in presenza e da remoto"?	Valutazione media: 9,13 Deviazione standard: 0,96
Le informazioni relative all'organizzazione sono state tempestive?	16 sì
Il calendario degli incontri è stato adeguato?	15 sì 1 no
La struttura tecnica dell'ente formatore si è rivelata adeguata?	15 sì 1 no
In che misura i docenti erano preparati e competenti?	Valutazione media: 9,63 Deviazione standard: 0,72
I docenti hanno comunicato in maniera chiara e comprensibile?	Valutazione media: 8,94 Deviazione standard: 1,13
I docenti hanno fornito spunti di riflessione e approfondimento?	Valutazione media: 9,00 Deviazione standard: 1,10
In che misura il corso è stato utile per la sua formazione personale?	Valutazione media: 8,88 Deviazione standard: 1,09
In che misura il corso è stato utile per l'effettiva possibilità di sviluppare argomenti di fisica nucleare nell'attività didattica?	Valutazione media: 7,75 Deviazione standard: 1,00
In che misura il corso ha fornito degli argomenti trasferibili nell'attività didattica?	Valutazione media: 7,68

(continua nella pagina successiva)

(continua dalla pagina precedente)

Domanda	Esito
Nell'eventualità che ci sia un prosieguo del corso, in che misura vorrebbe che venissero sviluppate tematiche relative alla misura di radioattività?	Deviazione standard: 1,10 Valutazione media: 8,25
O alla FN per l'ambiente?	Deviazione standard: 1,61 Valutazione media: 9,25
O alla Nucleosintesi?	Deviazione standard: 0,87 Valutazione media: 7,56
O alla fissione nucleare e transizione energetica?	Deviazione standard: 2,27 Valutazione media: 9,31
O alla fusione nucleare?	Deviazione standard: 0,80 Valutazione media: 9,38
O alla radioprotezione?	Deviazione standard: 0,81 Valutazione media: 7,63
O al deposito nucleare nazionale e trattamento dei rifiuti radioattivi?	Deviazione standard: 2,85 Valutazione media: 8,13
In merito alla sezione di fisica nucleare, i libri di testo sono aggiornati?	Deviazione standard: 2,25 Valutazione media: 6,00
In merito alla sezione di fisica nucleare, i libri di testo propongono una didattica inclusiva?	Deviazione standard: 1,31 Valutazione media: 6,00
	Deviazione standard: 1,46

(continua nella pagina successiva)

(continua dalla pagina precedente)

Domanda	Esito
In merito alla sezione di fisica nucleare, i libri di testo si limitano a un'esposizione descrittiva dei fenomeni nucleari senza analizzarne le cause legate al potenziale nucleare?	Valutazione media: 7,31 Deviazione standard: 1,82

Gli esiti riportati in Tab. 3.1 permettono diverse considerazioni. I docenti che hanno risposto al questionario, pur essendo una frazione non elevata della platea degli iscritti (55%), hanno dato risposte tra loro coerenti. La bassa adesione alla proposta del questionario, può in parte essere giustificata dalla modalità di svolgimento del modulo: la modalità mista "in presenza e da remoto" non ha favorito l'esecuzione contestuale del questionario, assegnato invece come compito domestico e da una parte non trascurabile dei corsisti non svolto. Il campione mostra una componente di docenti maturi, con ampia esperienza di insegnamento nel triennio del liceo scientifico, spesso laureati in matematica e con profonda esigenza di formazione/aggiornamento in FN, che anche nell'ampia esperienza di docenza nelle classi terminali del liceo, raramente o per nulla hanno insegnato. In merito al corso di formazione seguito, il giudizio dei docenti è molto positivo per tutti gli aspetti progettuali e anche sotto il profilo organizzativo non vengono mosse critiche, nonostante nella calendarizzazione degli incontri sia stata posta un'ampia pausa tra i primi tre incontri e i successivi in ragione dell'interruzione estiva. I relatori del corso sono stati molto favorevolmente apprezzati e, nonostante l'esito in questo caso sia leggermente più basso, i loro contributi sono stati considerati utili alla formazione personale e professionale dei docenti, anche nella prospettiva delle ricadute didattiche nella loro attività di insegnamento nelle classi. Per quanto riguarda i libri di testo, l'alta deviazione standard evidenzia uno scontento diffuso, sia relativamente ai contenuti presenti, sia alla mancanza di un approccio innovativo nella presentazione della FN. L'elevato interesse manifestato al termine del questionario per alcuni temi della FN (FN per l'ambiente, fissione e fusione nucleare, deposito nazionale e trattamento dei rifiuti radioattivi) ha permesso infine, in chiusura del corso, di individuare alcune tematiche del modulo successivo, in cui queste sono confluite, come mostrano i paragrafi successivi.

3.4.7 Modulo II

Alla luce degli esiti del questionario di gradimento del II modulo e avendo come obiettivo quello di realizzare un corso di formazione in FN quanto più completo possibile, nella fase di co-progettazione si sono individuati alcuni settori per l'approfondimento della FN, in particolare per i campi relativi alle principali applicazioni. Si sono così individuate cinque aree interessanti per i corsisti e coerenti con le finalità del corso: astrofisica nucleare, FN per i beni culturali, tecniche di FN per misure di radioattività ambientale e di particolato atmosferico con acceleratore, reattori nucleari: trattamento dei rifiuti nucleari e deposito nazionale e parco tecnologico.

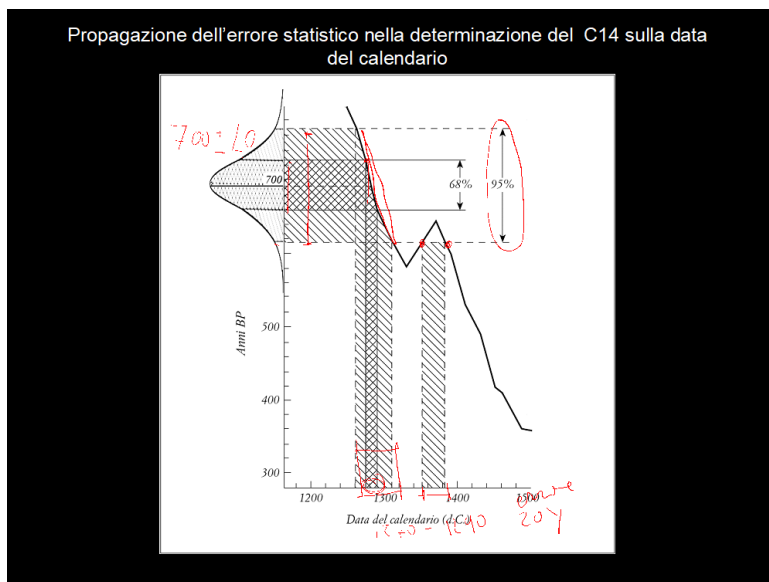


Figura 3.11 propagazione dell'errore nella datazione della Sindone (entro un sigma la datazione riporta il reperto al periodo tardomedievale, entro due sigma al periodo medievale e prerinascimentale)

3.4.8 I lezione, modulo II: Astrofisica nucleare

All'inizio dell'intervento la Prof.ssa Alessandra Guglielmetti, del dipartimento di fisica dell'Università degli Studi di Milano, definisce l'astrofisica nucleare come quel settore della FN finalizzato alla comprensione dei meccanismi di produzione di energia nelle stelle e delle abbondanze isotopiche nell'universo. Viene sottolineato come questa branca della FN è interdisciplinare in quanto è legata all'astronomia osservativa, alla cosmologia, alla fisica del neutrino, alla modellazione stellare e trova connessioni transdisciplinari anche al di fuori della fisica.

L'esposizione si concentra poi su tre particolari argomenti:

- Big bang e nucleosintesi degli elementi leggeri
- Nascita di una stella e sua evoluzione
- Reazioni nucleari nelle stelle e nucleosintesi stellare (esperimento LUNA presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso)

Big Bang e nucleosintesi degli elementi leggeri

Viene analizzata l'evoluzione dell'universo dai primi istanti dopo il Big Bang, chiarendo le prove osservative della sua espansione. I fenomeni di produzione della materia sono legati alle temperature dell'universo e quindi allo scorrere del tempo.

- $T \sim 10^{12}$ K l'universo è costituito da quark e antiquark, leptoni ed antileptoni, neutrini ed antineutrini, gluoni e fotoni ad altissima densità, pressione e

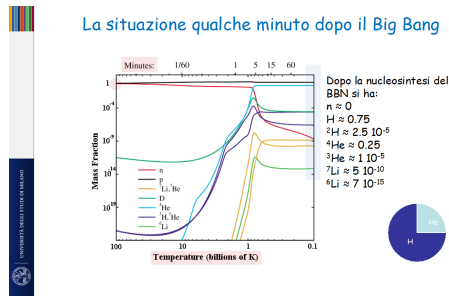
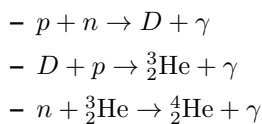


Figura 3.12 nucleosintesi degli elementi leggeri

temperatura sono elevatissime. Non è possibile neppure la formazione del deuterio.

- $T \gg 10^{11}$ K Neutrini e antineutrini si disaccoppiano dalle altre particelle.
- $T \gg 10^{10}$ K La radiazione gamma non è più sufficientemente energetica per creare coppie di elettroni e positroni. Non ci sono più positroni.
- $T \gg 10^9$ K Aumenta la probabilità di conversione dei neutroni in protoni e si formano i primi elementi leggeri secondo le seguenti principali reazioni:



- Per reazioni successive si produce anche litio 6 e litio 7. Non si ottengono elementi più pesanti del litio. La nucleosintesi torna ad avere un ruolo fondamentale solo nelle stelle, circa 10^8 anni dopo.

Viene infine rappresentata una diapositiva con i risultati della nucleosintesi degli elementi leggeri (Fig. 3.12).

Nascita di una stella e sua evoluzione

Per arrivare a comprendere la formazione degli elementi pesanti, viene spiegata il fenomeno della nascita di una stella e analizzati i cicli di produzione dei nuclei leggeri (ciclo di combustione dell'idrogeno p-p, cicli carbonio-azoto-ossigeno C-N-O, neon-sodio Ne-Na, magnesio-alluminio Mg-Al), che avvengono tipicamente nelle stelle della sequenza principale del diagramma di Hertzsprung-Russell.

Per quanto riguarda la produzione di elementi pesanti fino al ferro viene quindi esposta la teoria relativa alle stelle massicce e alla formazione degli elementi nei diversi gusci della stella (modello a cipolla), nei gusci più esterni si formano gli elementi leggeri, in quelli più interni gli elementi più pesanti (Fig. 3.13).

Reazioni nucleari nelle stelle e nucleosintesi stellare

Per la formazione dei nuclei più pesanti del ferro, vengono trattati i processi di cattura neutronica s e r (slow e rapid) e il processo di cattura protonica. Viene quindi spiegata nel dettaglio la teoria delle reazioni di fusione stellare, facendo

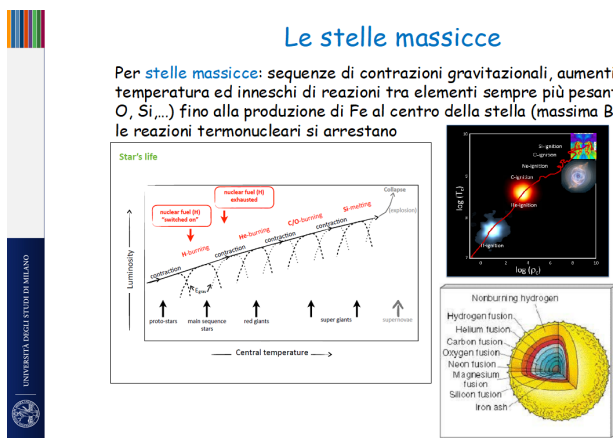


Figura 3.13 diapositiva relativa alla nucleosintesi in stelle massicce

uso di modelli matematici sofisticati che vengono presentati non tanto come contenuti da riproporre in classe, dove risulterebbero inadeguati alla preparazione degli studenti, ma per una maggior comprensione del fenomeno.

La parte finale della lezione è dedicata alla presentazione dell'esperimento LUNA sviluppato ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso e allo studio della densità barionica primordiale in laboratorio, legata alla produzione primordiale di deuterio.

3.4.9 Il lezione, modulo II: FN per i beni culturali

In questa lezione è stato esposto dal Prof. Nicola Ludwig, che i corsisti avevano già incontrato nel I modulo diformazione, il metodo di analisi dei materiali che va sotto il nome di Rutheford Back Scattering (RBS), considerato a tutti gli effetti una tecnica nucleare per l'analisi non distruttiva di campioni. Viene esposto brevemente l'esperimento storico del fisico britannico Ernest Rutheford che costituisce il riferimento teorico di base su cui la tecnica si fonda [inserire riferimento all'allegato materiali didattici]. In particolare viene sottolineato che le particelle alfa che subiscono scattering elastico per effetto dell'interazione con gli atomi d'oro bersaglio costituiscono una frazione estremamente ridotta di quelli incidenti sulla targhetta metallica (Fig. 3.14).

Quello che viene sfruttato in un'analisi RBS su campioni di interesse culturale o anche solo industriale o di altro genere, è a tutti gli effetti lo scattering di un fascio di particelle alfa inviato su un campione costituito da elementi non noti. A livello microscopico tale fenomeno è interpretato come un urto elastico tra una particella alfa di massa m_a e un nucleo di massa atomica M . Nel caso di un campione costituito da un elemento puro, dall'analisi dello spettro delle particelle alfa retrodiffuse è possibile risalire all'elemento che costituisce il mezzo. La risoluzione delle equazioni di conservazione della quantità di moto totale e dell'energia cinetica totale del sistema alfa+nucleo permette di ricavare l'espressione dell'energia E_i della particella alfa diffusa in funzione dell'energia E_d della particella alfa diffusa e di definire un coefficiente k che lega le due grandezze, dipendente dalle sole masse

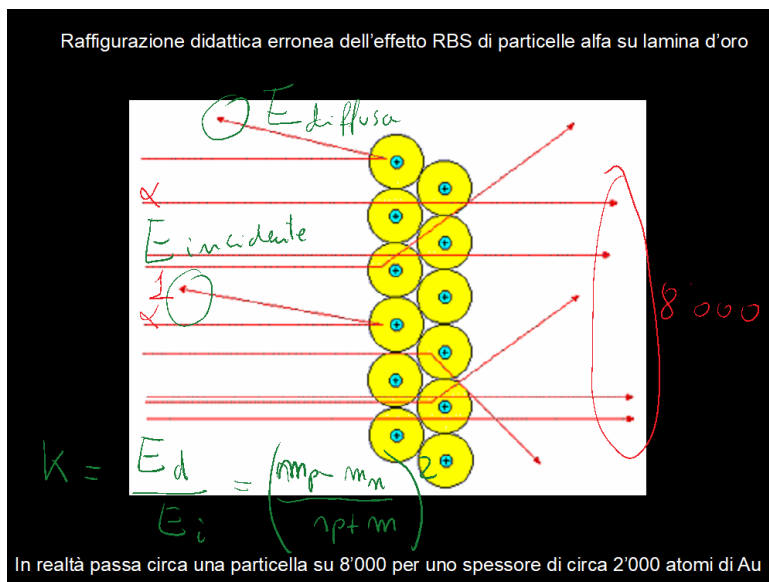


Figura 3.14 diapositiva rielaborata in aula relativa allo scattering alfa nell'esperimento di Rutheford

delle particelle:

$$k = \frac{E_d}{E_i} = \left(\frac{M - m_\alpha}{M + m_\alpha} \right)^2$$

Tale coefficiente è evidentemente minore di uno e, noti i valori di E_i e E_d , dalla valutazione di k è possibile risalire alla massa atomica e quindi all'elemento che costituisce il mezzo (Fig. 3.15).

Un campione contenente diversi elementi in traccia determina un fenomeno più complesso, in quanto il valore dell'energia cinetica delle particelle alfa diffuse dipende dalla massa bersaglio. Lo spettro energetico ottenuto per un mezzo sottile è quindi costituito da diversi picchi che permettono di individuare gli elementi presenti: i picchi meno energetici sono corrispondenti agli elementi più leggeri, i cui nuclei costituiscono bersagli contro cui le particelle alfa cedono maggior energia (Fig. 3.16).

Lo spettro dipende anche dallo spessore del campione, in quanto le particelle alfa che colpiscono nuclei che si trovano a una significativa profondità rispetto alla superficie, vengono retrodiffuse e riemesse dal mezzo con un'energia inferiore di quelle che hanno subito il fenomeno di scattering alla superficie. Lo spettro finale sarà quindi costituito non da picchi, ma da aree estese corrispondenti ognuna ai diversi elementi presenti in traccia nel campione (Fig. 3.17).

Nei casi di campioni molto spessi queste regioni possono sovrapporsi e rendere più complesso il riconoscimento degli elementi presenti (Fig. 3.18).

Vengono poi ampiamente discussi casi reali di analisi RBS su manufatti di interesse artistico. Di seguito sono rappresentati i casi di studio di una campitura d'oro in un ritratto di Napoleone Bonaparte a cavallo e di una caratterizzazione di pigmenti

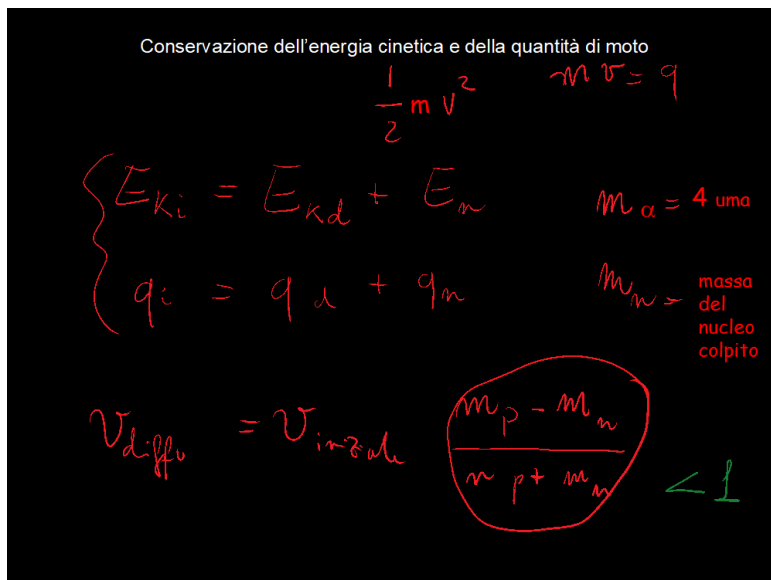


Figura 3.15 diapositiva rielaborata in aula relativa alle equazioni di conservazione

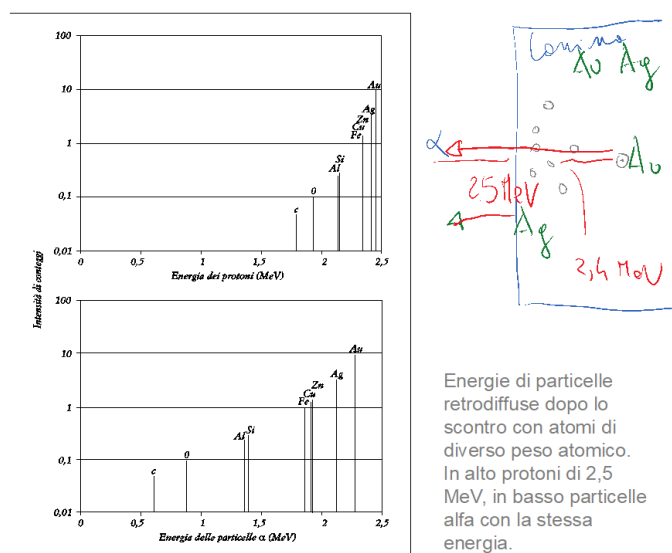


Figura 3.16 spettri ottenuti in esperimenti RBS con particelle alfa e protoni su uno stesso campione composto

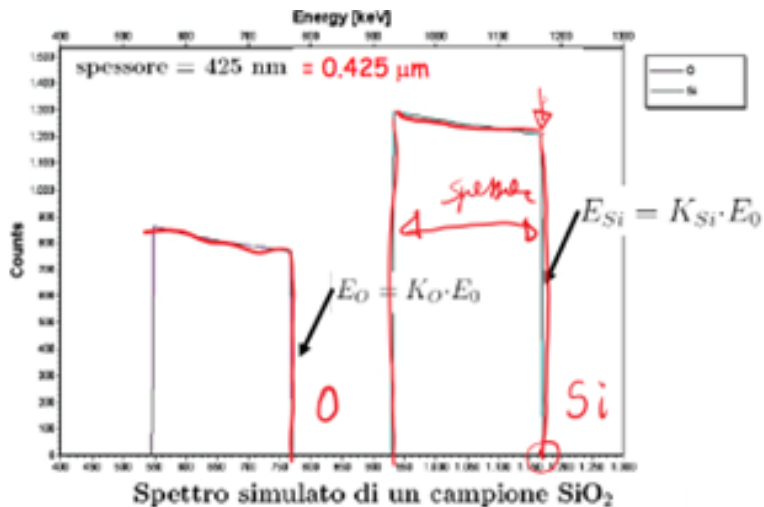


Figura 3.17 simulazione di uno spettro relativo a un campione di ossido di silicio SiO_2 , in cui risultano evidenti la zona estesa per l'ossigeno (più leggero, a sinistra) e quella per il silicio (più pesante, a destra)

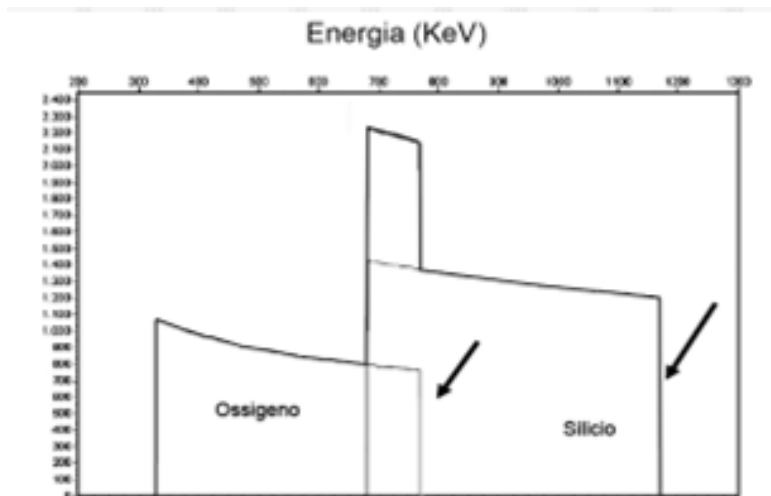


Figura 3.18 schematizzazione di uno spettro relativo a un campione di ossido di silicio SiO_2 , la zona per l'ossigeno si sovrappone a quella del silicio (più pesante, a destra)

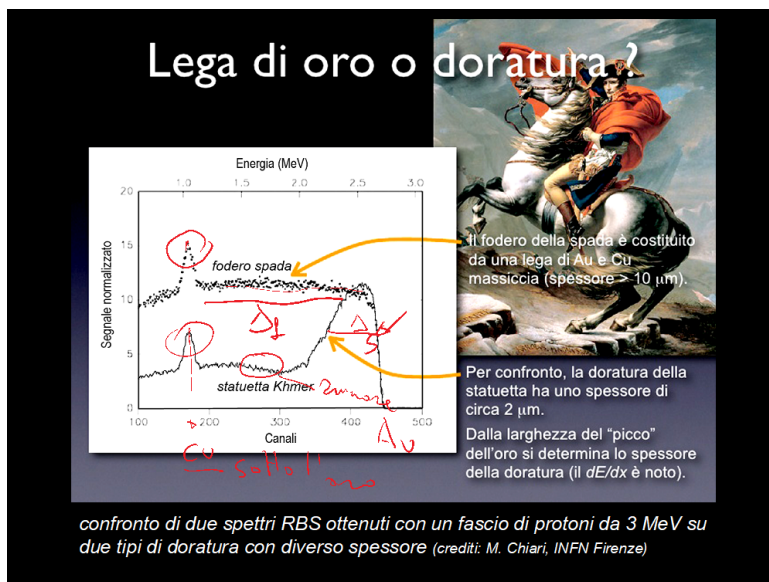


Figura 3.19 studio della campitura d'oro del fodero della spada di Napoleone in un dipinto ottocentesco

in un dipinto tedesco del XIX secolo raffigurante un Cristo portacroce (Figg. 3.19 , 3.20).

3.4.10 III lezione, modulo II: Tecniche di FN per misure di radioattività ambientale e di particolato atmosferico con acceleratore

La Prof.ssa Roberta Vecchi, del dipartimento di fisica dell'Università degli Studi di Milano, dedica la prima parte della lezione a un richiamo sommario dei rudimenti di FN (stabilità, isotopia, decadimenti nucleari e legge del decadimento radioattivo, ...). Vengono poi esposte succintamente alcune nozioni di radioattività e di radioprotezione (attività di una sorgente, unità di misura dell'attività, distribuzione mondiale dell'esposizione alle radiazioni, serie naturali, ...), soffermando l'attenzione sull'emanazione del radon dalle rocce e la successiva esalazione in atmosfera, fenomeno che è di particolare interesse ambientale dato che i prodotti di decadimento del radon si legano al particolato atmosferico.

Quando si passa alla descrizione del particolato, si evidenzia che l'inquinamento indotto dalla sua presenza in atmosfera dipende da:

- emissione delle sorgenti
- diluizione in atmosfera
- permanenza in atmosfera

quest'ultimo aspetto è di particolare importanza ed è determinato dall'attività dello strato di rimescolamento (planetary boundary layer, PBL), che varia da circa 100

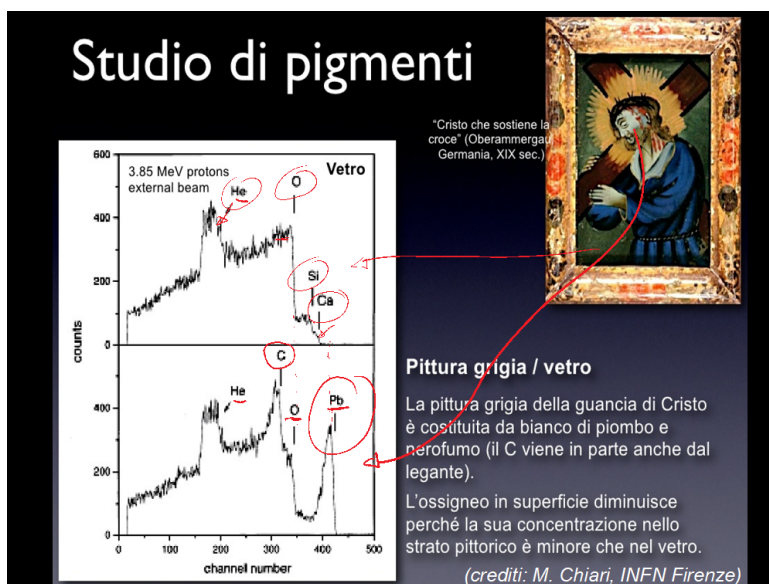


Figura 3.20 studio di pigmenti tramite spettro RBS per un dipinto ottocentesco

m dal suolo a circa 2-3 km. Una delle peculiarità della pianura padana, presa ad esempio perché la sua particolare configurazione morfologica la rende interessante a livello di studio, è quella di avere un'emissione di inquinanti pressoché costante e un'alta permanenza. Dato che il fenomeno dell'emissione di radon e quindi anche dei suoi prodotti di decadimento subisce una legge analoga, una misura dei prodotti del radon in atmosfera fornisce una misura della presenza del particolato. (Fig. 3.21)

La seconda parte della lezione è dedicata alla Ion Beam Analysis (IBA), che permette un'analisi del particolato PM 10 e PM 2,5 raccolto su filtri, attraverso l'interazione di particelle accelerate con il particolato preso come bersaglio. Le analisi condotte dal dipartimento di fisica dell'Università degli Studi di Milano con protoni, gamma, ioni leggeri sono svolte ai laboratori LABEC di Firenze dove alcune linee di ricerca sono dedicate allo scopo. (Fig. 3.22)

Attraverso analisi articolate, che vengono descritte dettagliatamente, è possibile riconoscere la presenza del carbonio nel particolato e ricondurlo al carbonio elementare (EC) prodotto solo in processi di combustione primaria (per esempio da motori Diesel o da biomasse) o a quello organico (OC) che deriva da sorgenti naturali o processi di combustione primaria o secondaria (Fig. 3.23).

Un'analisi complessa dei prodotti contenenti carbonio 14, per la quale è necessaria una facility di spettrometria di massa con acceleratore, permette di caratterizzare i contributi delle sorgenti. Viene infine illustrato il caso della pianura padana (Fig. 3.24).

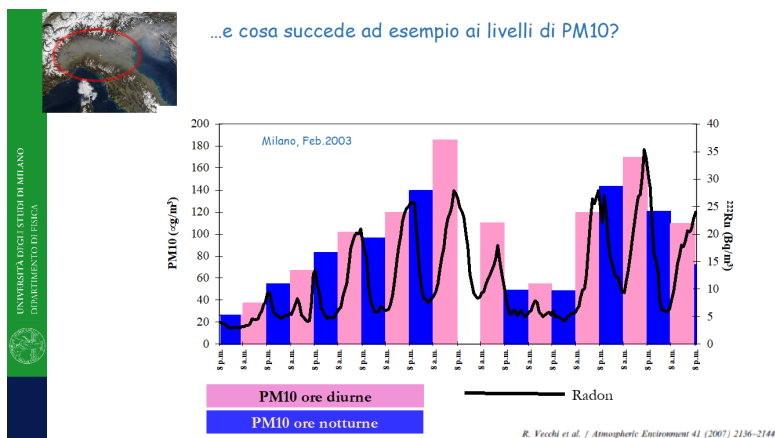


Figura 3.21 diapositiva della presentazione raffigurante l'emissione di radon (curva nera) in pianura padana raccolta in una decina di giorni di febbraio 2003 e istogrammi della variazione di PM10 nello stesso intervallo temporale (in rosa la variazione diurna, in blu quella notturna)

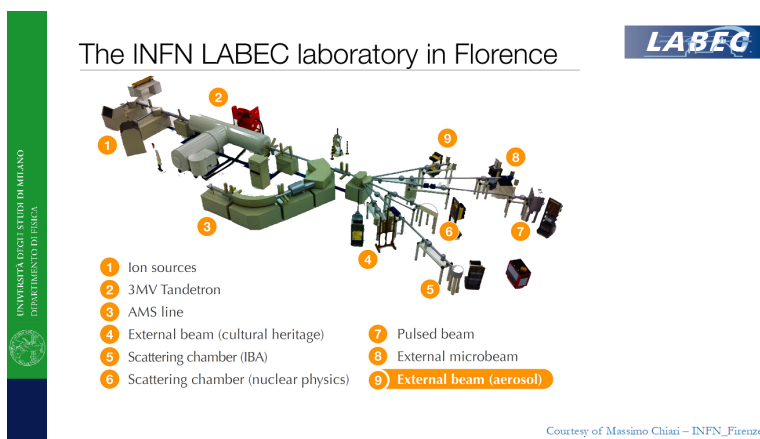


Figura 3.22 linee di ricerca attive presso il laboratorio INFN LABEC di Firenze

...se si effettuano misure di radiocarbonio separatamente sulle frazioni di carbonio elementare (EC) e carbonio organico (OC) si possono ottenere quantificazioni robuste sui contributi delle sorgenti

EC : emesso solo da processi di combustione, origine solo primaria

OC: emesso sia da processi di combustione sia da sorgenti naturali, origine sia primaria sia secondaria

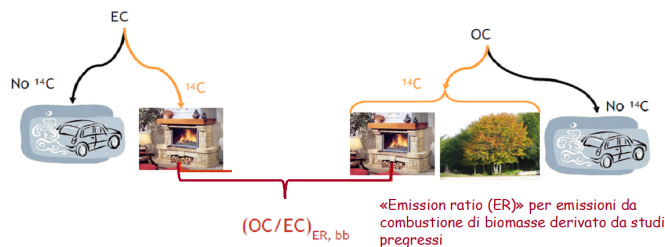
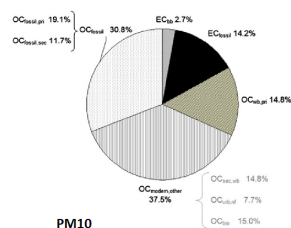


Figura 3.23 diapositiva con la schematizzazione delle sorgenti di carbonio

Esempi di risultati per campioni invernali di PM raccolti in Pianura Padana



Radiocarbon analysis on organic and elemental carbon in aerosol samples and source apportionment at an urban site in Northern Italy



In fossil fuel combustion still a major contributor to atmospheric aerosol carbonaceous fractions in the Po Valley? Results from a ¹⁴C-based source apportionment

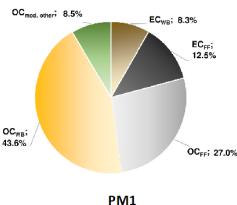


Figura 3.24 nei grafici è illustrato il contributo delle diversi sorgenti di carbonio

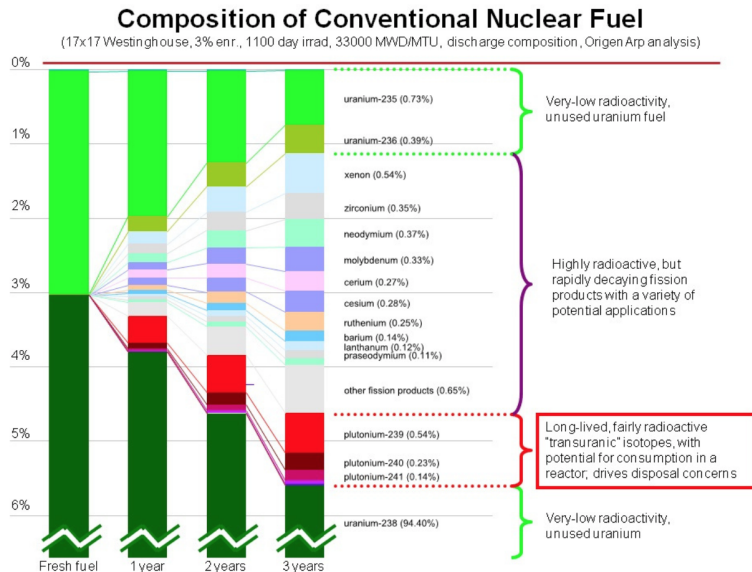
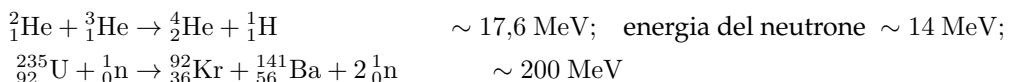


Figura 3.25 composizione del combustibile di un reattore nucleare

3.4.11 IV lezione, modulo II: Reattori nucleari

Dopo una serie di interventi condotti da relatori provenienti dal dipartimento di fisica dell'Università degli Studi di Milano, questo seminario, così come il successivo è lasciato a un professionista della filiera aziendale che in Italia si occupa di nucleare nel senso più ampio (produzione di energia, ricerca, trattamento dei rifiuti, ...). In questo caso particolare, può essere utile ricordare che Ivan Lonati, giovane ingegnere nucleare, si è laureato al Politecnico di Milano, ha avuto una sua prima ampia esperienza professionale nel settore dell'Oil Gas, per poi approdare ad aziende specializzate nella progettazione e prototipazione di Micro Modular Reactor (MMR).

Nella prima parte del suo intervento l'ing. Lonati espone alcuni esempi di reazione nucleare per la produzione di energia, in particolare da fissione e da fusione, evidenziando la resa energetica:



Vengono poi esposti i principi di funzionamento di un reattore a fissione nucleare e le sue caratteristiche tecniche (combustibile reperimento, composizione, arricchimento; moderatore; fluido di raffreddamento) (Fig. 3.25).

Vengono esposti particolari espedienti in uso in alcuni reattori (es: reattori che utilizzano combustibile da riprocessamento) e alcune problematiche presenti (es: invecchiamento del cladding), così come il confronto con la produzione di energia da altre fonti. Vengono poi descritti i principali reattori di potenza per la produzione di energia, seguendo la diapositiva delle presentazioni in Fig. 3.26:

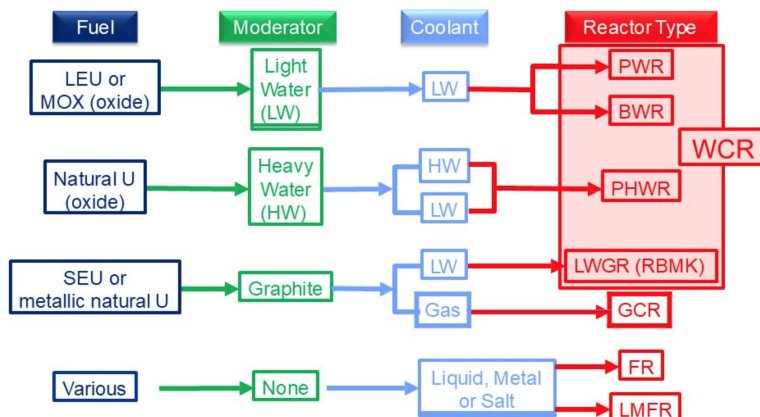


Figura 3.26 tipologie di reattori nucleari suddivise per caratteristiche tecniche

A questa descrizione viene fatta seguire la principale suddivisione in generazioni per tipologie di sistemi di sicurezza (Fig. 3.27).

La lezione continua con i dettagli di alcuni reattori tuttora in uso: BWR, PWR, EPR, PWR-AP1000, per poi passare ad analizzare i reattori più avanzati (LFR), di cui si sottolineano i vantaggi e gli svantaggi, riportati in Tab. 3.2:

vantaggi	svantaggi
- Chiusura del ciclo combustibile - Sicurezza dovuta al piombo che evita esplosioni di vapore - Elevata temperatura di lavoro - Funzionamento a pressione atmosferica	- Rischio di proliferazione - Difficoltà manutentive del piombo - Scarsa esperienza operativa col piombo (manutenzione, corrosione, decommissioning) - Temperatura di solidificazione del piombo elevata

Tabella 3.2 Vantaggi e svantaggi dei reattori LFR

Sono quindi trattati i principi di funzionamento dei reattori modulari (SMR), di cui si evidenziano, come per gli LFR, vantaggi e svantaggi (Tab. 3.3):

vantaggi	svantaggi
- Flessibilità e maggior sicurezza - Economia di numero e modularità - Costi di costruzione e dati economici migliori - Applicazioni diverse dalla produzione di energia elettrica (calore, idrogeno o vapore)	- Costi di produzione maggiori - Perdita dell'economia di scala (costi fissi costanti) - Rischio di proliferazione in caso di diffusione - Controlli più numerosi dovuti al maggior numero di reattori

Tabella 3.3 Vantaggi e svantaggi dei reattori SMR

L'ultima parte della lezione è dedicata ai Micro Modular Reactor, di cui l'ing. Lonati si è personalmente occupato nella sua recente carriera professionale per una

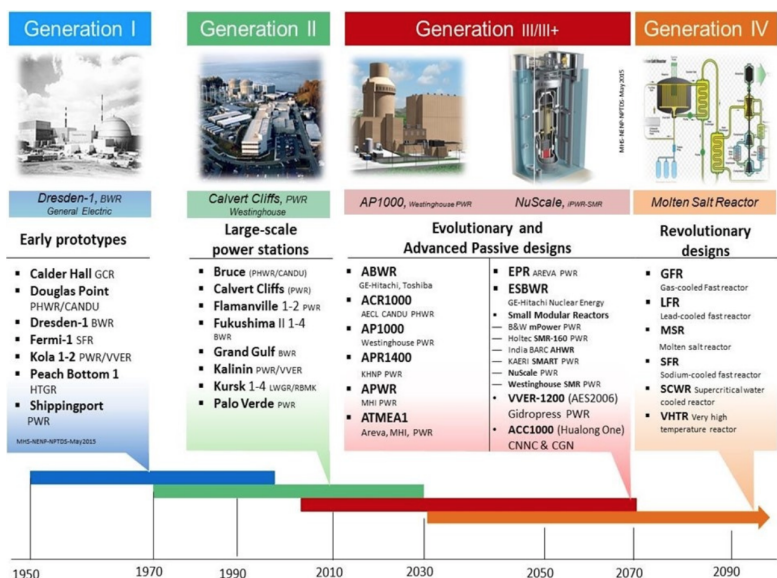


Figura 3.27 tipologie di reattori nucleari suddivisi per generazioni

multinazionale che ha progettato questo tipo di reattori, il cui funzionamento è sostanzialmente diverso dai precedenti e basati sulla tecnologia del TRISO (Fig. 3.28).

Anche di questi reattori vengono evidenziati vantaggi e svantaggi (Tab. 3.4).

A titolo esemplificativo della versatilità dei reattori MMR sono presentate alcune applicazioni navali e aerospaziali. Altri argomenti previsti dal relatore (progetti in corso per la produzione di energia da fusione nucleare, confronto tra la produzione di energia da fissione e da fusione, incidenti nucleari storici) non vengono sviluppati anche a causa dell'elevato numero di interventi, che hanno portato a un'ampia discussione su alcuni aspetti delle tecniche di produzione di energia da fissione. Il relatore lascia a disposizione il materiale realizzato per la lezione, in



Figura 3.28 styling di una sezione di un reattore MMR

vantaggi	svantaggi
- Reattore trasportabile - Bassa potenza elettrica - Elevata automazione - Costi ridotti per la produzione in serie - Sicurezza intrinseca	- Bassa potenza - Costi operativi elevati - Bassa densità di potenza

Tabella 3.4 Vantaggi e svantaggi dei reattori MMR



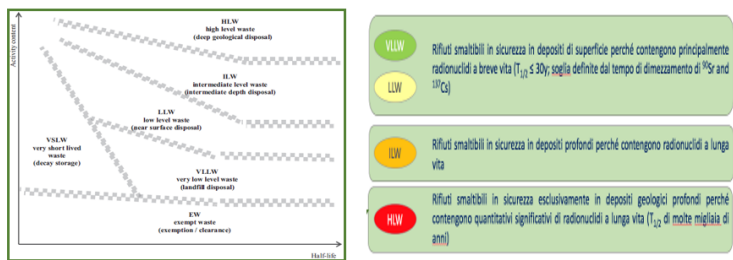
Figura 3.29 riferimenti bibliografici e sitografici consigliati

modo che i partecipanti al corso possano consultarlo e rivolgersi per chiarimenti eventualmente al relatore che si rende disponibile. Al termine della lezione viene consigliato un testo per la comprensione del funzionamento di un reattore e una sitografia (Fig. 3.29).

3.4.12 V lezione, modulo II: Trattamento dei rifiuti nucleari, Deposito nazionale e parco tecnologico

Una particolare attenzione è stata posta dai partecipanti alla lezione dell'Ing. Annafrancesca Mariani, figura apicale dell'azienda statale SOGIN, gestita dal Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, deputata allo smantellamento degli impianti nucleari italiani e alla gestione dei rifiuti radioattivi.

All'inizio del suo intervento l'Ing. Mariani descrive le caratteristiche di un impianto nucleare, esponendo l'usuale tripartizione attorno alla sorgente in funzione della dose efficace annua: zona non controllata, zona sorvegliata e zona controllata. A questo fa seguire una serie di norme di comportamento da tenere nelle diverse zone e una rapida sintesi sulla dosimetria e gli strumenti di misura (dosimetri personali e whole bodycounter). La parte centrale della lezione è poi dedicata al trattamento dei rifiuti radioattivi. Prima di definire rigorosamente rifiuti radioattivi, vengono chiariti gli aspetti generali della gestione dei materiali (esenti, con-



classificazione dei rifiuti radioattivi in base alle proprietà radiologiche: attività dei rifiuti in funzione della vita media

classificazione dei rifiuti radioattivi in base alla soluzione di smaltimento

Figura 3.30 Classificazione rifiuti

Categoria	Condizioni e/o concentrazioni di attività	Destinazione finale
VSLW	$T_{1/2} < 100$ giorni Rilasciabili entro 5 anni	Stoccaggio temporaneo (art.59 D.Lgs n. 101/2020) e smaltimento nel rispetto delle disposizioni del D.Lgs. n.152/2006
VLLW	≤ 100 Bq/g (alfa ≤ 10 Bq/g) Rilasciabili entro 10 anni	Stoccaggio temporaneo (art.59 D.Lgs n. 101/2020) e smaltimento nel rispetto delle disposizioni del D.Lgs. n.152/2006
LLW	- Radionuclidi a vita breve ≤ 5 MBq/g - Ni59-Ni63 ≤ 40 kBq/g - Radionuclidi a lunga vita ≤ 400 Bq/g	Impianti di smaltimento superficiali, o a piccola profondità, con barriere ingegneristiche (Deposito nazionale D.Lgs n. 31/2010)
ILW	- Vita breve > 5 MBq/g - Ni59-Ni63 > 40 kBq/g - Vita lunga > 400 Bq/g - No produzione calore	Impianto di immagazzinamento temporaneo del Deposito nazionale (D.Lgs n. 31/2010) in attesa di smaltimento in formazione geologica
HLW	Produzione di calore e/o elevate concentrazioni di radionuclidi a lunga vita	Impianto di immagazzinamento temporaneo del Deposito nazionale (D.Lgs n. 31/2010) in attesa di smaltimento in formazione geologica

Figura 3.31 classificazione dei rifiuti radioattivi, situazione italiana sancita dal decreto del 7 agosto 2015

venzionali, rilasciabili, non rilasciabili) e la normativa vigente (D.Lgs 152/2006 per rifiuti convenzionali, D.Lgs 101/2020 per rifiuti radioattivi). Vengono poi discusse le classificazioni dei rifiuti radioattivi sulla base delle proprietà radiologiche (IAEA Safety Guide No. GSG-1 "Classification of Radioactive Waste", 2009) e secondo la soluzione di smaltimento (Fig. 3.30).

Viene poi illustrata la legislazione vigente, con particolare riferimento al quadro italiano⁷ (Fig. 3.31).

La parte successiva della lezione verte sulla gestione di un sito nucleare, a partire dalla ricostruzione della storia del sito stesso, della mappatura radiologica dell'impianto, dalla classificazione dei materiali fino al loro trattamento. Vengono presi ad esempio i trattamenti di 67 elementi di combustibile, di cui 66 provenienti dalla centrale di Garigliano e uno dalla centrale di Trino Vercellese, e di 68 elementi

⁷Decreto del 7 agosto del 2015, Ministero dell'Ambiente, della Tutela del Territorio e del Mare.

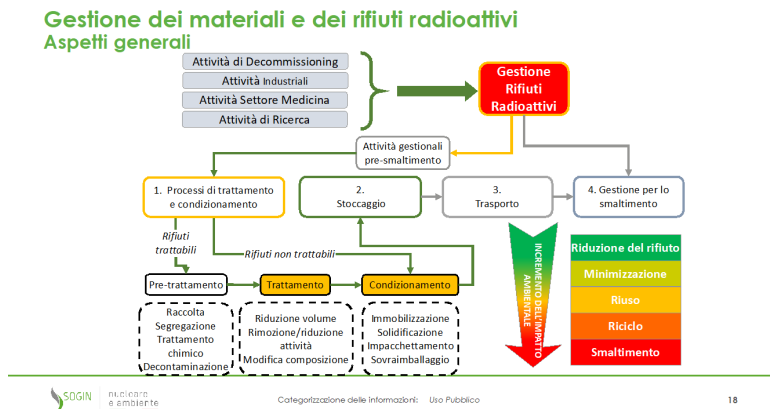


Figura 3.32 sinossi della gestione e del trattamento dei rifiuti radioattivi

della centrale americana di Trisauria. Per ciò che riguarda altri rifiuti, vengono citati quelli inviati nel Regno Unito e in Francia o quelli stoccati in Italia in depositi superficiali.

L'ultima parte della lezione entra specificamente nel trattamento dei rifiuti (Fig. 3.32): vengono spiegati dettagliatamente i metodi di riduzione del volume, di riduzione della radioattività, dei processi di condizionamento (encapsulation, embedding, solidificazione, vetrificazione), le caratteristiche dei contenitori per i rifiuti radioattivi e dei depositi, di cui viene illustrata la localizzazione sul territorio nazionale.

Dato che una delle missioni di SOGIN è stata di progettare il Deposito Nazionale dei rifiuti radioattivi e Parco Tecnologico (DNPT), a quest'ultimo argomento viene dedicato un ampio e ultimo spazio della lezione. Vengono così esposte le caratteristiche del DNPT, la legislazione in merito (D.Lgs. 31/2010 e D.L. 181/2023), i criteri per la localizzazione (criteri di esclusione e criteri di approfondimento), la procedura eseguita per l'individuazione delle aree potenzialmente idonee (Piemonte, 8 aree; Toscana, 2 aree; Lazio, 22 aree; Basilicata e Puglia, 17 aree; Sicilia, 4 aree; Sardegna, 14 aree), non escluse da nessun criterio (Fig. 3.33).

Le fasi relative allo storico del DNPT (rapporto con la cittadinanza, consultazione pubblica), l'iter di localizzazione e di realizzazione dell'opera, dalla decretazione all'autorizzazione e infine all'entrata in esercizio prevista per il 2039 vengono illustrate nella parte finale della lezione (Fig. 3.34), sottolineando che il DNPT resterà in esercizio per 40 anni, che richiederà un tempo di 10 anni per la sua chiusura e 300 anni per la fase successiva di post-chiusura.

3.4.13 Esiti del questionario di gradimento

Anche al termine del modulo II è stato rivolto ai docenti partecipanti un questionario di gradimento analogo al precedente [App. 11]. Hanno risposto al questionario 14 docenti (77% dei partecipanti). Gli esiti sono riportati in Tab. 3.5 Segue un breve commento.



Figura 3.33 in verde fluo le aree potenzialmente idonee per il DNPT

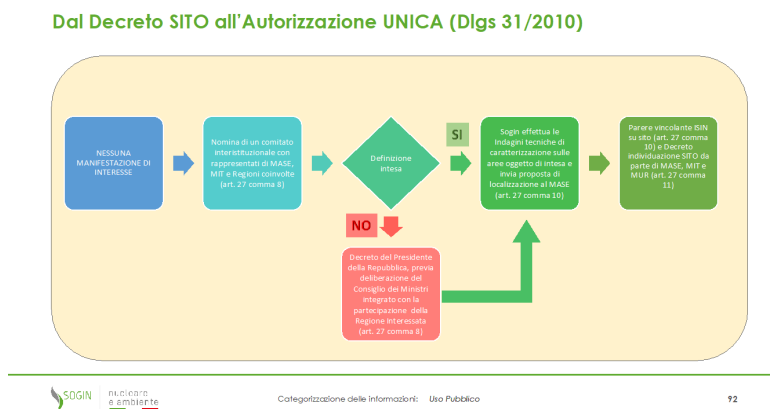


Figura 3.34 fasi finali del DNPT

Tabella 3.5: Risultati del sondaggio sul corso di formazione (II modulo)

Domanda	Esito
Età	4 oltre i 55 anni 5 tra 46 e 55 anni 3 tra 36 e 45 anni 1 tra 25 e 35 anni
Laurea	7 matematica 4 fisica 2 altro
Numero N di anni di insegnamento nei licei (triennio)	3 $N < 6$ 4 $5 < N < 11$ 1 $10 < N < 16$ 4 $N > 15$
Numero N di anni di insegnamento nell'ultimo anno	4 $N < 3$ 3 $2 < N < 8$ 2 $7 < N < 13$ 4 $N > 12$
Numero N di anni di insegnamento di FN	7 $N < 3$ 3 $2 < N < 8$ 2 $7 < N < 13$ 1 $N > 12$
Gli argomenti trattati nel corso sono stati interessanti?	Valutazione media: 9,85 Deviazione standard: 0,38
Gli argomenti trattati nel corso hanno risposto alle sue aspettative?	Valutazione media: 9,38 Deviazione standard: 0,87
Gli argomenti trattati nel corso erano accessibili?	Valutazione media: 8,92 Deviazione standard: 1,12
I metodi utilizzati durante le lezioni erano adeguati ai contenuti sviluppati?	Valutazione media: 8,92 Deviazione standard: 1,04
I metodi utilizzati durante il corso erano favorevoli per il coinvolgimento dei partecipanti?	Valutazione media: 8,85

(continua nella pagina successiva)

(continua dalla pagina precedente)

Domanda	Esito
I materiali utilizzati e condivisi con i partecipanti sono stati utili al processo di formazione?	Deviazione standard: 1,07 Valutazione media: 9,54 Deviazione standard: 0,78
Il numero degli interventi è stato sufficiente a sviluppare le tematiche del corso?	13 su 13 sì
La durata degli interventi era adeguata?	13 su 13 sì
Come reputa la modalità di svolgimento mista del corso "in presenza e da remoto"?	Valutazione media: 9,00 Deviazione standard: 1,22
Le informazioni relative all'organizzazione sono state tempestive?	13 su 13 sì
Il calendario degli incontri è stato adeguato?	13 su 13 sì
La struttura tecnica dell'ente formatore si è rivelata adeguata?	13 su 13 sì
In che misura i docenti erano preparati e competenti?	Valutazione media: 9,92 Deviazione standard: 0,28
I docenti hanno comunicato in maniera chiara e comprensibile?	Valutazione media: 9,31 Deviazione standard: 0,95
I docenti hanno fornito spunti di riflessione e approfondimento?	Valutazione media: 9,62 Deviazione standard: 0,65
In che misura il corso è stato utile per la sua formazione personale?	Valutazione media: 9,16 Deviazione standard: 0,99
In che misura il corso è stato utile per l'effettiva possibilità di sviluppare argomenti di fisica nucleare nell'attività didattica?	Valutazione media: 8,01 Deviazione standard: 1,12
In che misura il corso ha fornito degli argomenti trasferibili nell'attività didattica?	Valutazione media: 8,23

(continua nella pagina successiva)

(continua dalla pagina precedente)

Domanda	Esito
Nell'eventualità che ci sia un prosieguo del corso, in che misura vorrebbe che venissero sviluppate tematiche relative alla misura di radioprotezione?	Deviazione standard: 0,73 Valutazione media: 7,85
Nell'eventualità che ci sia un prosieguo del corso, in che misura vorrebbe che venissero effettuate visite a reattori?	Deviazione standard: 2,03 Valutazione media: 9,08
O visite a enti di ricerca?	Deviazione standard: 0,86 Valutazione media: 9,00
O visite a depositi nucleari?	Deviazione standard: 1,68 Valutazione media: 7,62
O una summer school?	Deviazione standard: 2,84 Valutazione media: 8,00
O visite e attività in laboratori universitari?	Deviazione standard: 2,08 Valutazione media: 8,62
O una lezione universitaria?	Deviazione standard: 1,76 Valutazione media: 7,54
In merito alla sezione delle applicazioni della fisica nucleare, i libri di testo sono completi?	Deviazione standard: 2,33 Valutazione media: 5,31
In merito alla sezione delle applicazioni della fisica nucleare, i libri di testo sono aggiornati?	Deviazione standard: 1,55 Valutazione media: 5,38
	Deviazione standard: 1,33

(continua nella pagina successiva)

(continua dalla pagina precedente)

Domanda	Esito
In merito alla sezione delle applicazioni della fisica nucleare in ambito energetico (fissione, fusione, trattamento dei rifiuti, deposito nazionale), i libri di testo presentano i contenuti in forma corretta?	Valutazione media: 6,15 Deviazione standard: 1,41

Rispetto al questionario di gradimento svolto a seguito del I modulo, in questa seconda ricognizione la quota dei docenti che ha risposto alle domande poste è stata nettamente superiore e pari al 77% ed è mediamente più giovane, anche se il 60% del campione ha un'età superiore ai 45 anni. La maggioranza (54%) dei docenti è laureata in matematica, anche se in misura minore rispetto al modulo I, dove la componente degli iscritti laureati in matematica era del 77%. I laureati in fisica sono presenti in quota minoritaria (15%). Anche in questo caso i docenti sono caratterizzati da grande esperienza didattica nelle classi terminali del liceo scientifico, anche se non vi hanno insegnato spesso FN, un po' per scelta e un po' perché per qualche docente raramente si è presentata l'occasione di insegnare in classi quinte. Il gradimento per il corso, per i docenti, per gli aspetti organizzativi è superiore a quello già elevato riscontrato per il modulo I, e si colloca nella fascia dell'eccellenza. Anche le ricadute sul proprio profilo professionale e sull'eventuale ricaduta didattica è superiore a quello già riscontrato nel modulo I. Una maggior insoddisfazione è invece riservata ai manuali in adozione, che risultano incompleti, poco aggiornati, se si eccettua la sezione relativa alle questioni energetiche che vengono giudicate complessivamente presentate in modo accettabile.

3.4.14 Modulo III , il workshop

Dopo un'ampia interlocuzione con i rappresentanti dell'istituto in cui si sono svolti i moduli I e II, visto il successo riscontrato per entrambi, si è stabilito di completare il corso di formazione con una delle opportunità che la formula del PNRR prevede, ossia quella del workshop. Si è trattato di dare una curvatura sostanzialmente diversa al corso, sia per quanto riguarda gli obiettivi, sia per le modalità di attuazione, sia per l'uditorio a cui si rivolge. I tre aspetti erano reciprocamente condizionati, ma si è deciso di definire preventivamente le finalità di questo ultimo segmento del corso e di declinare gli altri due di conseguenza. Per quanto riguarda le finalità del corso, considerato il contesto della scuola secondaria di secondo grado e le sue finalità educative, si è cercato di individuare un quadro di obiettivi in cui la FN potesse giocare un ruolo formativo non per il solo aspetto scientifico, ma anche per quello più ampiamente culturale e transdisciplinare. Per questo si è deciso di focalizzare il workshop su una delle applicazioni storiche più note e più misconosciute della FN, ossia la progettazione della bomba atomica e le conseguenze generate dalla conclusione del secondo conflitto mondiale. Più nel dettaglio, si sono considerati come contenuti fortemente significativi i seguenti:

- Principi fisici delle armi nucleari;

- Storia della bomba atomica: il progetto tedesco “Uranmaschine” e il progetto statunitense “Manhattan”;
- L’esito della II Guerra mondiale e le ricadute in campo artistico, letterario, filosofico;
- Le strategie militari nell’era nucleare e l’avvio dei trattati per il disarmo;
- Le origini storico-filosofiche del pacifismo moderno.

Un orizzonte così delineato poteva essere interessante certamente per i docenti a cui il corso era stato finora rivolto, ma anche per quelli di altre discipline e, non da ultimi, anche per gli studenti delle classi terminali, considerando che l’Esame di stato al termine del ciclo di studi prevede un colloquio in cui il candidato deve dimostrare di padroneggiare un argomento trasversale alle discipline. Si è così definita ulteriormente la cornice della III parte del corso, dal titolo: Laboratorio di formazione “La fisica nucleare in classe”, destinato ai docenti e agli studenti dell’istituto. Questi si sono iscritti per gruppi di interesse individuati nelle classi quinte e in una classe quarta.

Lo svolgimento degli incontri si è quindi caratterizzato dall’unitarietà tematica declinata in una ampia varietà di contesti, da una platea di partecipanti mista, formata da docenti di diverse aree (quattro docenti di matematica, tre di fisica, due di storia e filosofia, uno di informatica) e studenti e dalla modalità del workshop, per cui come in un vero e proprio workshop accademico i relatori avrebbero presentato contenuti in modo frontale, alternandoli a sezioni dialogate con gli studenti che sarebbero intervenuti con loro contributi personali. Per realizzare questo scopo, grazie alla supervisione del tutor d’aula, i 16 studenti partecipanti sono stati divisi in gruppi omogenei prima dell’inizio del workshop e a ogni gruppo, volta per volta, sarebbero stati assegnate tematiche da approfondire nell’incontro successivo, seguendo modalità scelte dai gruppi stessi, poi discusse con i relatori e i docenti partecipanti. Ciò ha permesso un’evoluzione dinamica dell’esperienza formativa, non sempre prevedibile in tutti gli aspetti, in cui ha prevalso sulla scelta del completo rispetto della programmazione la volontà di garantire un’effettiva didattica inclusiva per gli studenti che al tempo stesso non fosse a detrimento della formazione dei docenti.

Di seguito, come già per i moduli I e II, vengono riportate le sintesi degli incontri, che si sono seguiti (v. par. 3.3.5.) in questo ordine e con questi relatori:

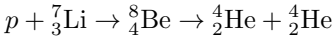
- I lezione (Dott. Paolo Teruzzi): Richiami di FN e tappe fondamentali della storia della bomba atomica (I parte);
- II lezione (Prof. Nicola Ludwig): Esplosioni di fantasia. Armi nucleari: effetti biologici delle radiazioni fra scienza e immaginazione artistica;
- III lezione (Prof. Nicola Ludwig): L’era atomica: le influenze sulla produzione artistico-culturale;
- IV lezione (Dott. Paolo Teruzzi): Tappe fondamentali della storia della bomba atomica (II parte);
- V lezione (Dott. Paolo Teruzzi): Trattati per il disarmo e origini storiche del pacifismo; 29 aprile.

lezione gli studenti erano già stati contattati dal relatore, che aveva assegnato i seguenti compiti (Tab. 3.6):

gruppo	consegna
1	L'intuizione di Léo Szilárd del 1932
2	La diatriba a distanza tra E. Fermi e I. Noddack
3	L'interpretazione della fissione (Hahn, Strassmann, Meitner)
4	Ritratti di alcuni protagonisti della fisica della prima metà del '900

Tabella 3.6 Suddivisione in gruppi e relative consegne

Un esponente del primo gruppo tratteggia un ritratto del fisico ungherese Léo Szilárd e ne chiarisce il ruolo di “veggente”. Viene ricordata la fissione del litio ottenuta da John Cockfort e Ernest Walton il 14 aprile 1932, in cui i protoni con energia tra i 100 e i 500 keV generavano nuclei di berillio 8 una volta che venivano sparati contro un bersaglio di litio 7 secondo la reazione:



Viene quindi fatto notare che il fenomeno aveva suscitato scalpore negli ambienti non solo scientifici¹¹ e di come questa scoperta era stata fondamentale per l'intuizione di Szilárd, sopravvenuta mentre leggeva sul *Times* un articolo di Ritheford dedicato all'argomento. Viene anche ricordato che Szilárd ipotizzò sotto il profilo teorico la realizzazione di un ordigno basato su fenomeni di scissione nucleare, se fosse stato possibile utilizzare un altro elemento diverso dal litio capace in un processo analogo di dare origine a una reazione a catena. Nonostante in quegli anni la possibilità di realizzare tale progetto era ridotta a poco, Szilárd si mise alla ricerca di elementi fissili e brevettò comunque la reazione nucleare a catena¹².

Viene poi chiamato il gruppo 2 a esporre brevemente un profilo scientifico di Ida Noddack e i motivi che l'hanno resa protagonista della storia della FN. Viene quindi ricordato che Ida Tacke era una chimica tedesca che col marito Walter Noddack contribuì alla scoperta degli elementi pesanti. I due scienziati identificarono l'elemento con numero atomico 75, che fu chiamato renio per via delle origini renane di Ida Noddack. Con gli stessi metodi individuarono anche il masurio (Z=43), che non riuscirono a separare per il suo breve tempo di decadimento. Solo con l'uso del ciclotrone da parte del fisico italiano Segrè il masurio, rinominato tecnezio, fu rivelato nel 1937. Il contributo di Ida Noddack fu fondamentale perché fu il primo a mettere in discussione l'interpretazione che Fermi diede alle proprie scoperte del 1934 [132]. Fermi credette infatti di aver dato vita, con le reazioni nucleari indotte da neutroni termici sull'uranio 235, a nuclei transuranici che aveva chiamato ausonio ed esperio e che in seguito non si rivelarono come gli effettivi prodotti della reazione scoperta da Fermi. Il primato di aver riconosciuto l'errore di Fermi fu comunque di Ida Noddack, che viene ricordato, fu osteggiata dall'intera comunità scientifica del tempo. Un altro elemento biografico particolarmente significativo e che viene sottolineato è relativo alla sua posizione lavorativa di “assistente non

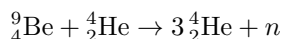
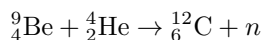
¹¹Il 1° maggio 1932, sulla rivista popolare *Reynold's Illustrated News* fu pubblicato un articolo in cui si sosteneva che “L'energia illimitata così rilasciata può trasformare la civiltà” e il giorno successivo sul *Sunday Express* e sul *Daily Mirror* titolarono rispettivamente: “Il mondo è ancora salvo” e “Basta che non esploda”.

¹²Brevetto UK n° 630726 (anno 1935).

pagata” del marito, in virtù delle leggi tedesche promulgate dopo la crisi del '29 che obbligavano le donne al ruolo di casalinghe e per loro era negato qualsiasi tipo di attività retribuita. A questo si aggiunge che fu candidata per tre volte al conferimento del Premio Nobel, che non ha mai ricevuto.

Il relatore torna quindi a gestire la lezione in modo frontale ed espone i risultati di Fermi del 1934, richiamando l'articolo apparso nello stesso anno sulla rivista *Nature*, in cui per la prima volta vengono esposti i risultati e gli accorgimenti sperimentali per la realizzazione di una reazione nucleare con neutroni termici e uranio 235, che gli valsero il premio Nobel [63, 1]. Diversi sono gli aspetti che vengono messi in luce, ma viene data rilevanza soprattutto ai seguenti:

- La sorgente di neutroni sfruttava il berillio, che a seguito dell'assorbimento di particelle alfa emesse dal radon, estratto a sua volta dal radio, emetteva neutroni secondo le reazioni:



- - L'amplificazione del fenomeno per effetto della moderazione dei neutroni fu colto da Fermi ripetendo gli esperimenti ponendo le sorgenti in prossimità di diverse strutture del laboratorio e accorgendosi che i manufatti di legno, che evidentemente rallentavano i neutroni, favorivano le reazioni nucleari.
- Con un contatore Geiger-Müller Fermi misurò l'assorbimento per ogni elemento, a partire dai più leggeri constatando che il fluoro sarebbe stato il primo elemento della tavola capace di assorbire neutroni. Le misure furono perciò sistematiche e compiute con estremo rigore [86].
- Per la prima volta venne compreso il ruolo che giocava la geometria dell'apparato sperimentale per la riuscita dell'esperimento. Facendo uso di cilindri cavi costituiti dal materiale da analizzare, in cui veniva posta la sorgente di neutroni, Fermi poteva sfruttare l'intero angolo solido per l'irraggiamento del cilindro. Facendo penetrare la sorgente nel cilindretto, Fermi si rese conto che la posizione reciproca della sorgente e del manufatto alterava la misura dei prodotti di reazione.

Fermi aveva colto i due punti chiave attorno a cui ruotava l'efficienza del processo di reazione: la moderazione dei neutroni e la geometria degli elementi. Il relatore sottolinea che su questi due aspetti si sarebbe giocata buona parte dell'intera partita tra Germani e Stati Uniti d'America per lo sviluppo di una bomba atomica.

L'incontro prosegue con l'intervento del gruppo 3 che introduce la figura di Lise Meitner, grazie alla quale è dovuta la corretta interpretazione del fenomeno studiato da Fermi. Con quattro anni di ritardo dalla scoperta del 1934, Lise Meitner infatti spiega l'interazione tra neutroni termici e uranio 235 come una fissione che produce non nuclei transuranici, bensì nuclei più leggeri dopo aver attraversato uno stato di nucleo composto compatibile con la descrizione del modello a goccia del nucleo. Il contributo alla spiegazione, che fu da subito apprezzato da Bohr [138], conferma le era stato richiesto dai fisici Hahn e Strassmann, che non avevano ammesso la possibilità teorica della fissione nucleare come spiegazione del

fenomeno [89]. Il relatore ripete il calcolo di Lise Meitner che permette di ottenere una stima dell'energia emessa (*Q-value*) da una fissione nucleare, ipotizzando che sia pari all'energia relativa al difetto di massa presente tra i prodotti e il nucleo di uranio:

$$Q\text{-value} = \Delta mc^2 = [m_{235} - (m_{135} + m_{100})] c^2 = 235 \cdot 8,4 \text{ MeV} - 235 \cdot 7,5 \text{ MeV} = 212 \text{ MeV}$$

Il relatore chiede quindi agli studenti di svolgere un conto alla Fermi per valutare l'effetto di una singola fissione nucleare di uranio 235 su un granello di sabbia, in particolare sullo spostamento verticale del granello. I valori ricavati dagli studenti vengono discussi dopo una decina di minuti, lasciati ai gruppi per discutere al loro interno, per formulare ipotesi, recuperare dati utili alla risoluzione della consegna e calcolare lo spostamento. Gli studenti, che si sono avvalsi dello smartphone per risalire al valore della densità del silicio ($\rho = 2,310^3 \text{ kg m}^{-3}$), ipotizzando un granello di forma sferica di raggio pari a 5 micron, hanno ricavato il valore dello spostamento rapportando l'energia di fissione immessa nel processo con il valore del peso del granello:

$$\Delta h = \frac{E}{mg} = \frac{E}{\rho V g} \approx \frac{212 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{2,3 \cdot 10^3 \cdot \frac{4}{3} \pi (5 \cdot 10^{-5})^3 \cdot 9,8 \text{ N}} \approx 10^{-3} \text{ m}$$

Questo valore dà l'ordine di grandezza dello spostamento verticale di una particella minuscola, ma mossa dall'effetto di una sola fissione. Gli studenti possono quindi apprezzare l'effetto che produrrebbe la scissione anche solo di una singola mole di uranio 235 i cui nuclei fissionano contemporaneamente.

Prima di concludere l'incontro il relatore ricorda il percorso biografico di Lise Meitner, segnato da una condizione analoga a quella di Ida Noddack. Prima del dicembre 1938 Lise Meitner lavorava in Germania. In quanto ebrea, già nel 1933 le era stato ritirato il permesso di insegnamento e le era solo consentito di lavorare come caporeparto al laboratorio di Otto Hahn, il Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie. Ma con l'annessione dell'Austria, Lise Meitner che era austriaca di nascita divenne tedesca e, nonostante si fosse convertita al protestantesimo, non le fu più consentito di restare in Germania per via della sua origine ebraica. Inizialmente rifiutò due proposte di Bohr che l'aveva invitata a lavorare negli U.S.A. e poi in Danimarca, per paura di non poter più rientrare in Germania. In seguito però accettò e fu così che dopo aver attraversato l'Olanda e la Danimarca si rifugiò in Svezia, dove lavorò all'istituto Nobel fino al 1946. Per l'interpretazione del fenomeno della fissione Hahn e Strassmann vinsero il premio Nobel, che fu negato a Lise Meitner. Viene infine ricordato che né Lise Meitner né il nipote Otto Frisch, purché sollecitati dal responsabile scientifico Robert Oppenheimer, non aderirono al progetto Manhattan.

In chiusura della lezione, si introduce il concetto di processo a catena e di come in via teorica sia stato possibile concepire un ordigno bellico basato su una tecnologia nucleare. L'intervento relativo alla pila di Fermi viene rimandato alla lezione successiva, dato che il dialogo in aula sui temi trattati si è esteso all'intera durata dell'incontro.

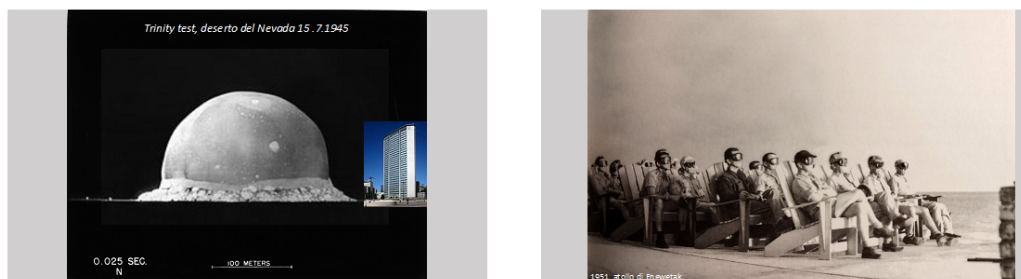


Figura 3.36 a sinistra, Trinity Test; a destra riproduzione grafica della platea presente al test all'atollo di Enewetak (1951)



Figura 3.37 da sinistra a destra, Le tre sfingi di Bikini di Salvador Dalí (1947), Manifesto bum sdi Enrico Baj (1952), disegno di un hibakusha del 6 agosto 1945.

3.4.16 Il lezione, workshop: Esplosioni di fantasia. Armi nucleari: effetti biologici delle radiazioni fra scienza e immaginazione artistica

Questo secondo intervento introduce ampiamente aspetti legati alla storia della bomba atomica, non necessariamente scientifici che abbracciano discipline tra loro anche lontane: storia, storia dell'arte e delle arti figurative, filosofia. Nella prima parte vengono sviluppate ancora tematiche di tipo scientifico e si richiamano concetti di base della FN, si indagano i temi della radioprotezione e, riallacciandosi alla prima lezione del workshop, si spiega per sommi capi il funzionamento delle prime bombe atomiche (a fissione, a cannone, a implosione, a fusione), dei loro effetti immediatamente successivi all'esplosione (sfera di fuoco, nube radioattiva, onda d'urto, descrizione dell'evoluzione del fungo atomico, fall-out), mostrando le immagini del Trinity Test e riproduzioni grafiche di altri test atomici. Già in questa fase alla narrazione si intreccia l'esposizione di immagini di ambito non scientifico che in modi diversi fanno capire come attorno alla FN sia nato, già dai primi anni del '900 un interesse e una cultura che dalla FN ha preso le mosse (Fig. 3.36).

Sono poi trattati aspetti più specifici della produzione artistica nata in diversi contesti: opere di Dalí, un breve excursus sul "Movimento nucleare" sorto a Milano nei primi anni '50 e coordinato da Enrico Baj, una scelta di disegni dei sopravvissuti (*hibakusha*) ai bombardamenti di Hiroshima e Nagasaki, che narrano in forma non verbale le atrocità della bomba (Fig.3.37). A partire dagli anni '70 ci si è impegnati a raccogliere questi manufatti caratterizzati da una forte componente espressiva e il cui valore sopravvivrà agli stessi hibakusha.

In contrapposizione a questo, vengono mostrate diverse fotografie che, soprattutto nel contesto statunitense dimostrano un forte entusiasmo per la bomba. Il paese

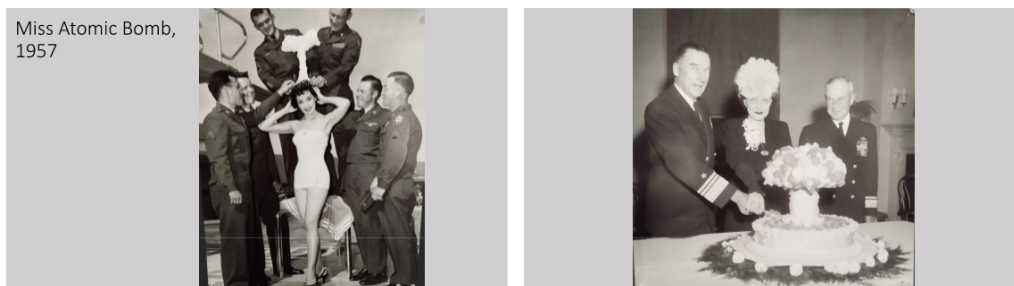


Figura 3.38 a sinistra, Missa Atomic Bomb (1957), a destra, l'ammiraglio Bandi festeggia con la moglie l'operazione "Crossroads" tagliando una torta a fungo nucleare (1946)

che per primo ha fatto uso degli ordigni nucleari e nel quale sarebbero poi sorti movimenti fortemente critici e avversi alla bomba, nel decennio successivo ai bombardamenti sul Giappone favorisce una propaganda positiva verso la bomba, veicolata da immagini pubblicitarie, opere artistiche, eventi ludici che anche se circoscritti fanno emergere quanto capillarmente si era diffuso l'entusiasmo dei vincitori (Fig. 3.38).

Come ulteriore documentazione si proiettano estratti di "War Game", documentario di fantasia di Peter Watkins realizzato per la BBC e andato in onda solo dopo l'aprile 1966 poiché ritenuto troppo spaventoso. Il filmato mostra infatti i possibili effetti sulla popolazione di un bombardamento nucleare sul Regno Unito, rifacendosi a quanto già era noto dalle esperienze di Hiroshima e Nagasaki¹³. La forza comunicativa del documento è tuttora invariata e in aula si percepisce lo sconcerto dei partecipanti.

In questa lezione il contributo degli studenti è stato molto attivo: in diversi momenti sono stati fatti interventi, poste questioni e si è realizzato un dibattito molto ampio sui temi trattati.

Al termine dell'incontro viene assegnato come compito la ricerca di materiali inerenti la bomba atomica, a scelta degli studenti stessi, che potranno esporre quanto trovato nella lezione successiva.

3.4.17 III lezione, workshop: L'era atomica: le influenze sulla produzione artistico-culturale

Gli studenti suddivisi per gruppi presentano la produzione artistica collegata con il tema della bomba atomica

Gruppo 1

Viene discusso il film "Il dottor Stranamore - Ovvero: come ho imparato a non preoccuparmi e ad amare la bomba" (orig.: "Dr. Strangelove or: How I Learned to Stop Worrying and Love the Bomb"), regia Stanley Kubrick, 1964.

¹³Gli estratti sono reperibili in: <https://www.youtube.com/watch?v=phxXCqilf2M;>
[https://www.youtube.com/watch?v=ivIjbxIorXA,](https://www.youtube.com/watch?v=ivIjbxIorXA) https://www.youtube.com/watch?v=Nzd_VE-bfhA

I ragazzi presentano per sommi capi la trama, mettendo in luce alcune caratteristiche dell'opera, che vengono dialogate con il Prof. Ludwig e gli insegnanti iscritti al corso:

- Terrore per il nemico
- Conoscenza specifica della FN e più in generale della fisica
- Insistenza sul maccartismo
- Crisi dei missili (Cuba)

Gruppo 2

Vengono proiettate sulla lavagna LIM e di seguito discusse tre opere di Salvador Dalí:

- *Leda Atomica* (1949), la cui genesi va identificata nel terrore dell'autore per una possibile guerra nucleare
- *Madonna di Port Ligat* (1945)
- *Idillio melanconico atomico e uranico* (1945)

Di quest'ultimo quadro viene fatta un'approfondita analisi, in cui vengono dettagliati i riferimenti delle singole parti dell'opera con il contesto storico post-bellico, ma anche con la tradizione artistica classica.

Gruppo 3

Vengono presentati due contributi.

Il primo è sulla serie televisiva britannico-americana "Chernobyl" diretta da Johan Renck. Di questa si riassume la trama e, soprattutto si discute il ruolo dei pompieri che hanno ridotto l'incendio nelle fasi immediatamente successive all'incidente. Vengono poi descritti alcuni errori presenti nella serie, per quei contenuti che non trovano corrispondenza scientifica.

La seconda presentazione riguarda la serie di videogiochi "Fallout", ambientata in un futuro post-apocalittico, la cui estetica risente di quella americana degli anni '50. La serie di videogiochi, contiene quattro prodotti sviluppati in tempi diversi: i primi due alla fine degli anni '80, il terzo nei primi anni 2000 e l'ultimo nel 2008. L'atompunk, a cui si rifà tutta la serie di videogiochi, è una sorta di branca del Cyberpunk, movimento che trae ispirazione dall'atmosfera statunitense degli anni '40-'50 in cui alla paranoia anticomunista si accostava la normalizzazione atomica, ossia quel processo propagandistico teso a far familiarizzare le popolazioni con le armi nucleari. Gli studenti illustrano gli aspetti realistici della serie, come le conseguenze politiche, il collasso sociale, la sopravvivenza in un mondo ostile, così come quelli di fantasia che contengono anche errori grossolani: coesistenza di tecnologie avanzate e arretrate, l'inverno nucleare, le creature mutanti, la fauna radioattiva.

Gruppo 3

Vengono fatti ascoltare e poi discussi stralci di brani dell'album discografico "The final cut" del gruppo canoro britannico Pink Floyd. L'album, pensato come tributo al padre, contiene anche un brano sull'epilogo di una guerra nucleare.

Gruppo 4

Gli studenti di questo gruppo presentano l’opera monumentale “Hiroshima panels” dei coniugi Iri e Toshi Maruki che per dovere etico si impongono, in un lavoro durato trent’anni, di rappresentare le vittime di Hiroshima ad una ad una (Fig. 3.39).



Figura 3.39 Hiroshima panels – II The fire (credits: Maruki Gallery for the Hiroshima Panels)

Nella parte finale della lezione vengono assegnati ai diversi gruppi i compiti per la lezione successiva, che vertono sui sistemi missilistici (Tab. 3.7):

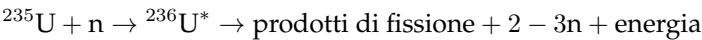
Gruppo	Consegna
1	ICBM, IRBM, SRBM
2	MIRV, BMD
3	Missili cruise
4	Sistemi di difesa anti-missile

Tabella 3.7 Consegne per la quarta lezione

3.4.18 IV lezione, workshop: Tappe fondamentali della storia della bomba atomica (II parte)

In questo quarto incontro vengono riannodati i fili con le tematiche introdotte nel primo. L’incontro è suddiviso in tre parti, dedicate rispettivamente a recuperare informazioni storiche sulla progettazione della bomba, all’esposizione del modello per la pila di Fermi e ai risultati reperiti dagli studenti in merito alle consegne assegnate nell’incontro precedente (Tab. 3.7). Il relatore, per riprendere gli episodi centrali che hanno portato alla progettazione della bomba, pone alcune domande ai partecipanti, in particolare agli studenti:

- (a) Come è possibile innescare una reazione di fissione come ad esempio la seguente:

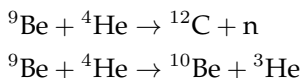


ossia, in altri termini, quale sorgente emette i neutroni capaci di innescare la fissione?

- (b) Quali sono i principali giacimenti per l'estrazione dell'uranio?
- (c) Perché l'uranio 235 è fissile e l'uranio 238 non lo è?

Alcuni studenti intervengono soprattutto per rispondere alla seconda domanda e di seguito il relatore fornisce le risposte ai quesiti:

- (a) Generalmente si utilizza una sorgente come il polonio, buon emettitore di particelle alfa che producono neutroni interagendo con il berillio 9 secondo le reazioni:



Anche se non strettamente pertinente all'argomento, viene ricordato che il processo di arricchimento a cui deve essere sottoposto l'uranio è dispendioso soprattutto nella prima parte, dato che il lavoro speso per l'arricchimento al 3,5% è la massima parte del lavoro complessivo per portare l'arricchimento al 90%, come mostrato in Tab. 3.8, mostrata in aula:

Enrichment of Product	Quantity of Feed in kg	Quantity of Product in kg	Work done in kg SWU	Percentage of full enrichment
0,90	218,8	1,0	147	100
0,20	218,8	4,6	130	88,4
0,05	218,8	19,1	95,6	65
0,035	218,8	28,4	80,3	54,6

Tabella 3.8 Confronto tra la percentuale di arricchimento di uranio 235 e la relativa energia spesa

- (b) I principali paesi che commerciano uranio sono: Australia, Canada, Kazakistan, Namibia, Russia, Niger.
- (c) Per rispondere a questo quesito il relatore fa uso del principio di indeterminazione di Heisenberg che, prima di ogni formalizzazione successiva, aveva permesso ai fisici negli anni '30 - Niels Bohr tra i primi - di stimare o giustificare certi comportamenti nucleari. Dato che gli studenti presenti delle classi quinte dichiarano di conoscere il principio, il relatore lo discute per il problema proposto. Dato che l'incertezza sulla posizione è anche una misura della probabilità di occupazione dello spazio e quindi influisce sulla sezione d'urto, quest'ultima aumenta tanto più quanto si riduce la quantità di moto dei neutroni, ossia per neutroni termici. Saranno quindi favorite le reazioni che massimizzano l'assorbimento dei neutroni termici, ossia quelle che coinvolgono l'uranio 235, che fissionerà più facilmente. Il relatore mette in evidenza che questa deduzione semi-empirica oggi giorno mostra alcuni limiti, anche alla luce dello sviluppo della FN in ambito quantistico. Resta comunque interessante notare come strumenti ancora rudimentali abbiano permesso di ottenere risultati notevoli grazie a interpretazioni semplici.

Nella parte successiva viene ripreso l'exkursus storico, a partire dagli eventi che coinvolsero i fisici tedeschi alla fine degli anni '30. Si ricorda così la figura del fisico tedesco Kurt Diebner, il primo a convincere Hitler a fondare un "Club dell'Uranio", di cui avrebbero fatto parte i migliori fisici tedeschi, chiamati a progettare e a realizzare una bomba a fissione. Il Club iniziò così a lavorare sulla progettazione di una bomba nucleare, soprattutto dopo che fu chiaro che l'uranio 235 era un isotopo fissile dell'uranio col quale poter dar vita a una reazione a catena. L'unico ostacolo sembrava essere la quantità di combustibile necessario per sostenere la catena di fissioni. Su questo si era pronunciato Bohr, che credeva che mai si sarebbe potuta realizzare una bomba all'uranio. Questi dubbi non fermarono i fisici del Club dell'Uranio, che iniziarono a lavorare al progetto di un reattore nucleare denominato *Uranmaschine*. Nonostante la convinzione e l'ampio vantaggio temporale con cui lavorarono i fisici tedeschi, il progetto tedesco fu elaborato con fatica. Cerchiamo di capire le principali cause di quel fallimento.

Il primo errore notevole porta il nome del fisico Walter Bothe. Questi ebbe l'idea di studiare la grafite come rallentatore di neutroni. A questo scopo costruì una sfera di grafite di 90 cm di diametro per iniettarvi un fascio di neutroni che secondo le sue stime avrebbe dovuto arrestarsi dopo aver percorso un cammino medio di circa 71 cm. Bothe verificò sperimentalmente che i neutroni erano in realtà molto più rallentati del previsto, dato che lo spazio di frenata misurato era di 58 cm. Il fenomeno fu attribuito alla presenza nella sfera di grafite di impurezze di cadmio e di boro, forti assorbitori di neutroni. Bothe perfezionò l'apparato sperimentale, riducendo la presenza delle impurezze, ma non fece che peggiorare la situazione. Operando con la nuova sfera di grafite, Bothe ottenne uno spazio di frenamento ulteriormente ridotto, pari a 35 cm. E si diede per vinto. Oggi è possibile affermare che le attività di Bothe erano evidentemente viziate da errori compiuti nelle procedure sperimentali, che non furono condotte con attenzione del fisico tedesco. Altri fisici tedeschi si adoperarono per ripetere le misure relative al rallentamento dei neutroni da parte della grafite e trovarono risultati ben diversi, confermando l'ipotesi iniziale di Bothe. I loro lavori non furono mai comunicati al Club dell'Uranio, i cui membri optarono infine per un altro moderatore di neutroni, l'acqua pesante nella cui molecola, indicata con D_2O , l'idrogeno è completamente costituito dal suo isotopo stabile meno abbondante, ossia il deuterio. Questa era fabbricata in Norvegia, a Vemork, a cui i tedeschi si rivolsero facendo ordini massicci di acqua pesante (inizialmente 185 chilogrammi e poi, a seguire, 100 chilogrammi al mese). I francesi intercettarono l'ordine e, grazie a un'operazione clandestina, recuperarono tutta l'acqua pesante che trasferirono a Parigi, non ancora occupata [103]. Nonostante questo già dal 1939 qualcuno si applicava nella fabbricazione di piccoli reattori a fissione, detti reattori L-IV: Werner Karl Heisenberg. Come già anticipato precedentemente, Heisenberg dal 1939 aveva iniziato una attività in questa direzione. I primi reattori che riuscì a realizzare furono del 1942. Un prototipo, detto a sandwich, era costituito da lastre tra loro parallele, contenenti ossido di uranio U_3O_8 alternate a strati di acqua pesante. Per migliorarne l'efficienza, tale schema fu perfezionato da lui sostituendo le lastre piane con gusci concentrici sferici di ossido di uranio immersi in acqua pesante. Il prototipo era una sfera di 700 chilogrammi con un diametro di 80 centimetri, in cui una piccola sorgente di radio-berillio poteva essere iniettata attraverso un sottile cunicolo. Questi primi reattori, mostrarono da subito i loro limiti e provocarono più o meno gravi incidenti. In un'occasione infatti, interagendo con l'ossigeno, l'uranio piroforico diede luogo a combustione,

dopo essere fuoriuscito nella fase di iniezione nel reattore. La polvere di uranio, a contatto con l'atmosfera, si incendiò generando fiamme alte 8 metri. Si trattò di un'esplosione chimica che però diffuse uranio nei laboratori. Taluni individuano in questo il primo incidente nucleare [121]. Un altro importante incidente si verificò nel giugno 1942. Nella vasca d'acqua in cui era contenuta la sfera di combustibile ci fu uno sversamento di uranio. L'uranio, ossidandosi, liberò atomi di idrogeno che interagendo con l'atmosfera, non appena la sfera fu tolta dall'acqua per essere esaminata, produssero un'esplosione. Venne così utilizzata dell'acqua per sedare l'incendio, che a sua volta a contatto con l'uranio generò un'ulteriore combustione incrementando l'incendio con fiamme alte 6 metri. Questi inconvenienti determinarono l'interruzione del progetto di Heisenberg che non poté portarlo a Berlino, come inizialmente previsto e fu costretto a continuare in solitudine il progetto. Quelli di Heisenberg non furono gli unici progetti tedeschi finalizzati alla costruzione di una bomba. Di lì a poco furono infatti superati da quelli di Kurt Diebner. Questi progettò un grande reattore termalizzato ad acqua pesante: in un'enorme vasca colma di acqua pesante venivano sospesi piccoli cubetti contenenti uranio. In questo modo tutti i neutroni emessi venivano rallentati dal moderatore, contrariamente a quello che accadeva nei prototipi di Heisenberg dove parte dei neutroni si perdeva nelle lastre o nei gusci di uranio, senza raggiungere l'acqua pesante. I reattori di Diebner ottennero in questo modo un risultato notevole: a differenza di un fattore moltiplicativo del 13%, ottenuto da Heisenberg, fu possibile arrivare a un fattore del 110%. Successivamente Heisenberg operò nello stesso modo e perfezionò il sistema di Diebner, utilizzando enormi quantità di acqua pesante che lo stesso Diebner gli aveva fornito. In questo modo i reattori prodotti raggiunsero un fattore di moltiplicazione pari al 670%. Ciò non era comunque sufficiente per arrivare a realizzare le condizioni di criticità e sarebbero state necessarie altre quantità di uranio e di acqua pesante. Ma ormai la guerra stava sfiancando la Germania e gli Alleati stavano per guadagnare la zona in cui Heisenberg lavorava al reattore. Il regime nazista non aveva più la priorità di inseguire Heisenberg e i suoi progetti, che furono completamente abbandonati.

Per affrontare la parte successiva relativa al fronte americano e quindi al progetto statunitense denominato Manhattan, più noto e di cui è più facile reperire informazioni storiografiche attendibili anche sfruttando la rete, il relatore sorvola sugli aspetti generali, ma ricorda l'episodio che permise alla notizia di un potenziale progetto per una bomba atomica di diffondersi negli Stati Uniti. Fu lo stesso Niels Bohr che diffuse la notizia oltre oceano, pur avendo giurato di non parlarne. Il 6 gennaio 1939, in volo per gli Stati Uniti, infatti, ne parlò con Léon Rosenfeld che, appena atterrato a New York la rivelò a diversi fisici. Lo stesso Robert Oppenheimer, venuto a conoscenza della cosa, intuì le possibili applicazioni belliche della scoperta. Insieme a questo, viene ricordato un altro particolare in merito al progetto Manhattan, di cui spesso si sottolinea il ritardo dell'avvio.

Solo nel settembre 1941 venne infatti deciso di affidare al fisico newyorkese Robert Oppenheimer la direzione operativa del progetto. Fino a quel momento, soprattutto durante il periodo di formazione in Europa, aveva speso enormi sforzi, col solo fine di invalidare la teoria dell'elettrodinamica quantistica. Al rientro negli USA avrebbe affiancato a questa attività anche una serie di approfondimenti in campo astrofisico, che gli permisero di pubblicare lavori che ancora oggi sono di riferimento nel settore. L'argomento che indubbiamente sentiva meno nelle sue corde e che meno aveva toccato la sua traiettoria di fisico era quello della fisica nuclea-

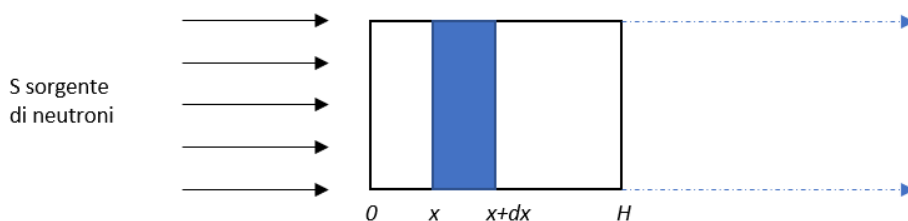


Figura 3.40 schematizzazione di una sezione del reattore di lunghezza semi-infinita, compresa tra la posizione 0 e la posizione H . In azzurro la sezione tra le posizioni x e $x+dx$

re. Come scrisse in seguito il generale Leslie Groves, responsabile militare a Los Alamos: “nessuno di noi si sentiva in alcun modo tenuto a nominarlo direttore del progetto [...], nessuno di quelli con cui parlammo dimostrò entusiasmo circa Oppenheimer come direttore. [...]. Il suo background comprendeva cose che a noi non piacevano per nulla, [...] ma fu presto chiaro che non riuscivamo a trovare un uomo migliore” [85]. Nonostante i rapporti tra il generale Groves e Oppenheimer non fossero sempre facili, possiamo affermare che il talento dirigenziale del fisico newyorkese fu essenziale per la riuscita del progetto. L’enorme investimento degli USA fece senza dubbio la differenza e permise un rapido recupero nella rincorsa alla Germania, che aveva iniziato a studiare la bomba con tre anni di anticipo. La gara non sarebbe mai stata vinta dagli USA senza il talento dei fisici immigrati a Los Alamos, in particolare quelli ebrei fuggiti dall’Europa, e senza l’abnegazione di Oppenheimer che non si arrese in nessun momento del progetto.

Su richiesta del gruppo di docenti di matematica e fisica, vengono affrontati nel dettaglio i principi di funzionamento della pila di Fermi. Il relatore sottolinea che la pila di Fermi realizzata il 2 dicembre 1942 presso uno stadio in disuso fuori Chicago, fu la prova sperimentale della possibilità di sostenere una reazione a catena che agli americani mancava per poter garantire il successo del progetto Manhattan. Viene inoltre messa in luce la capacità di Fermi di controllare gli aspetti sperimentali del prototipo realizzato e al tempo stesso di aver fornito una chiara spiegazione teorica dei processi che il progetto comprendeva. Per quanto riguarda il modello teorico della Chicago-pile si conviene di esporlo in due battute: la prima parte in questo intervento, la seconda nell’ultimo seminario del corso. Il relatore propone così la teoria della pila di Fermi, tenendo soprattutto conto della presenza degli studenti che, essendo all’ultimo anno di corso, non hanno ancora completa familiarità con il calcolo differenziale. Per questo, invece di proporre un modello formalmente rigoroso, il relatore presenta una serie di assunzioni da cui deriva un’equazione scritta per incrementi che successivamente trasforma in un’equazione differenziale. Questo permette agli studenti di partecipare attivamente allo svolgimento dei calcoli, dato che ogni passaggio viene costruito insieme agli studenti, sviluppando matematicamente i loro contributi, derivanti da risposte date a quesiti mirati posti dal docente. Di seguito viene riportata la prima parte del modello di reattore nucleare per l’esposizione del funzionamento della pila di Fermi [23].

Si modella il reattore come un parallelepipedo di lunghezza semi-infinita e di area di base A soggetto a un irraggiamento di neutroni aventi la stessa velocità emessi da una sorgente S su direzioni perpendicolari alla superficie di base A (Fig. 3.40).

Il numero dei neutroni $j(x)$ per unità di superficie e di tempo che giungono alla sezione in x sarà ridotto alla sezione $x + dx$ per via degli urti avvenuti nel volume compreso tra x e $x + dx$. Vale perciò:

$$j(x + dx) = j(x) - N\sigma A dx$$

dove N rappresenta il numero di urti per unità di volume nella sezione di ampiezza dx e σ la sezione d'urto di cattura dei neutroni da parte del mezzo. Il concetto di sezione d'urto viene introdotto come quello di una superficie legata alla probabilità che l'evento accada. Si ricava quindi l'equazione:

$$\frac{dj}{dx} = -N\sigma j$$

Tale risultato è stato ottenuto trattando la differenza $j(x + dx) - j(x)$ come una variazione infinitesima del numero di neutroni (dj , $dx \rightarrow 0$) e operando sul termine dx come se non fosse un termine differenziale, ma un elemento finito su cui operare algebricamente. Si è infine individuato nel rapporto tra i due elementi dj e dx , la derivata della funzione $j(x)$ che fornisce l'andamento del numero di neutroni nella generica posizione x del mezzo. Si procede infine all'integrazione dell'equazione, trattandola non come un'equazione differenziale a variabili separabili, ma semplicemente chiedendo ai ragazzi se conoscono qualche funzione la cui derivata è pari alla funzione stessa a meno di coefficienti moltiplicativi. Si ottiene così, infine, l'espressione per $j(x)$:

$$j(x) = Se^{-N\sigma x}$$

di cui viene spiegato il significato del coefficiente moltiplicativo S e di come è stato ottenuto, dalle condizioni iniziali, ponendo per $x = 0$, $j(0) = S$.

Tale calcolo non avrebbe potuto essere impostato in termini rigorosi in virtù delle scarse conoscenze degli studenti. Al tempo stesso ha permesso di chiarire che in casi semplici alcuni problemi di Cauchy espressi in forma differenziale possono essere affrontati "algebricamente", come del resto inizialmente operavano gli analisti storici fondatori del calcolo differenziale e integrale [104]. Ciò dà vita a un significativo confronto con i docenti di matematica che trovano molto interessante e utile l'approccio mostrato. Per quanto riguarda il significato fisico della soluzione ricavata, la discussione viene rimandata alla lezione successiva, in cui il risultato sarà ripreso e commentato.

La parte finale dell'incontro è invece riservata all'esposizione delle informazioni ricavate dagli studenti sui vettori per armi nucleari (ICBM, IRBM, e SRBM; MIRV; BMD; missili cruise) e sui sistemi antimissile. Si discute in particolare dei missili russi (RS-28 Sarmat, il missile a propulsione nucleare 9M7390 Burevestnik, il siluro Poseidon capace di generare maremoti), di quelli statunitensi di cui si sottolinea l'invecchiamento (componente aria degli anni '50 come i bombardieri B-52, sottomarini degli anni '70 con missili nucleari Trident relativamente più giovani ma comunque del secolo scorso, missili a terra come gli ICBM degli anni '70) e di quelli francesi che nell'arsenale NATO sono i più giovani (M51 del 2010) e a differenza di quelli britannici non sono sottoposti a vincoli di utilizzo da parte americana, ma sono completamente governati dalla repubblica francese. In questa cornice vengono anche illustrate velocemente le strategie militari nucleari dei diversi paesi detentori di testate nucleari (evoluzione della MAD, politica e attuatori del No First Use, i sei livelli della politica russa, ...). Per questo si consiglia la lettura del testo

di Francesco Dall’Aglio e Franco Ziviello, “Oppenheimer, Putin e altre storie sulla bomba”, di recente pubblicazione, che ha il merito di tracciare un quadro aggiornato al periodo storico attuale con particolare riferimento alla guerra russo-ucraina [104].

Vengono infine assegnate le consegne per l’incontro successivo, secondo quanto riportato nella seguente Tab. 3.9:

Gruppo	Consegna
1	Trattati per il disarmo: NPT, MTCR
2	Trattati per il disarmo: SALT I e ABM
3	Trattati per il disarmo: START I e START II
4	Associazioni per il disarmo: Pugwash e associazioni giapponesi

Tabella 3.9 Consegne per la quinta lezione

3.4.19 V lezione, workshop: Trattati per il disarmo e origini storiche del pacifismo

(liceo Banfi: il coinvolgimento attivo della componente docente e degli studenti: IBT per la costruzione di percorsi disciplinari e aggiornamento del sito disnuc). Il problema del rapporto con la tecnica: l’esperienza della tecnica nei Quaderni di Praxis, il problema del controllo della tecnica.

L’incontro inizia con un breve richiamo a quanto già esposto in merito alla Chicago-pile. Viene poi completata la sezione di calcolo relativa al reattore di Fermi, con ipotesi meno generiche. In particolare viene fatto notare che nel modello affrontato il reattore ha dimensioni infinite, che la sorgente S fornisce un flusso costante di neutroni che, a loro volta, possono solo essere ridotti nel reattore per effetto della cattura da parte del mezzo di cui è costituito. Per superare questi limiti si introduce il concetto di flusso neutronico $\phi(x)$ definito come il prodotto della densità di neutroni N alla posizione x e della loro velocità v :

$$\phi(x) = N(x)v$$

le cui dimensioni sono quelle della grandezza già definita $j(x)$. Le due quantità sono legate da un’equazione di diffusione che attraverso una costante D caratteristica del mezzo, detta parametro di diffusione, descrive il fenomeno di propagazione dei neutroni dovuto all’interazione con la struttura del reattore:

$$j(x) = -D \frac{d\phi}{dx}$$

Definendo la sezione d’urto di fissione σ_f , la sezione d’urto di assorbimento neutronico σ_a e il numero di neutroni ν generato in ogni fissione, la variazione del numero di neutroni nello strato dx (Fig. 3.40, paragrafo precedente schematizzazione reattore con strato dx) per unità di tempo è fornita da un’equazione di bilancio tra il numero di neutroni entranti, uscenti e prodotti per fissione nello strato che è pari al numero di neutroni assorbiti dal mezzo e catturati per attivare la reazione di

fissione:

$$j(x)A - j(x+dx)A + A\nu\Sigma_F\varphi(x)dx = \varphi(x)(\Sigma_F + \Sigma_a)Adx$$

Sfruttando l'equazione di diffusione, si ottiene infine un'equazione differenziale del secondo ordine a coefficienti costanti:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2}(x) = k^2\varphi(x), \quad \text{con } k = \sqrt{\frac{\Sigma_a - \Sigma_F(\nu - 1)}{D}}$$

le cui soluzioni sono una combinazione lineare di funzioni esponenziali, di funzioni armoniche, dipendenti dalle condizioni iniziali [7]. Non potendo discutere in termini rigorosi la ricerca delle soluzioni per l'equazione, si è comunque cercato di introdurre il problema in termini generali e intuitivi, discutendo due aspetti delle soluzioni e della loro interpretazione fisica:

- la tipologia delle soluzioni dipende dalla natura del parametro k : se k è un numero reale le soluzioni sono una combinazione lineare di funzioni esponenziali, una crescente, l'altra decrescente; se k è un immaginario puro, le soluzioni sono date una combinazione di funzioni armoniche. Per meglio far comprendere questo ultimo aspetto si è richiamata l'equazione del moto armonico che gli studenti in genere conoscono dal IV anno di liceo: $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2x = 0$;
- le condizioni iniziali sono relative al numero di neutroni $j(0)$ iniettati dalla sorgente S e dalla velocità di iniezione $j'(0)$. A differenza del primo modello di reattore esposto nella lezione precedente, appare quindi evidente che quest'ultimo ne rappresenta un raffinamento, in quanto la sorgente non inietta un numero costante di neutroni ma il flusso neutronico può essere controllato dall'esterno. È questo controllo che permette di ottenere un reattore sovracritico (soluzione esponenziale crescente), sottocritico (soluzione esponenziale decrescente) o con numero di neutroni emessi oscillante (soluzione armonica).

Si introduce poi il fattore k , riconducibile a k , che presenta il vantaggio di poter essere espresso dalla formula dei quattro fattori:

$$k_\infty = \eta f \epsilon p$$

dove:

- η è il "fattore di moltiplicazione", ossia il numero di neutroni prodotti mediamente per ogni neutrone "termico" assorbito dall'uranio;
- f fornisce la probabilità che l'evento di cattura ad energie termiche avvenga nel combustibile, e non nel moderatore o negli elementi strutturali;
- ϵ esprime la probabilità che la fissione avvenga con neutroni veloci per cattura da parte dell'uranio 238;
- p misura la probabilità che il neutrone eviti le catture delle risonanze.

Vengono quindi forniti i valori delle costanti per l'uranio: $\eta = 1,3$, $\epsilon = 1,03$.

Viene poi ricordato che Fermi lavorava in regime di sottocriticità del reattore, dovuto all'uso di uranio naturale non arricchito e che questo gli consentiva un controllo maggiore della neutronica. Un'ulteriore caratteristica dell'esperienza di Fermi relativa al controllo dei neutroni è data da un doppio accorgimento. Poiché il reattore ha dimensioni finite, il fattore che esprime la criticità del reattore non è k , ma una grandezza ad esso associata, detta k_{eff} , pari al prodotto di k e di un termine detto PNL che tiene conto delle dimensioni finite del reattore, che può quindi essere sottocritico anche qualora k sia maggiore di uno. Per avvicinarsi alla criticità, il gruppo di Fermi aumentava il combustibile e i blocchetti di moderatore posti attorno, senza per questo entrare in un regime critico o sovracritico. Come secondo accorgimento controllava il numero di neutroni ritardati abbattendone il valore quando il reattore era prossimo alla criticità. Per meglio comprendere la situazione viene letto il seguente passo, tratto dal documento di Augusto Gandini già citato [23]:

“Via via che ci si avvicina alla criticità, cioè via via che k_{eff} si avvicina all'unità, in presenza di una sorgente esterna il livello del flusso tende asintoticamente all'infinito. E questa legge di aumento del flusso per valori di P_{NL} crescenti a venire (e viene tuttora) utilizzata nel processo di assemblaggio della pila per portarla alle condizioni critiche. Si parte infatti da condizioni sicuramente sottocritiche, cioè è caratterizzate da valori di k_{eff} largamente inferiori all'unità. Si attende quindi che il livello di flusso raggiunga una condizione di equilibrio [...]. Si procede quindi all'aggiunta di ulteriori elementi di combustibile, cui corrisponderà un valore più elevato di k_{eff} , e quindi, dopo qualche tempo, un nuovo valore del flusso [...]. Si procede così fino a che il valore della criticità non viene raggiunto. Ci si accorge che ciò 'è avvenuto allorché il livello di flusso, sempre in presenza della sorgente esterna, continua ad aumentare senza fermarsi ad un livello massimo. Se venisse superato il livello di criticità, se cioè il coefficiente di moltiplicazione k_{eff} fosse maggiore di uno, la crescita temporale del flusso seguirebbe una legge esponenziale del tipo

$$\varphi \sim e^{\frac{\rho}{\Lambda} t}$$

dove Λ rappresenta la vita media dei neutroni, cioè il tempo medio che intercorre tra la loro nascita e la loro scomparsa (per cattura, o per uscita, o leakage, dal sistema), mentre la quantità ρ , denominata “reattività”, 'è data dalla differenza $k_{eff} - 1$. Poiché il valore di Λ per sistemi del tipo considerato è dell'ordine di un millesimo di secondo, per valori di k_{eff} anche di poco superiori all'unità la crescita esponenziale del flusso, e quindi della potenza del reattore, sarebbe incontrollabile. Per fortuna, mentre gran parte dei neutroni viene emessa immediatamente dopo l'evento di fissione, con tempi dell'ordine di 10^{-14} secondi (per questo si parla di neutroni “pronti”, cioè di emissione istantanea), una frazione (circa lo 0,75%), detta anche frazione β , nasce con ritardo (mediamente, dell'ordine della decina di secondi). Questi neutroni vengono chiamati neutroni ritardati ed è proprio la loro nascita ritardata che consente la controllabilità dei reattori nucleari. Infatti, fintanto che l'eccesso di k_{eff} rispetto all'unità si mantiene al di sotto della frazione dei ritardati (cioè,

per l'uranio 235, finché k_{eff} 'e inferiore a 1,0075) il sistema cresce sempre esponenzialmente ma con gradualità. [...] Si dà tutto il tempo quindi ai sistemi di sicurezza di poter intervenire per ridurre la moltiplicazione dei neutroni. Ciò si realizza mediante il pronto inserimento di materiali contenenti elementi con sezioni d'urto di assorbimento neutronico elevate (come l'isotopo B-10 del boro), che riducono quindi drasticamente il valore di k_{eff} . Questo meccanismo oggi 'e realizzato in modo alquanto sofisticato ed automatico, con grado di affidabilità elevatissimo. Ai tempi dell'andata a criticità della prima pila, si era pienamente consapevoli delle conseguenze di un incidente, per quanto remoto, di reattività e si dispose un sistema di regolazione e di intervento basato essenzialmente su tre dispositivi indipendenti. Il primo di questi, di regolazione, era costituito da una barra (manovrata da George Weil) per mantenere sotto controllo la reazione, gli altri due erano dispositivi di sicurezza. Il primo di questi era costituito da barre automatiche, il secondo da una barra di emergenza il cui funzionamento era affidato a Norman Hilberry. Ad una estremità di questa barra era attaccata una fune che correva lungo tutta la pila e portava un grosso peso all'estremità opposta. La barra (detta di "scram") era stata estratta dalla pila e legata ad un balcone con un'altra fune. Hilberry era pronto a tagliare questa fune con un'ascia nel caso accadesse qualcosa di inaspettato... "

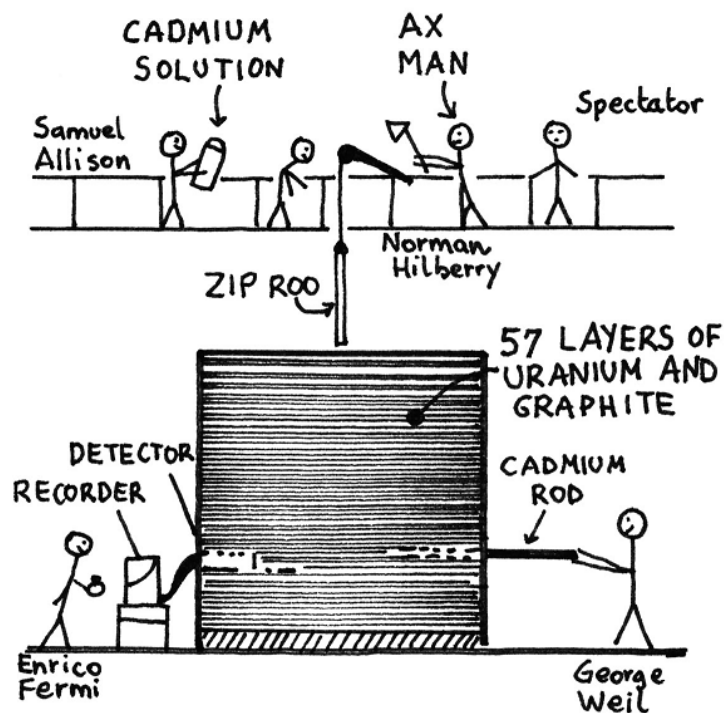
Viene quindi proiettata sulla LIM l'immagine seguente (Fig. (3.41)), recuperata in rete, che raffigura il bozzetto della Chicago-pile disegnato da Raymond Murray, presente all'esperimento.

La parte successiva dell'incontro è dedicata alle presentazioni degli studenti sui trattati per il disarmo nucleare e sulle associazioni attive contro la proliferazione nucleare. Vengono così esposti nella loro evoluzione storica i principali trattati per il disarmo e le loro caratteristiche. In particolare si discute dell'NPT (Non Proliferation Treaty), dell'MTCR (Missile Technology Control Regime), dei SALT I e II (Strategic Arms Limitation Talks) e dell'ABM (Anti Ballistic Missile), degli START I e II e del TPNW (Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons). In alcuni casi si sottolineano le specificità soprattutto quando hanno determinato decisivi passi avanti nelle politiche di disarmo (è il caso dei trattati NPT, INF, New Start), in altri ci si limita ad elencare velocemente le caratteristiche. Nella sintesi finale viene rimarcato il fatto che spesso un trattato apparentemente debole è quello che più spesso viene recepito da un elevato numero di paesi, mentre quelli più intransigenti rischiano di determinare una minor ricaduta nelle prassi legislative. In questo ultimo caso molti paesi infatti ratificano i trattati ma non li firmano¹⁴. È il caso, per esempio, del trattato TPNW, entrato in vigore il 21 gennaio 2021, firmato da 94 paesi, ma ratificato solo da 73¹⁵.

L'ultima parte dell'incontro è pensata in un'ottica trasversale agli insegnamenti e riguarda aspetti storici, filosofici e letterari. È dedicata all'esposizione delle attività delle associazioni che lavorano contro la proliferazione nucleare e per la diffusione di una cultura della pace ed è l'occasione per esporre una breve storia della

¹⁴La firma di un trattato da parte di uno stato implica una adesione informale ai principi del trattato, ma non vincola il paese a legiferare in merito. La ratifica di un trattato, invece, impegna il paese sottoscrittore a includere nella propria legislazione (per le democrazie, per esempio, attraverso i parlamenti) i termini del trattato.

¹⁵Reperibile in: <https://treaties.unoda.org/t/tpnw>.



THE FIRST REACTOR

December 2, 1942

Raymond Murray

Figura 3.41 Schematizzazione della pila di Fermi (tratto da: "Dalla Chicago Pile 1 ai reattori della prossima generazione" di Augusto Gandini, pubblicazione SIF, copyright non identificato)

Pugwash Conferences on Science and World Affairs, e dell'associazione Nihon Hidakyo, premio Nobel per la Pace 2024, e delle modalità di trasmissione della memoria degli hibakusha. Durante la discussione vengono ricordati due testi che per molti rappresentano la più alta riflessione seguita ai bombardamenti su Giappone, ossia quelli di Günther Anders [6] e di Kenzaburō Ōe [135] e ne vengono letti delle parti. Queste considerazioni aprono il confronto sul tema più ampio della pace e del pacifismo. Senza riproporre una dettagliata storia delle dottrine della pace, si ricorda che la tragedia del primo conflitto mondiale, l'elevato numero di morti e l'uso su ampia scala della tecnologia in ambito militare avevano turbato le coscienze delle popolazioni coinvolte dalla guerra. Tra gli anni '20 e '30 le élite manifestarono posizioni contro la guerra sempre più dure. Tra gli altri, Albert Einstein, si fece portavoce di un radicale rifiuto della guerra partecipando attivamente alle manifestazioni dei movimenti pacifisti. Alcuni intellettuali come il francese Henri Bergson elaborarono invece soluzioni politico-filosofiche¹⁶ [22] [21] per la risoluzione dei conflitti anche rivestendo cariche politiche di rilievo¹⁷. Altri ancora si adoperarono per capire le ragioni profonde della propensione umana alla guerra, cercando di individuare vie per il superamento del principio psichico di distruzione [66]. Su questo punto ci si sofferma a lungo, ripercorrendo le tappe del carteggio Einstein-Freud in merito alla guerra [70]. Di seguito si riporta una sintesi di quanto riportato ai docenti e agli studenti partecipanti al corso, ricavata da una pubblicazione recente sulla storia della bomba atomica [166].

Il 1° agosto 1922 si riuniscono a Ginevra i delegati dei 12 stati che hanno dato vita alla Commissione internazionale di cooperazione intellettuale, che ha tra i suoi scopi quello di monitorare il lavoro intellettuale, tutelare la proprietà scientifica e intellettuale, favorire la cooperazione interuniversitaria. Il 13 dicembre 1924, dopo due anni dalla sua formazione, la Commissione crea, su proposta del governo francese, l'Institut international de coopération intellectuelle, una sorta di organo tecnico nato per la realizzazione degli obiettivi della commissione. Sembra di essere di fronte all'ennesimo organismo pletorico, che esaurisce i propri scopi nella sua stessa creazione. Eppure, è a questo istituto che si rivolge nel 1931 il Comitato Permanente per la Cultura e le Arti della Società delle Nazioni, nato per promuovere scambi epistolari tra intellettuali rappresentativi "su argomenti ritenuti idonei per servire gli interessi comuni della Lega delle Nazioni e della vita intellettuale". Tra i primi a essere contattati dal Comitato Permanente ci fu Albert Einstein, che individuò in Sigmund Freud il suo corrispondente, scelto per discutere su un argomento in quegli anni ancora molto sentito, ossia la fatalità della guerra. Sia il fisico che il medico erano scossi dalle conseguenze del primo conflitto mondiale. Già dai suoi albori entrambi avevano maturato una ripulsa della guerra. Freud, a dire il vero, manifestò un iniziale entusiasmo per la guerra, nell'estate del '14, reazione tipica delle

¹⁶Bergson, che non rigetta in toto la cultura industriale né le conquiste della tecnica, oppone alla sua esasperata frenesia un progresso spirituale per gli individui e, a livello politico, la creazione di una struttura sovranazionale per l'eliminazione delle cause delle guerre, da individuare nella sovrappopolazione, negli scarsi sbocchi commerciali degli stati e nella carenza di materie prime.

¹⁷Nel 1922 Henri Bergson fu eletto presidente della prima sezione della Commissione Internazionale di Cooperazione Intellettuale della Società delle Nazioni, ruolo che mantenne fino al 1925, quando abbandonò la carica per motivi di salute.

minoranze ebraiche del centro Europa, che vedevano nella partecipazione all'esercito e nell'adesione alle politiche militari un compimento dell'appartenenza alla patria di elezione [177]. Già nel novembre successivo, peraltro con toni esasperati, comunicò all'amica Lou Andreas Salomé il suo rifiuto della guerra: "Non ho dubbi che l'umanità riuscirà a rimettersi anche da questa guerra; tuttavia so per certo che né io né i miei contemporanei rivedremo mai più un mondo felice. Tutto è troppo orribile; ma quel che è più tragico è che le cose vanno esattamente come avremmo dovuto immaginarle in base a quanto le attese suscitate dalla psicoanalisi ci hanno insegnato sugli uomini e sul loro comportamento" [69].

Negli stessi mesi Albert Einstein aveva aderito al movimento pacifista Bund Neues Vaterland e nel corso degli anni aveva maturato l'idea di un pacifismo militante che lo aveva portato, quasi vent'anni dopo, alla decisione di aprire un confronto con il padre della psicoanalisi. Deluso dalle modalità di lotta dei movimenti pacifisti che lo avevano peraltro sempre sostenuto, Einstein aveva perciò deciso di accettare l'invito della Società delle Nazioni e di contribuire con altri mezzi al dibattito sulla pace e sulla natura della guerra [71].

Curioso è il carteggio Einstein-Freud, dato che è costituito da due sole lettere, quella inviata da Einstein e la risposta di Freud.

Quando Freud riceve la lettera, è reduce da un lungo decennio di vicende private segnate dalla sofferenza. Nell'immediato dopoguerra aveva perso la figlia Sofia, per via di un'influenza particolarmente violenta. Poco tempo dopo sarebbe morto anche il nipote, figlio di Sofia, a cui Freud era affezionato. Il cancro alla mascella, con cui egli stesso lotterà fino alla morte, lo aveva colpito nel 1923. A questo quadro privato angoscioso, si aggiungeva un mutato orizzonte di pensiero relativamente ai fondamenti della psicoanalisi. L'analista aveva ormai cambiato le proprie convinzioni su ciò che fondava la propria teoria: Freud aveva infatti superato la prima interpretazione psicanalitica per cui alla base dell'inconscio vi è il solo principio di piacere, individuando anche nella pulsione di morte un ulteriore pilastro fondante della psiche. Se in *Considerazioni attuali sulla guerra e la morte* del 1915 [68] si limita a dichiarare che "La guerra a cui non volevamo credere è scoppiata, e ci ha portato... la delusione" già solo pochi anni dopo, nel 1920, riesce a focalizzare precisamente la natura del desiderio di morte che nel 1915 gli era parso solo come un pericolo per l'inconscio. Nel 1920, a seguito dell'analisi dei transfert dei pazienti provenienti dai fronti di guerra nelle cliniche di Vienna, Freud scriverà in *Al di là del principio di piacere* [67] che la pulsione di morte è più radicale della libido, e che il principio di piacere sottostà al principio di distruzione. La pulsione dell'individuo a tornare allo stato organico, alla materia, precede il principio di vita. Tanathos in perenne lotta con Eros. Per il neurologo austriaco non è più il tempo per maturare uno sguardo positivo sull'uomo.

30 luglio 1932: "C'è un modo per liberare gli uomini dalla fatalità della guerra?", questo è il primo quesito che Einstein pone nella lettera che da Caputh (Potsdam) fa arrivare a Freud. Il fisico stesso propone una prima soluzione politica al quesito, individuando in un organo sovra-

nazionale deputato alla difesa della sicurezza internazionale la soluzione al problema, a patto che ogni stato rinunci a una parte della propria sovranità. Einstein sa che la sua è una posizione utopistica e che gli interessi delle classi dominanti, "le mire di chi cerca solo vantaggi mercenari, economici" sono il maggior freno al superamento della sovranità nazionale [71].

Segue un secondo quesito: "Com'è possibile che la minoranza ora menzionata riesca ad asservire alle proprie cupidigie la massa del popolo, che da una guerra ha solo da soffrire e da perdere?". Anche in questo caso Einstein ha una risposta: "la minoranza [...] ha in mano prima di tutto la scuola e la stampa, e perlopiù anche le organizzazioni religiose" e infiamma il popolo sfruttando il piacere di odiare e distruggere intrinseco ad ogni individuo [71].

Einstein rivolge infine a Freud un ultimo quesito: "Vi è una possibilità di dirigere l'evoluzione psichica degli uomini in modo che diventino capaci di resistere alle psicosi dell'odio e della distruzione?" [71]. A questo quesito Einstein non sa dare una risposta e chiede il soccorso del padre della psicoanalisi.

Settembre 1932: "Caro signor Einstein, quando ho saputo che Lei aveva intenzione. . . ", così ha inizio la lunga risposta di Freud. Nelle prime righe della lettera, dichiara lo stupore provato di fronte alle domande di Einstein e si propone di rispondere nella misura in cui uno psicologo può offrire considerazioni utili alla comprensione del problema, escludendo un suo coinvolgimento in "proposte pratiche". Dopo una digressione sui concetti di diritto e violenza, sulla necessità dei deboli di coalizzarsi in comunità, organizzazioni e istituzioni stabili per contrastare la brutalità del forte, Freud analizza il ruolo della Società delle Nazioni e ammette l'inadeguatezza di quella istituzione inibita dagli interessi nazionali degli stati che dovrebbero invece indicarne e sostenerne l'impegno. L'impossibilità di un ricorso all'uso della forza per la difesa del diritto internazionale pare a Freud il limite maggiore all'azione della Società delle Nazioni.

Nel prosieguo della lettera, viene esposta una rapida digressione sulle pulsioni di piacere e di morte, che Freud vede mescolarsi nelle vicende umane. Pur non credendo che ci siano popoli felici, seguendo un ragionamento ideale, individua nella contrapposizione di Eros a Tanathos una possibile risorsa per arginare le pulsioni distruttrici. Il superamento delle logiche di conflitto può avvenire se l'uomo segue principi di amore e di identificazione col simile, o se le società di individui si impegnano a un'educazione delle élite fondata sull'assoggettamento della vita pulsionale al principio di ragione. Tutte queste soluzioni appaiono al padre della psicoanalisi come *petitiones principii* e egli stesso è il primo a individuare i limiti di queste ambizioni, una volta che le si immagina declinate in pratiche effettive. Allo stesso tempo come pacifista non si riduce ad accettare che l'idea della guerra sia per sempre connaturata all'uomo. Difendendo le istanze del pacifismo, Freud si augura quindi che il processo di civilizzazione a cui l'umanità è soggetta nel corso dell'evoluzione comporti "uno spostamento delle mete pulsionali e una restrizione dei moti pulsionali. Sensazioni che per i

nostri progenitori erano cariche di piacere, sono diventate per noi indifferenti o addirittura intollerabili; esistono fondamenti organici del fatto che le nostre esigenze ideali, sia etiche che estetiche, sono mutate. Dei caratteri psicologici della civiltà, due sembrano più importanti: il rafforzamento dell'intelletto, che comincia a dominare la vita pulsionale, e l'interiorizzazione dell'aggressività, con tutti i vantaggi e i pericoli che ne conseguono”.

Freud confidò all'amico Eitington che il confronto con il fisico svizzero era risultato per lui “noioso e sterile” [101]. Nonostante questo giudizio severo, la corrispondenza tra i due intellettuali ancora oggi fornisce due punti di vista sulla fatalità della guerra, per usare l'espressione di Einstein. If Einstein crede ancora alla possibilità di risolvere i conflitti con la creazione di un organismo internazionale deputato alla risoluzione dei conflitti e al superamento dei nazionalismi, Freud manifesta tutto il proprio scetticismo e confida soltanto nei progressi della civilizzazione e della sua capacità di inibire le pulsioni aggressive e la volontà distruttiva dell'uomo.

3.4.20 Esiti del questionario di gradimento

Al termine del workshop è stato rivolto sia ai docenti partecipanti sia agli studenti un questionario di gradimento per la valutazione dell'attività rispetto a una batteria di indicatori [App. 12 e 13]. Hanno risposto al questionario 10 docenti (100% dei partecipanti) e 16 studenti (100% dei partecipanti). Gli esiti sono riportati in Tab. 3.10 e Tab. 3.11. Segue un breve commento.

Tabella 3.10: Esiti del questionario di gradimento (workshop) – componente docenti

Domanda	Esito
Età	2 oltre i 55 anni
	5 tra 46 e 55 anni
	3 tra 36 e 45 anni
Laurea	5 matematica
	2 fisica
	2 storia e filosofia
	1 informatica
Numero N di ore di insegnamento nei licei (triennio)	2 $N < 6$
	4 $5 < N < 11$
	2 $10 < N < 16$
	2 $N > 15$
	2 $N < 3$
Numero N di ore di insegnamento nei licei (ultimo anno)	

(continua nella pagina successiva)

(continua dalla pagina precedente)

Domanda	Esito
	5 $2 < N < 8$ 2 $7 < N < 13$ 1 $N > 12$ 9 $N < 3$
Numero N di ore di insegnamento di storia della bomba atomica e di disarmo nucleare	1 $2 < N < 8$
Gli argomenti trattati nel corso sono stati interessanti?	Valutazione media: 9,10 Deviazione standard: 1,10
Gli argomenti trattati nel corso hanno risposto alle sue aspettative?	Valutazione media: 8,90 Deviazione standard: 1,45
Gli argomenti trattati nel corso erano accessibili?	Valutazione media: 8,70 Deviazione standard: 1,25
I metodi utilizzati durante le lezioni erano adeguati ai contenuti sviluppati?	Valutazione media: 9,00 Deviazione standard: 1,25
I metodi utilizzati durante il corso erano favorevoli per il coinvolgimento dei partecipanti?	Valutazione media: 9,20 Deviazione standard: 0,79
I materiali utilizzati e condivisi con i partecipanti sono stati utili al processo di formazione?	Valutazione media: 9,00 Deviazione standard: 1,56
Il numero degli interventi è stato sufficiente a sviluppare le tematiche del corso?	10 sì
La durata degli interventi era adeguata?	10 sì
Come reputa la modalità di svolgimento del corso solo "in presenza"?	Valutazione media: 8,90 Deviazione standard: 1,20
Le informazioni relative all'organizzazione sono state tempestive?	10 sì
Il calendario degli incontri è stato adeguato?	10 sì
La struttura tecnica dell'ente formatore si è rivelata adeguata?	9 sì, 1 no
In che misura i docenti erano preparati e competenti?	Valutazione media: 9,80

(continua nella pagina successiva)

(continua dalla pagina precedente)

Domanda	Esito
I docenti hanno comunicato in maniera chiara e comprensibile?	Deviazione standard: 0,42 Valutazione media: 9,40
I docenti hanno fornito spunti di riflessione e approfondimento?	Deviazione standard: 0,70 Valutazione media: 10,00
In che misura il corso è stato utile per la sua formazione personale?	Deviazione standard: 0,00 Valutazione media: 8,90
In che misura il corso è stato utile per l'effettiva possibilità di sviluppare argomenti di fisica nucleare legati alla storia della bomba atomica e del disarmo nucleare nell'attività didattica?	Deviazione standard: 1,60 Valutazione media: 9,00
In che misura il corso ha fornito degli argomenti trasferibili nell'attività didattica?	Deviazione standard: 0,82 Valutazione media: 8,30
In merito alla storia della bomba atomica e del disarmo nucleare, i libri di testo sono aggiornati?	Deviazione standard: 1,89 Valutazione media: 3,10
In merito alla storia della bomba atomica e del disarmo nucleare, i libri di testo propongono una didattica transdisciplinare (fisica, storia, filosofia, storia dell'arte)?	Deviazione standard: 2,13 Valutazione media: 2,40
	Deviazione standard: 2,01

Tabella 3.11: Esiti del questionario di gradimento (workshop) – componente studenti

Domanda	Esito
Età	1 di 17 anni 12 di 18 anni 3 di 19 anni
Genere	8 maschi 8 femmine
Hai frequentato il triennio del liceo nella stessa classe?	16 sì
Classe frequentata	4 di quarta 12 di quinta
Il tuo voto in Fisica nella pagella del primo quadrimestre è stato:	5 per 3 studenti 6 per 2 studenti 7 per 5 studenti 8 per 4 studenti 9 per 2 studenti
Quante lezioni del corso hai seguito?	11 per 4 studenti 5 per 5 studenti
Gli argomenti trattati erano interessanti?	Valutazione media: 8,50 Deviazione standard: 0,65
Gli argomenti trattati erano semplici da capire?	Valutazione media: 5,64 Deviazione standard: 1,73
Le lezioni di storia della bomba atomica e del disarmo trattate in forma transdisciplinare hanno reso più interessanti le materie scolastiche (fisica, storia, storia dell'arte)?	Valutazione media: 8,07 Deviazione standard: 0,83
Le lezioni potevano essere svolte online con la stessa efficacia?	16 no
Le lezioni svolte a fianco dei docenti hanno migliorato l'apprendimento?	Valutazione media: 5,00 Deviazione standard: 2,54
Ho collaborato con gli altri studenti del gruppo?	Valutazione media: 7,43 Deviazione standard: 1,91
Il lavoro di gruppo migliora l'apprendimento?	Valutazione media: 6,21 Deviazione standard: 2,29

(continua nella pagina successiva)

(continua dalla pagina precedente)

Domanda	Esito
Nel gruppo si sono condivise e rielaborate idee?	Valutazione media: 4,86 Deviazione standard: 2,41
I docenti hanno incoraggiato la partecipazione degli studenti?	Valutazione media: 8,00 Deviazione standard: 1,18
I docenti hanno commentato i lavori dei gruppi?	Valutazione media: 7,43 Deviazione standard: 2,20
Internet è stato usato come fonte di informazione?	Valutazione media: 9,21 Deviazione standard: 0,97

Quello che emerge da queste due batterie di esiti, a cui la totalità dei partecipanti ha aderito, è una sostanziale differenza tra il gradimento espresso dai docenti e dagli studenti. Per entrambi i soggetti si può dire che il corso ha rappresentato l'occasione di un'effettiva crescita professionale o formativa, anche se il giudizio degli studenti è più articolato.

Per quanto riguarda i docenti che si collocano in una fascia di età elevata (70% oltre i 45 anni) l'esperienza professionale è analoga a quella già rilevata per i moduli I e II. I docenti più giovani sembrano essere quelli più interessati all'insegnamento della storia della bomba atomica e dei suoi risvolti, anche se raramente l'hanno sperimentato. Il giudizio sul corso, sui docenti e sugli aspetti organizzativi è mediamente eccellente e supera quello già elevato espresso nei moduli I e II. Per quanto riguarda il giudizio sia sull'aggiornamento dei manuali in adozione, sia per il carattere trasversale nella presentazione degli argomenti, vengono espresse valutazioni estremamente negative.

Per la componente studentesca, invece, il panorama delle risposte, come sottolineato, è diversificato. Il campione è omogeneo per età e genere e per frequentazione scolastica. Per ciò che concerne il profitto in fisica il campione è eterogeneo e gli studenti si collocano nella fascia che va dal 5/10 al 10/10, e si può dire che un terzo del campione è nella fascia dell'ottimo/eccellente (9/10-10/10). Per quel che riguarda il gradimento, sul corso e sui docenti vengono espresse valutazioni positive, anche se mediamente inferiori rispetto a quelle dei docenti. Questo dato potrebbe trovare spiegazione o nella scarsa frequentazione della valutazione da parte degli studenti, o nella probabile mancata riflessione docimologica precedente il questionario, o anche nel fatto che come oggetto di valutazione essi stessi non sono stati abituati a valutazioni elevate. Si può inoltre osservare che l'attività svolta in presenza è stata fortemente apprezzata, così come la scelta dei contenuti a volte ritenuti comunque ostici. Si rileva anche una buona collaborazione interna ai gruppi anche se l'elevata deviazione standard fa supporre che qualche elemento non si sia integrato completamente (risultano valutazioni molto negative anche ripetute di alcuni studenti, uno di questi con profitto insufficiente in fisica al I quadrimestre). A questo riguardo, si può ipotizzare che in contesti di apprendimento

diversi dalla classe dove la supervisione del docente è quotidiana, alcuni individui non riescono a maturare dinamiche inclusive nei gruppi di appartenenza. La collaborazione interna è probabilmente intesa come capacità organizzativa, non tanto come attitudine a scambiarsi e rielaborare idee, attività che non è stata mediamente perseguita nei gruppi. Questo può essere imputato anche a una mancanza di leadership inclusiva nei gruppi, a cui per questa attività non è stato possibile dedicare attenzione, come era accaduto per il corso di FN curricolare (v. par. 2.3.2.).

A partire da queste osservazioni e in seguito a uno scambio informale di pareri coi docenti partecipanti al corso, si è deciso di diffondere materiali didattici redatti nei primi mesi di questo progetto di ricerca, ossia nell'a.a. 2022-2023. Si tratta dell'illustrazione dello sviluppo delle teorie atomistiche a partire dall'antichità fino agli esperimenti storici compiuti a cavallo tra l'Ottocento e il Novecento. Questi materiali erano stati inizialmente pensati per una veste editoriale diversa e comunque tutta da definire. In seguito alle istanze dei docenti, si è ritenuto opportuno diffonderle in una forma più agevole e ampia attraverso il sito web www.disnuc.fisica.unimi.it, di cui si tratterà nel capitolo successivo (v. cap. 4). Lo scopo principale di questa iniziativa è quella di fornire tutti gli elementi per insegnare in aula o in altri contesti la storia dell'atomismo, inteso come una teoria profondamente radicata nella storia plurimillenaria delle culture del mediterraneo e che ha condizionato l'evoluzione prima della filosofia naturale medievale e rinascimentale e infine della fisica seicentesca, della chimica del XVIII secolo e infine della fisica moderna.

Il corpus del corso “armi nucleari, disarmo e proliferazione nucleare”

4.1 Il Prof. Paolo Cotta-Ramusino e il corso sul disarmo nucleare

Una breve biografia

Paolo Cotta-Ramusino, già docente del dipartimento di fisica “A. Pontremoli” dell’Università degli Studi di Milano e ricercatore INFN, è attualmente in quiescenza dopo aver esercitato il ruolo di professore ordinario. La sua carriera scientifica prende le mosse attorno agli anni ’70, in atenei e centri di ricerca nazionali e internazionali. Approdato all’ateneo milanese, si applica agli studi in fisica matematica e si dedica a un’ampia attività didattica, di cui si ricordano principalmente il corso di “Metodi matematici nella fisica” e “Armi nucleari, disarmo e proliferazione nucleare”. Sul fronte della diffusione della cultura del disarmo nucleare vanno ricordati la fondazione nel 1983 dell’USPID, unione scienziati italiani per il disarmo, e il suo segretariato presso le Pugwash Conferences on Science and World Affairs. L’organizzazione Pugwash, una delle tante esperienze tangibili nata sull’onda del manifesto di Einstein e Russell del 1955 [136], svolge tuttora numerose attività di divulgazione, partenariato, ricerca scientifica sui temi del disarmo. Il Prof. Paolo Cotta-Ramusino si distinse per aver favorito un ampliamento dello spettro tematico delle Conferenze Pugwash, ponendo al centro dell’attenzione della sua pluriennale attività di segretario dell’organizzazione il pericolo di un eventuale conflitto indo-pakistano di cui, anche solo fino a qualche anno fa, pochi si preoccupavano.

Nell’ambito di questa ricerca, più che il profilo accademico del professore o la genesi del corso “Armi nucleari, disarmo e proliferazione nucleare”, importa ricordare il contributo effettivo dato con quel tipo di esperienza didattica. Nato dall’intuizione del Prof. Cotta-Ramusino di portare in Italia l’esperienza di un corso analogo che il prof. Kosta Tsipis teneva ad Harvard negli anni ’70 del secolo scorso, il corso inizialmente rivolto agli studenti di fisica in forma di ciclo di seminari sviluppato negli anni ’80, avrebbe preso una forma pressoché definitiva dall’a.a. 2013-2014 e sarebbe proseguito fino all’a.a. 2022-2023, quando si è svolta l’ultima edizione del corso. Se si eccettua l’esperienza pluridecennale di ISODARCO (International School on Disarmament and Research on Conflicts) [64], che peraltro si è sempre sviluppata come forum e in ambito non accademico, non è data traccia di iniziative analoghe in altre università italiane, per lo meno così ampie, strutturate e a

lungo ripetute. Questo carattere di eccezionalità rappresenta indubbiamente un punto di forza dell’iniziativa, non fosse altro che per la caparbieta del docente di mantenere vivo un unicum nel panorama accademico nazionale, che curiosamente di queste tematiche sempre si è poco interessato. Allo stesso tempo, il fatto stesso che questa esperienza sia stata circoscritta per tanti anni al solo ateneo milanese, le conferisce un carattere elitario che poco si sposa con lo scopo di divulgare la cultura del disarmo a uditori più ampi di quelli di un’aula universitaria. L’obiettivo del corso era quello di esporre gli aspetti tecnico-fisici degli ordigni nucleari e i loro effetti, estendendo poi il campo della disamina anche a questioni storiche (la crisi di Cuba, per esempio), militari (armi convenzionali, vettori missilistici, sistemi anti-missile), geopolitiche (trattati per il disarmo, associazioni per il disarmo). I destinatari del corso sono stati principalmente gli studenti del corso di laurea in fisica, anche se veniva auspicata anche la partecipazione di studenti di altri corsi di laurea (filosofia, lettere a indirizzo storico, chimica). Generalmente svolto in primavera e di durata semestrale il corso sviluppava gli argomenti elencati attraverso lezioni frontali del Prof. Paolo Cotta-Ramusino, coadiuvato da ricercatori, personalità istituzionali, figure del mondo militare, che portavano il loro contributo al corso stesso. Nell’ultima edizione del 2023, per esempio, avevano partecipato come relatori il Prof. Alessandro Pascolini dell’Università degli Studi di Padova, con un intervento sui missili ipersonici e il Gen. Vincenzo Camporini, ex capo di stato maggiore dell’Aeronautica Militare e della difesa, che al termine del corso aveva tenuto un seminario sul rischio nucleare nel conflitto russo-ucraino tuttora non concluso.

4.2 Il corso e i materiali

Per avere un’idea più precisa del corso, si può fare riferimento all’edizione del 2023, la più recente e quindi la più aggiornata. Nell’a.a. 2022-2023 il corso si è sviluppato in 20 lezioni da tre ore l’una, a partire dal 7 marzo fino al 3 maggio, a cui va aggiunto il contributo già citato dell’intervento del Gen. Vincenzo Camporini. Gli studenti iscritti erano circa una trentina e gli effettivi partecipanti alle lezioni svolte in presenza erano mediamente una ventina per lezione. Generalmente il professore esponeva i contenuti della lezione frontalmente lasciando ampio spazio al dialogo con gli studenti, per chiarimenti, domande, approfondimenti. Venivano poi lasciati riferimenti bibliografici, schede per la consultazione relative a quanto affrontato e, soprattutto dispense redatte dal docente, contenenti le parti affrontate ed esaurienti la complessità degli argomenti. Le dispense erano costituite da quattro file (NW1, NW2, NW3, NW4, con l’acronimo NW per Nuclear Weapons), da qui in poi NW*, che il docente manteneva continuamente aggiornati i cui temi sono riassunti nella Tab. 4.1:

File	Contenuto
NW1	Applicazioni belliche della fisica nucleare
NW2	Proliferazione nucleare e trattati
NW3	Missili e difesa antimissilistica
NW4	Strategie nucleari e disarmo: Pugwash Conferences

Tabella 4.1 Suddivisione dei file del corso e dei relativi contenuti

Per realizzare uno degli scopi di questa ricerca si è provveduto a revisionare i quattro file (correzioni, modifiche, controllo dei link, impaginazione) la cui ultima versione è pubblicata nella sezione “Il corso” del sito disnuc.fisica.unimi.it. In quella sezione si possono quindi selezionare i contenuti suddivisi nelle seguenti parti: La bomba, La proliferazione e i primi trattati, Missili, trattati e disarmo, Strategie nucleari, Rischi e controversie internazionali, Fisici e movimenti per il disarmo.

Attualmente il dipartimento di fisica dell’Università degli Studi di Milano ha preso la decisione di non attivare nuovamente l’insegnamento “Armi nucleari, disarmo e proliferazione nucleare”, nonostante la candidatura a ruolo di docente di alcune figure interne al dipartimento per il prosieguo dell’esperienza didattica. Si segnala che nell’ateneo di Pisa il Prof. Francesco Forti nell’a.a. 2023-2024 ha ripetuto l’esperienza del corso del Prof. Cotta-Ramusino, senza peraltro rinnovare i contenuti, ma seguendo il tracciato ideato ed esposto nei quattro file citati.

4.3 La collazione dei materiali e l’aggiornamento

Integrazione dei materiali e sito web disnuc

Al fine di salvaguardare i materiali del corso illustrati in Tab. 4.1 anche nell’ottica dell’utilizzo in contesti di apprendimento formali e informali, si è deciso di operare un ampliamento dei file NW*. In particolare si è proceduto a una ricerca ampia e diversificata che permettesse di raccogliere elementi supportati da una documentazione storica non opinabile, sostenuta da diverse fonti, il cui approfondimento scientifico fosse originale senza essere troppo specifico o poco accessibile a un’utenza non accademica e facilmente replicabile in contesti di didattica/divulgazione. Il materiale prodotto è confluito in un file le cui bozze sono allegate [App. 12]. Nella sezione “I materiali” del sito si possono così consultare questi contributi, suddivisi nelle seguenti parti: Le prime scoperte, La Germania, La notizia bomba in America, Il Progetto Manhattan, Il Giappone, La guerra fredda, L’U.R.S.S., Archivio nucleare, Associazioni per il disarmo.

I destinatari del sito non hanno un profilo preciso, se non quello di essere individui interessati a un confronto consapevole sui temi della civilizzazione. Sia nell’esposizione che nell’individuazione delle tematiche è stata tuttavia data priorità all’utenza delle scuole (docenti, studenti, collaboratori di progetto), con lo scopo di favorire approfondimenti della didattica della FN e dell’educazione civica nelle scuole secondarie di secondo grado. L’iniziativa è stata infatti pensata anche tenendo conto delle finalità dei 17 goal europei per lo sviluppo sostenibile, in particolare a quelle del goal 4 (quality education) e del goal 16 (peace, justice strong institutions)¹. I materiali presenti sul sito sono stati tradotti nella sintassi caratteristica della fruizione via web, nello specifico rimodulando la granulometria delle nozioni, pensate per poter essere visualizzate e lette anche dal piccolo schermo di uno smartphone, inserendo una cronologia per 35 paragrafi articolata sui protagonisti e gli eventi cardine nella storia delle armi atomiche, dalla scoperta della radioattività alle diverse fasi del progetto Manhattan, alla prima proliferazione nucleare degli anni ‘50 del XX secolo fino all’esplosione della bomba Tzar la più colossale mai avvenuta sul pianeta. Molti paragrafi, volutamente costruiti per non eccedere

¹I 17 goal europei per lo sviluppo sostenibile, agenda 2023, sono reperibili in: <https://sdgs.un.org/goals>

la mezza pagina e utilizzando un linguaggio che predilige la chiarezza all'erudizione involuta e autoreferenziale di parte della divulgazione contemporanea, si collegano a link esterni dei documenti storici citati (come la lettera di Einstein a Roosevelt) o ad articoli divulgativi, video e paper scientifici disponibili in rete in modo da consentire differenti livelli di approfondimento ad ogni passo pur mantenendo un'unica struttura cronologica chiara ed evidente. Un archivio così assemblato consente nella prospettiva di una fruizione didattica formale o informale di adottare metodologie di active and cooperative learning. Con l'obiettivo di attualizzare i contenuti del materiale è stata data attenzione all'evoluzione post-bellica in Giappone, unico paese ad aver sperimentato due esplosioni nucleari su popolazioni civili. Interviste originali sono state effettuate con istituzioni e associazioni nipponiche per monitorare nell'epicentro dell'apocalisse nucleare i mutamenti dell'opinione pubblica nei confronti di temi come la deterrenza, il riarmo atomico e la proliferazione nucleare.

Come già anticipato, nel sito è possibile accedere direttamente ai contenuti del corso "Armi nucleari, disarmo e proliferazione nucleare", che offrono un ampio e dettagliato archivio sul nucleare bellico, sugli aspetti fisico-ingegneristici delle bombe, sui contesti storici e sulle strategie politiche e militari sviluppate, materiali di pubblico dominio che permettono a qualsiasi insegnante di costruire percorsi sui materiali del corso con le proprie classi. Le diverse sezioni del sito sono corredate da colloqui con il prof. Cotta-Ramusino sui temi trattati, specificamente realizzati e montati a completamento del sito. Un contributo significativo a supporto delle interviste a Prof. Cotta-Ramusino è stato fornito dal M^o Luca Buratto, che ha eseguito i movimenti della suite per pianoforte "Le tombeau de Couperin", composta da Maurice Ravel.

Il sito è stato sfruttato anche come repository per alcune dispense, che forniscono un quadro ragionato della storia dell'atomismo, dalle premesse filosofiche antiche, alle scoperte di fisica atomica e nucleare di fine Ottocento e inizio Novecento (v. par. 3.4.20.). Questi materiali, pensati per i docenti della scuola secondaria superiore per attività didattiche in aula, sono comunque accessibili a chiunque manifesti curiosità per l'argomento e raccolgono le principali tappe che hanno segnato l'evoluzione delle teorie atomistiche nel corso di più di duemila anni. I file sono presenti nell'area "Dall'atomo al nucleo" della homepage e sono così suddivisi:

- Atomismo antico
- Alchimia
- Chimica atomica
- X rays e esperimenti di Thomson
- Modello di Rutheford
- Tra atomo e nucleo
- La scoperta degli isotopi

4.3.1 Le attività didattiche e di disseminazione

I file NW*, l'integrazione operata successivamente, il sito web disnuc.fisica.unimi.it sono stati il riferimento per una serie di incontri/lezioni/momenti di divulgazione che nel corso degli anni della ricerca si sono susseguiti. In particolare possono essere ricordati alcuni significativi tra questi momenti:

- emissione radiofonica sulle tematiche del disarmo (7 giugno 2023), Radio popolare;
- presentazione del film di Christopher Nolan "Oppenheimer", presso la sala cinematografica Rondinella di Sesto San Giovanni; divulgazione informale per classi delle scuole secondarie superiori. Due cicli di incontri, nell'anno 2023 e nell'anno 2024. Prima della proiezione, la pellicola è stata presentata al pubblico di studenti e docenti delle scuole secondarie, contestualizzando la figura del fisico statunitense nel panorama della fisica americana, spiegando alcuni episodi della sua formazione europea. È stata chiarita per sommi capi la struttura del film e identificati i protagonisti scientifici. Gli incontri sono stati rivolti a un pubblico complessivo di 714 studenti e 40 insegnanti;
- lezione "La fisica della bomba atomica" presso il liceo scientifico "F. Enriques" di Lissone (MB), nell'ambito dell'iniziativa "Notte bianca del liceo" (6 maggio 2023). In questa sede è stato svolto un seminario di circa un'ora sulla storia della bomba atomica, che ha sfruttato i materiali prodotti in App. 12. Il pubblico complessivo è stato di circa una trentina di partecipanti;
- lezione "I fisici e la bomba. Contributi, impegno e problematiche attorno al progetto Manhattan" presso il liceo artistico "N. Valentini" di Monza, dove sono stati esposti alcuni episodi della storia della bomba atomica, chiarendo il ruolo dei fisici tedeschi all'interno del Club dell'Uranio e dei fisici partecipanti al Progetto Manhattan e, riferendoci a questioni più attuali, si è esposta l'evoluzione dei trattati per il disarmo e si sono indagate le origini storiche e le ragioni del pensiero pacifista, partendo dal carteggio Einstein-Freud, fino ad arrivare all'approccio della psicanalisi americana, sintetizzato da James Hillmann[95];
- intervento al congresso SIF (Bologna 2024) con il contributo: "Collazione e aggiornamento di materiali inerenti alla proliferazione nucleare e al disarmo per la formazione di cittadinanza attiva";
- articolo "A brief history of the nuclear weapon" per Il Giornale di Fisica" della Società Italiana di Fisica (SIF) [166] indirizzato a un pubblico specialistico anche di docenti della scuola, dove sono confluiti elementi relativi alla storia della bomba, appunti sull'argomento del pacifismo nell'antichità, un forum sulle tematiche del disarmo e sulle strategie militari giapponesi con rappresentanti di istituzioni, università e associazioni giapponesi e un inserto sul sito disnuc.fisica.unimi.it;
- articolo "Progresso scientifico e responsabilità etica: il cammino verso il disarmo" per la rivista Coelum. Astronomia [168] per un pubblico generico, dove appare anche un contributo on-line, reperibile tramite QR-code: "Dalla scoperta della fissione nucleare alla bomba H: un viaggio tra scienza, guerra

e innovazione” e un’intervista condotta con il Prof. Nicola Ludwig al Prof. Paolo Cotta-Ramusino sui temi di stringente attualità.

Resta infine da richiamare l’esperienza del workshop al liceo “A. Banfi” di Vimercate, che ha raccolto tutte le precedenti in modo ampio e articolato ed è stato il primo tentativo, perfettibile ma compiuto, di un corso con docenti e studenti totalmente focalizzato sui temi della storia della bomba atomica e della fisica delle armi nucleari, sul concetto e sulle iniziative legate al disarmo, sul tema della pace. Di questo si è comunque già diffusamente discusso nel paragrafo opportuno, a cui si rimanda (v. par. 3.4.14.).

Parte III

Recepimento delle proposte a livello normativo

Il confronto con le istituzioni e la legge delega

5.1 PNNS: la Piattaforma Nazionale per un nucleare sostenibile

5.1.1 L'iniziativa del MASE: finalità e obiettivi della piattaforma PNNS

Durante lo svolgimento delle attività didattiche con gli studenti e la progettazione del corso di formazione per i docenti (v. Parte II), per una fortunata coincidenza, il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) ha manifestato l'intenzione di intraprendere iniziative per la ripresa di produzione di energia nucleare in Italia. Per questo, il 21 settembre 2023 il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) ha presentato a Roma, per voce del ministro, la Piattaforma Nazionale per un Nucleare Sostenibile (PNNS), istituita con D.M. 16 novembre 2023, comunicando che i lavori della piattaforma stessa sarebbero iniziati a fine dicembre 2023 per concludersi nell'ottobre 2024. I gruppi di studio della PNNS sarebbero stati coordinati dal presidente dell'ENEA, Ing. Gilberto Dialuce, e dall'amministratore delegato di RSE, Prof. Franco Cotan e avrebbero lavorato per il raccordo e il coordinamento dei principali *stakeholder* italiani nel settore nucleare (enti di ricerca, università, imprese, associazioni di categoria). Questo lavoro di ricerca ha quindi incrociato l'iniziativa istituzionale della PNNS e ha partecipato alla selezione prevista dal MASE per partecipare al gruppo di studio dedicato alla formazione. L'inserimento del dip. di fisica dell'Università degli Studi di Milano è stato approvato e i referenti di questo progetto di ricerca (chi scrive e il supervisor Prof. Nicola Ludwig) sono stati accolti in seno alla PNNS.

Il principale obiettivo della PNNS è lo sviluppo di linee-guida e una roadmap, finalizzati a definire un percorso per la ripresa dell'utilizzo dell'energia nucleare in Italia, grazie allo sfruttamento delle nuove tecnologie nucleari sostenibili (reattori modulari, reattori di IV generazione, sul breve termine e reattori a fusione sul lungo termine). In questo modo la PNNS favorisce la decarbonizzazione dei sistemi energetici, l'affiancamento e il supporto dell'energia nucleare al mix energetico delle energie rinnovabili non programmabili, anche nell'ottica di ottimizzare il funzionamento dei sistemi elettrici. In particolare, il MASE nel corso dell'anno 2023 tenendo conto di atti istituzionali ¹ ha individuato nella PNNS lo strumento per definire un percorso finalizzato alla possibile ripresa dell'utilizzo dell'energia nucleare in Italia, facendo leva su:

¹Mozione della Camera dei Deputati n.100 del 9 maggio 2023 e proposta di aggiornamento del Piano Nazionale Energia e Clima (PNIEC) inviato alla Commissione europea in data 19 luglio 2023.

- un maggior incremento della ricerca, sviluppo e dimostrazione delle nuove tecnologie nucleari, e dei loro aspetti di maggiore sicurezza, sostenibilità e circolarità,
- un investimento per favorire la loro migliore accettabilità sociale,
- un consolidamento dei percorsi e dei programmi di educazione, formazione e alta formazione universitaria (corsi di laurea, laurea magistrale e dottorati di ricerca),
- una maggior cooperazione e partecipazione a livello europeo tra gli Enti pubblici di ricerca operanti nel settore, il mondo delle Università, le associazioni scientifiche, i soggetti pubblici operanti nel settore della sicurezza nucleare e del decommissioning, nonché le imprese che hanno programmi di investimento nel settore nucleare o nella produzione di componenti e impianti,
- un rafforzamento delle sinergie con piattaforme analoghe già sviluppate in Europa², come per esempio la SNETP.

Le finalità della PNNS sono state quindi individuate in:

- favorire una base scientifica e tecnica per stabilire elevati standard di qualità e migliori pratiche armonizzate, in collaborazione tra le autorità italiane ed europee operanti in materia di sicurezza nucleare,
- agire come strumento operativo permanente che possa favorire e facilitare il dialogo, le interazioni intersettoriali e le collaborazioni tra i diversi stakeholder,
- facilitare il coordinamento della partecipazione italiana ai programmi di ricerca e sperimentazione a livello europeo e internazionale.
- contribuire alla collaborazione con le istituzioni e gli organismi europei ed internazionali in tema di sicurezza e protezione.
- orientare, in modo coordinato, la formazione delle necessarie competenze e professionalità in campo nucleare in Italia, anche a livello di formazione e alta formazione universitaria (laurea, laurea specialistica, master di secondo livello, dottorati di ricerca), in un'ottica integrata tra tutti i segmenti della filiera formativa sul tema dell'energia nucleare e sulle discipline tecnico-scientifiche e ingegneristiche ad essa propedeutiche e complementari, inquadrando opportunamente le iniziative didattiche in una visione di sistema, con un orizzonte a medio e lungo termine che possa apportare benefici allo sviluppo del sistema energetico complessivo del Paese.

Un quadro più specifico delle finalità e degli obiettivi della PNNS è stato comunicato in una fase successiva attraverso un regolamento riservato ai soggetti partecipanti ai lavori e che hanno sottoscritto un impegno di riservatezza³. Per gli esiti

²SNETP raggruppa 114 soggetti interessati allo sviluppo delle tecnologie nucleari civili sostenibili provenienti da 25 Stati membri dell'UE.

³A causa di questo impegno molti dettagli dei lavori della PNNS, peraltro interessanti per questo progetto di ricerca, non possono essere resi pubblici.

dei lavori dei gruppi di lavoro è stata predisposta una pagina web dove reperirli⁴.
7

5.1.2 Gruppi e modalità di lavoro

La PNNS si compone di sette gruppi di lavoro coordinati dal MASE, contrassegnati dalla sigla GdL-* (GdL.1 è, per esempio, il gruppo di lavoro 1). I gruppi di lavoro sono strutturati secondo questo schema (Tab. 5.1):

Tabella 5.1: Gruppi di lavoro: aree tematiche e obiettivi

GdL	Aree tematiche	Obiettivi
1	Contesto, scenari e prospettive	Motivazioni per il ricorso all'energia nucleare. Ricognizione della situazione nazionale e del contesto internazionale in termini di ricerca e iniziative industriali. Aspetti economici, di policy e legislativi. Proposte di azione e tempistiche.
2	Tecnologie di fissione	Ricognizione nazionale e internazionale
3	Tecnologie di fusione	Ricognizione nazionale e internazionale.
4	Sicurezza, normativa, certificazione	Ricognizione nazionale e internazionale.
5	Rifiuti e decommissioning	Ricognizione nazionale e internazionale.
6	Formazione ed educazione	Ricognizione nazionale e internazionale su: • formazione (ITS, università, PhD) • informazione pubblica e educazione sociale • sviluppo delle risorse umane Proposte di azione e tempistiche.
7	Aspetti trasversali (ambiente, accettabilità sociale, comunicazione)	Ricognizione nazionale e internazionale su: • ricognizione su ambiente, accettabilità e comunicazione • coinvolgimento stakeholder industriali e cittadini Proposte di azione e tempistiche.

Vengono anche fissati tempi e scadenze intermedie per le fasi di lavoro:

⁴La pagina web è consultabile presso l'URL: <https://www.mase.gov.it/portale/-/piattaforma-nazionale-per-un-nucleare-sostenibile-pubblicazione-rapporti-conclusivi>

- Attività di ricognizione: entro 3 mesi
- Elaborazione di proposte: entro 6 mesi
- Redazione documento completo della roadmap: entro 7 mesi
- Elaborazione delle Linee Guida (azioni, risorse/investimenti e tempi): entro 9 mesi

5.2 I lavori nei GdL

5.2.1 GdL_6: Formazione ed educazione

Pur non contravvenendo all'impegno di riservatezza previsto dalla PNNS, è comunque possibile mettere in evidenza qualche aspetto generale delle modalità di lavoro. Come anticipato, il dip. di fisica dell'Università degli Studi di Milano ha partecipato al gruppo GdL_6 dedicato alla formazione ed educazione attraverso questo progetto di ricerca in didattica della FN. Gli altri soggetti del gruppo erano i seguenti:

Associazione della Fisica Tecnica Italiana, Unione Italiana Termofluidodinamica, Consorzio Interuniversitario per la Ricerca TECnologica Nucleare, Università di Pisa (Dip. di Ingegneria Civile e Industriale), Università di Roma La Sapienza (Dip. di ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica), Università degli Studi di Milano Statale (Dip. di Fisica), Consiglio Nazionale degli Ingegneri, MASE, Segretariato PNNS.

Il gruppo di lavoro è stato coordinato dai Proff. Sara Rainieri dell'Università di Parma e Marco Ricotti del Politecnico di Milano e ha svolto riunioni cadenzate nell'arco di tempo trascorso tra il 15 dicembre 2023 e il 18 ottobre 2024. Nel corso del lavoro, il GdL6 ha svolto specifiche audizioni con gli esperti esterni Walter Tosto, Edison, ENEL e Ansaldo Nucleare. Gli incontri, poco meno di una decina della durata di due/tre ore ciascuno, si sono svolti a distanza e hanno consentito ai componenti del gruppo di confrontarsi con tante e diversificate realtà della filiera del nucleare italiano, a diverso titolo implicata anche nei processi di educazione e formazione (università, enti di ricerca, aziende e ordini professionali). Un'iniziale ricognizione dei processi formativi ha evidenziato come la preparazione degli studenti laureati in campo nucleare è spesso migliore di quella di altri paesi in cui la cultura e le applicazioni della FN sono più diffuse. Ci si è quindi confrontati più sul reperimento di informazioni sullo stato dell'arte, sulla necessità di armonizzare i diversi segmenti della formazione pur conservandone le specificità e su una pianificazione degli interventi e delle risorse. Si è così lavorato inizialmente sull'analisi dell'esistente, focalizzando l'attenzione sui percorsi universitari, sugli istituti tecnici superiori (ITS) e sulla formazione pre-diploma, ossia sulla scuola secondaria di secondo grado. Il contributo dato da chi scrive è stato poi riportato nel documento finale del gruppo [2], in particolare nell'allegato 1 [All. III 1], la cui parte più significativa è la seguente:

Si evidenzia in generale una scarsità di dati inerenti iniziative didattiche formali (lezioni curriculari ed extracurriculari), informali (conferenze, seminari, visite laboratori) e divulgative (attività di disseminazione, mostre, eventi). I dati raccolti permettono alcune considerazioni

sulla reale diffusione della cultura nucleare nella scuola secondaria di secondo grado. È emerso quanto segue:

Nell'ordinamento antecedente al riordino scolastico Gelmini - L. 103 6/8/2008, L. 169 30/10/2008 - era prevista la figura del "perito nucleare", come esito del corso di studi degli Istituti tecnici industriali con indirizzo Energia Nucleare. Tali figure a esaurimento (fonte AIF) hanno principalmente accesso a ruoli tecnici nella scuola per la classe di concorso AR09. A seguito della riforma la didattica della Fisica Nucleare è quindi confluita negli Istituti tecnici, settore tecnologico, a indirizzo Meccanica, Meccatronica ed Energia. Gli studenti coinvolti sono relativamente pochi: il 19.4% (fonte MIM) degli studenti italiani sceglie questo settore, e di questi solo il 2.8% sceglie l'indirizzo Meccanica, Meccatronica ed Energia. Da una analisi a campione dei P.T.O.F. istituzionali tale valore sembrerebbe ancor più ridotto, dato che l'insegnamento di tematiche nucleari è a discrezione dei singoli istituti che spesso le espungono dall'offerta formativa⁵

L'offerta alle scuole di attività non sistematiche, spesso locali, di fisica nucleare proviene in parte dall'INFN che raggiunge con diverse proposte la maggior parte delle scuole secondarie (visite guidate ai laboratori, masterclass, PCTO, formazione per i docenti);

le altre proposte per le scuole arrivano dal CERN o dalla collaborazione ITER;

attività di singoli laboratori universitari dedicati soprattutto alla radioattività ambientale, come risulta anche dalla letteratura

la SIF ha pubblicato una serie dedicata specificamente alla Fisica Nucleare - <https://www.sif.it/attivita/energy/scuola> - nell'ottica dell'insegnamento nella scuola secondaria

nei licei del campione ad alto profilo scolastico (prove INVALSI di Matematica) esaminato da UNIMI l'attività didattica in Fisica Nucleare è limitata al solo 30% degli utenti. Quando svolta è caratterizzata da un numero medio di ore inferiore a 6 per l'intero ciclo e, quando superiore, svolta in discipline non necessariamente scientifiche.

Commenti

Secondo AIF gli Obiettivi specifici di apprendimento per la parte riguardante la fisica del '900 sono spesso disattesi nelle scuole secondarie per diversi motivi che si possono così riassumere:

- la collocazione all'ultimo anno di tutta la fisica moderna: si sperimenta una minore disponibilità degli stessi studenti ad acquisire contenuti nuovi quando si è chiamati a diversi impegni: PCTO, Orientamento universitario, preparazione alle prove di accesso universitarie, preparazione dell'Esame di Stato;

⁵Reperibile in: <https://www.miur.gov.it/-/iscrizioni-all-anno-scolastico-2023-2024-i-primi-dati-in-aumento-le-domande-agli-istituti-tecnici-il-57-1-sceglie-i-licei> 2 Piano Triennale dell'Offerta Formativa

- solo il 38% dei docenti di Fisica nelle scuole secondarie di secondo grado possiede una laurea in Fisica e può ragionevolmente aver affrontato studi di Fisica Nucleare.
- Alla luce dei dati riportati, emerge la necessità di un corso di aggiornamento per docenti della scuola secondaria e di introdurre un indirizzo di studi specialistico in fondamentali e applicazioni di fisica nucleare, attraverso una progettazione nel gruppo di lavoro sulla riforma degli Istituti Tecnici, anche attraverso una interlocuzione interministeriale MASE-MIM.

Il confronto è poi proseguito con le audizioni degli esperti esterni, sopra citati, da cui sono emerse osservazioni ed esperienze educative interessanti condotte soprattutto con gli istituti tecnici e progettati dall'azienda abruzzese Walter Tosto. A questa si è affiancata una disamina particolareggiata del contesto internazionale, facendo riferimento soprattutto all'esperienza francese, che molto si è spesa nell'ambito della formazione in FN a qualsiasi livello di istruzione. Una riflessione estesa è anche stata svolta in merito alle risorse da allocare per la realizzazione dei progetti di formazione e per questo si rimanda al documento finale già citato [2].

Il 13 settembre 2024, collaterale alle attività del GdL_6, si è svolta una riunione con il Dott. Mauro Antonelli della segreteria tecnica del Ministero dell'Istruzione e del Merito (MIM). In quella sede, il Prof. Ricotti e la Prof.ssa Rainieri, referenti della azienda Walter Tosto e chi scrive hanno sommariamente sintetizzato i lavori del GdL_6 per valutare la possibilità di introdurre elementi di FN nei percorsi formativi della scuola secondaria di secondo grado. Gli aspetti introdotti dal Dott. Antonelli nella discussione, più che sugli elementi di merito, si sono concentrati sugli aspetti normativi e sulla possibilità di inquadrare gli eventuali interventi in prassi già consolidate, senza doverne individuare di nuove. Seguendo questa traccia, si sono perciò individuati tra i 17 obiettivi dell'Agenda europea per lo sviluppo sostenibile⁶ quelli che più risultano aderenti alle proposte illustrate dai partecipanti alla riunione: Istruzione di qualità (goal 4), Energia pulita e accessibile (goal 7), Imprese, innovazione e infrastrutture (goal 8), Città e comunità sostenibili (goal 11). Il Dott. Antonelli propone quindi alcune linee di intervento, la cui genesi va individuata in:

- sfruttamento della filiera degli ITS e delle logiche di campus, facendo riferimento alla legge n. 121 dell'8 agosto 2024,
- sostegno alla didattica della FN nelle linee guida per l'insegnamento, attualmente in discussione con docenti disciplinaristi preposti allo svolgimento di questa attività,
- workshop per insegnanti finalizzati alla formazione e all'aggiornamento,
- sfruttamento della disciplina Educazione civica che prevede insegnamenti relativi alla sostenibilità energetica in cui può inserirsi la FN.

In seguito, non si sono più avuti incontri di questo genere con gli uffici del MIM.

⁶Reperibili in: <https://sdgs.un.org/goals>

5.2.2 GdL.7: Aspetti trasversali (Ambiente, accettabilità sociale, comunicazione, altro)

Per quanto riguarda la partecipazione³ al GdL.7, concentrato sui temi relativi all'ambiente, all'accettabilità sociale e alla comunicazione, in funzione di raccordo col GdL.6 ho assistito a una mezza dozzina di riunioni come invitato su segnalazione del Dott. Nicola Ippolito della segreteria tecnica del MASE e di supporto ai lavori della PNNS. Avendo partecipato agli incontri a lavori già iniziati, il contributo dato alla discussione è stato inserito nella parte relativa alla comunicazione e all'accettabilità sociale. Nel documento finale del GdL.7, assai esteso e sempre reperibile in rete [3], sono distribuiti le varie riflessioni condivise, tese a pianificare una comunicazione delle tematiche nucleari per diversi pubblici (di bassa, media, alta alfabetizzazione scientifica), con diverse modalità di trasmissione dei contenuti (informazione scritta o attraverso media radiofonici, televisivi, social), in diversi contesti formali o informali (dibattito, intervista, lezione universitaria, seminario tematico, assemblea pubblica). Per questo mi sono avvalso anche delle competenze acquisite negli anni di frequentazione della PhD School del dipartimento di fisica, in cui questo progetto di ricerca si colloca, e in particolare nel corso "Comunicare la scienza: perché, a chi e come?" (titolare Prof.ssa Michela Sugni) e nelle attività previste dai corsi "Transferableskills".

5.3 La legge delega

5.3.1 Il recepimento della PNNS nella legge delega

Il 28 febbraio 2025 la Presidenza del Consiglio dei Ministri pubblica la comunicazione della legge delega "Energia nucleare sostenibile", che recepisce i lavori della Piattaforma Nazionale per un Nucleare Sostenibile (PNNS) a cui hanno lavorato i GdL*. Di seguito si riporta la comunicazione della Presidenza del Consiglio.

Delega al Governo in materia di energia nucleare sostenibile (disegno di legge – esame preliminare)

Il Consiglio dei Ministri, su proposta del Presidente Giorgia Meloni e del Ministro dell'ambiente e della sicurezza energetica Gilberto Pichetto Fratin, ha approvato, in esame preliminare, un disegno di legge delega in materia di energia nucleare sostenibile. Il testo è volto all'inserimento del nucleare sostenibile e da fusione nel cosiddetto "mix energetico italiano" e interviene in forma organica sotto i profili economico, sociale e ambientale, nel quadro delle politiche europee di decarbonizzazione con orizzonte temporale il 2050, coerentemente con gli obiettivi di neutralità carbonica e di sicurezza degli approvvigionamenti. L'intervento ha lo scopo di:

- garantire la continuità nell'approvvigionamento energetico in presenza di un incremento costante della domanda e favorire il raggiungimento dell'indipendenza energetica;
- concorrere agli obiettivi di decarbonizzazione necessari a fronteggiare il cambiamento climatico;

- garantire la sostenibilità dei costi gravanti sugli utenti finali e la competitività del sistema industriale nazionale.

Linee di intervento principali

Superamento delle esperienze nucleari precedenti. Si assicura una cesura netta rispetto agli impianti nucleari del passato (cosiddetti di “prima” o di “seconda generazione”), destinati alla definitiva dismissione, salvo eventuale riconversione, e l’utilizzo delle migliori tecnologie disponibili, incluse le tecnologie modulari e avanzate. In quest’ottica, si valuterà l’istituzione di

un’Autorità indipendente competente per la sicurezza nucleare, con compiti di regolazione, vigilanza e controllo sulle infrastrutture nucleari. Disciplina organica dell’intero ciclo di vita dell’energia nucleare. Si prevede una disciplina organica dell’intero ciclo di vita dell’energia nucleare (eventuale fase di sperimentazione - progettazione - autorizzazione degli impianti - esercizio degli impianti - gestione, stoccaggio e smaltimento dei rifiuti radioattivi - smantellamento degli impianti). Coordinamento e dialogo costante con i gestori delle reti elettriche. Lo sviluppo della nuova politica nucleare viene valutato anche nel suo impatto sull’assetto complessivo del sistema elettrico nazionale, incluso quello sul mercato elettrico. Garanzie. I promotori dei progetti nucleari devono fornire adeguate garanzie finanziarie e giuridiche per coprire i costi di costruzione, gestione e smantellamento degli impianti e per i rischi, anche a loro non direttamente imputabili, derivanti dall’attività nucleare.

Entro un anno dalla comunicazione della legge delega il governo dovrà adottare decreti legislativi per disciplinare l’intero ciclo di vita del nucleare, dalla sperimentazione alla disattivazione degli impianti esistenti.

5.3.2 Ulteriori confronti istituzionali e iniziative in corso

Alle attività esposte nei paragrafi precedenti si sono affiancate collaborazioni, iniziative, relazioni con soggetti della filiera del nucleare, tesi a rafforzare una rete per il consolidamento delle attività di formazione e insegnamento della FN nella scuola secondaria di secondo grado. Vale la pena ricordare il confronto con tre diverse realtà che si sono dette disponibili a collaborare in questa direzione. I primi due contatti, con i referenti di Ansaldo Nucleare e Sogin, sono avvenuti a seguito dell’incontro “2025, l’energia nucleare nell’anno della svolta” che si è svolto nella Sala degli Atti Parlamentari Biblioteca del Senato della Repubblica a Roma, al quale sono stato invitato, che ha visto riuniti i diversi stakeholder della filiera del nucleare per un confronto alla luce degli indirizzi governativi (Fig. 5.1)

Per un caso fortuito il venerdì precedente la riunione la Presidenza del Consiglio aveva comunicato la legge delega “Energia nucleare sostenibile” e l’incontro si poneva quindi nel solco di un impegno governativo inizialmente non scontato per gli organizzatori.

Di seguito vengono riportati gli esiti dei due confronti:

- (a) Ansaldo nucleare (Ing. Marco Lovisolo): Ansaldo manifesta la disponibilità a fornire un supporto per eventuali attività didattiche, anche se ritiene difficile

Su iniziativa del
Sen. Manfredi Potenti

2025 L'ENERGIA NUCLEARE NELL'ANNO DELLA SVOLTA

Introduce
Sen. Manfredi Potenti

Portano i saluti
On. Vannia Gava, Viceministro MASE
On. Alberto Gusmerali
Sen. Elena Murelli
On. Giampiero Zinzi

Moderata
Niccolò Di Raimondo, Consulente Parlamentare

Una scelta non rinviabile

Gianluca Artizzu, AD SOGIN	Maria Sclari, Dir. ISPRA
Francesco Campanella, Dir. ISIN	Luigi Ulgiati, Vicesegretario UGL
Vincenzo Pepe, Prof. Diritto dell'Ambiente	Manfred Annibaldi, Il Sole 24 Ore

Le opportunità dei reattori ad alta temperatura per
calore nel processo industriale

Riccardo De Salvo, membro di IATEC
Emanuele Martinelli, General Manager Framatome Italy Branch
Michael Merton, Business Development Manager X-energy
Lorenzo Mattura, Strategy, Corporate Development & Innovation EDISON
Elisabeth Rizzotti, Chief Operating Officer NEWCLEO
Nicola Rossi, Responsabile Innovazione Gruppo ENEL

05 MARZO 2025 ORE 15.00

SALA DEGLI ATTI PARLAMENTARI BIBLIOTECA
DEL SENATO GIOVANNI SPADOLINI, PIAZZA
DELLA MINERVA, 36*

Le opinioni e i contenuti espressi nell'ambito Sala degli Atti Parlamentari Biblioteca del Senato Giovanni Spadolini, Piazza della Minerva, 36* dell'iniziativa sono nell'esclusiva responsabilità dei proponenti e dei relatori e non sono riconducibili in alcun modo al Senato della Repubblica o ad organi del Senato medesimo. L'accesso alla sala è con obbligo di accreditamento e per gli uomini, obbligo di giacca e cravatta - è consentito fino al raggiungimento della capienza massima. I giornalisti e gli ospiti devono accreditarsi scrivendo a: manfredi-potentis@senato.it

Figura 5.1 locandina dell'iniziativa "2025, l'energia nucleare nell'anno della svolta", tenuta presso il Senato della Repubblica il 5 marzo 2025

un ruolo attivo in iniziative strutturate. Viene manifestato un interesse per interventi occasionali al di fuori della progettazione didattica.

- (b) Sogin (Ing. Annafrancesca Mariani, Dott.sse Belinda Sepe, Chiara Bufacchi, Benedetta Celata): in un lungo incontro svolto da remoto il 10 aprile 2025 Sogin manifesta la disponibilità a fornire spazi e risorse umane per attività didattiche e di divulgazione nelle scuole, così come aveva già avvenuto con l'intervento dell'Ing. Annafrancesca Mariani per il corso di formazione dei docenti (v. par. 4.2.12). Si dice pronta a condividere l'esperienza acquisita in attività già svolte dall'ente (aperture dell'area occupata da Sogin, collaborazione con enti territoriali in cui Sogin è presente, scuola interna di formazione). Mette a disposizione il proprio Catalogo Formativo.

Il terzo confronto è avvenuto all'interno del dipartimento di fisica dell'Università degli Studi di Milano, grazie all'incontro con la Prof.ssa Flavia Groppi. Da anni la Prof.ssa Groppi è titolare di diversi insegnamenti per il corso di laurea in fisica, tra cui quelli di Fisica sanitaria, Laboratorio di fisica sanitaria, Tecniche avanzate applicate ai beni culturali e, per la Scuola di specializzazione di area medica, sanitaria e odontoiatrica, dell'insegnamento di Radioprotezione normativa e operativa. Per gli studenti dei corsi di cui è titolare, la Prof.ssa Groppi organizza attività variegate di supporto (visite didattiche, esperienze di laboratorio, attività che coinvolgono scuole secondarie). Di seguito viene riportata una sintesi di quelle a cui ho partecipato⁷, cosa che ha permesso l'individuazione di una collaborazione da sistematizzare per eventuali attività di didattiche in FN nella scuola secondaria.

- Ciclotrone presso il LENA di Pavia

Visita guidata da personale del centro di ricerca: vengono analizzate le reazioni nucleari per la produzione di radioisotopi e di seguito visitato il laboratorio di radiochimica per la produzione di radioisotopi per applicazioni mediche (Fluoro 18).

- Deposito Avogadro di Saluggia (11.II.2025)

Visita guidata da personale del centro di ricerca: viene visitato il sito con particolare attenzione alla piscina di stoccaggio.

Dopo la ristrutturazione e il decommissioning del reattore di ricerca MTR (combustibile uranio arricchito al 90%, potenza: 7 MW_{th}) Avogadro nel sito di Saluggia è stato allestito il deposito Avogadro inizialmente per lo stoccaggio temporaneo di elementi di combustibile nucleare irraggiato del reattore alloggiati in una piscina sopraelevata. In seguito l'attività è stata estesa anche alla gestione del combustibile irraggiato proveniente dalle quattro centrali elettronucleari di potenza di ENEL (Trino, Latina, Garigliano e Caorso) e continua tuttora. All'inizio del nuovo millennio altre attività di trattamento e stoccaggio sono state prese in carico dal deposito. Al momento restano 63 elementi MOX di Garigliano destinati al trasferimento presso l'impianto di La Hague.

⁷Fatta eccezione che per la visita al ciclotrone di Pavia, che comunque avevo già visitato in più di un'occasione, nel quadro di visite didattiche da me organizzate in qualità di docente di matematica e fisica nel liceo scientifico.

- Centro di ricerche ENEA di Saluggia (11.II.2025)

Si opera principalmente nel campo della caratterizzazione dei materiali e delle analisi radiotossicologiche e ambientali. Gli studenti del corso di laurea triennale e magistrale hanno potuto vedere i risultati ottenuti con scintillatore liquido e con spettroscopia alfa, anche con l'osservazione di uno spettro specifico relativo a un lavoratore contaminato a seguito di operazioni improprie svolte nella fase di uscita dal luogo di lavoro. In questo spettro risultano evidenti i picchi dei contaminanti, estremamente superiori a quelli del tracciante in uso.

- LASA di Segrate (13.II.2025)

Questa visita è di particolare interesse per la configurazione didattica che le è stata conferita in fase di progettazione. L'attività infatti occupa un'intera giornata e coinvolge studenti e docenti della scuola superiore (licei e istituti tecnici) per un totale di 13 studenti e 3 docenti. Dopo una rapida parte introduttiva tenuta da un postdoc del Dip. di Fisica dell'Università degli Studi di Milano, gli studenti vengono divisi in tre gruppi equilibrati in numero e genere, per lo svolgimento delle seguenti attività:

- (a) Simulazione di un piano di trattamento di radioterapia
- (b) Laboratorio di spettroscopia gamma
- (c) Laboratorio di imaging

I tre gruppi vengono seguiti da due specializzandi in fisica sanitaria, due studenti del corso di laurea magistrale in fisica e da un postdoc, con ruolo di tutor. Si può dire che in questo modo l'intero progetto investe tre generazioni di studenti e docenti:

- Prof.ssa Groppi per la progettazione e il monitoraggio delle attività
- Laureandi, specializzandi e postdoc per la parte didattica e di svolgimento delle attività di laboratorio
- Studenti della scuola secondaria a cui è rivolta l'iniziativa.

La contiguità anagrafica dei docenti e degli studenti agevola la comunicazione reciproca e l'attività sperimentale che, pur non essendo tra pari, è favorita dallo scarso scarto generazionale, come dimostrano diversi progetti analoghi condotti negli atenei sul territorio nazionale (progetto PLS, progetti PNRR) [4].

Ogni gruppo si dedica a una sola attività sperimentale, data la complessità degli aspetti sia teorici, che di analisi di laboratorio. Nella fase finale della giornata i diversi gruppi condividono i risultati ottenuti attraverso presentazioni pubbliche rivolte a tutti i partecipanti, che così possono avere un riscontro anche delle attività in cui non sono stati coinvolti.

Per quanto riguarda il merito della fase sperimentale, queste sono stati i lavori proposti ai gruppi:

A. Simulazione di un piano di trattamento di radioterapia

Attraverso l'utilizzo del software matRad viene simulato e ottimizzato un trattamento radioterapico attraverso fotoni (usuale radioterapia con X-rays), protoni o ioni carbonio. Gli studenti possono variare, oltre alla tipologia di sorgente, anche l'angolo di somministrazione, indirizzata all'organo compromesso dal tumore, con lo scopo di massimizzare l'effetto locale della terapia, evitando di compromettere gli organi sani (cuore, tessuti molli) in prossimità di quello malato (fegato).

B. Laboratorio di spettroscopia gamma

In questo laboratorio vengono analizzati due tipi di sale, sale da cucina e un sale iposodico con presenza di potassio al 28%. Gli studenti devono riconoscere i due tipi di sale, che a loro vengono presentati come incogniti, in base agli spettri gamma ottenuti con scintillatore o con rivelatore al germanio. Questo permette di fare analisi sul fondo ambientale, anche per la calibrazione dello strumento, cosa che consente di fare osservazioni sulla precisione e sulla velocità di raccolta degli spettri tramite scintillatore o rivelatore al germanio. Gli studenti si rendono così conto che "lo scintillatore è meno preciso ma più veloce, mentre il rivelatore al germanio è più lento ma più preciso" (estratto da una presentazione degli studenti). Le misure con lo scintillatore vengono raccolte in circa venti minuti, mentre un'intera ora viene dedicata all'analisi con rivelatore al germanio. Il riconoscimento dei picchi viene svolto attraverso i dati tabulati e divisi per energia o per tipologia di isotopo. In questo modo i ragazzi riescono a riconoscere il picco del Potassio 40.

C. Laboratorio di imaging

Vengono presentati agli studenti i principi delle tecniche CR (Computed Radiography), TC (Computed Tomography), PET (Positron Emission Tomography) e SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography), in cui l'uso della radiazione ionizzante è pensata per il monitoraggio di un paziente. Se gli studenti conoscono l'usuale impiego dei raggi X per radiografie, meno noti sono fondamenti fisici e meccanici su cui si fonda la TC e l'utilizzo dell'iniezione di radioisotopi per la diagnosi tumorale attraverso l'analisi dei raggi gamma prodotti (SPECT) o dei positroni emessi (PET). In laboratorio gli studenti simulano un'analisi CT, guidati dal tutor, raccogliendo lastre impressionate dal Cobalto 60.

Il confronto con la Prof.ssa Groppi è stato particolarmente intenso nelle giornate successive alle visite e ha dato modo di supportare la partecipazione dell'Università degli Studi all'avviso pubblico del Dipartimento per le Pari Opportunità della Presidenza del Consiglio del 14 novembre 2024 "Per il finanziamento di progetti innovativi di formazione sulle discipline STEM per il personale docente al fine di favorire lo sviluppo delle competenze stem nelle studentesse e negli studenti STEM università 2024"⁸ Il dip. di fisica, infatti, ha redatto la domanda di partecipazione al bando, presentando una proposta di progetto didattico per la riduzione del gender gap in ambito STEM dal titolo "STEM4ALL: "Formare per il Futuro: Strumenti e Strategie Innovative per Promuovere la Parità di Genere nelle STEM"", articolato su diversi ambiti disciplinari (matematica, chimica, geologia, informatica, bioscienze e fisica nucleare). In particolare si riporta la sezione della domanda, stesa da chi scrive e dal Prof. Nicola Ludwig:

Formazione insegnanti per la didattica della FISICA NUCLEARE (a scelta) Il progetto vuole favorire l'ingresso delle ragazze nelle discipline STEM attraverso una sfida apparentemente inusuale, quella della

⁸Reperibile in: <https://www.pariopportunita.gov.it/media/kl1pnirn/avviso-stem2024-14-nov-def-signed.pdf>

fisica nucleare.

L'esperienza pregressa, progetto PNRR, "formazione del personale scolastico per la transizione digitale" Rinnovamenti M4C1I2.1-2023- 1222-P-36049), ha ottenuto un alto gradimento e ottimi risultati di acquisizione di contenuti e competenze sia da parte degli studenti sia dei docenti, confermando che la sfida della fisica nucleare è perseguibile anche a livello di scuola secondaria. **Organizzazione** Il corso biennale (minimo 15 e massimo 30 partecipanti) prevede 30 ore complessive, successive a una fase iniziale di co-progettazione (due incontri da tre ore ciascuno) per individuare gli interessi da sviluppare, le metodologie da adottare e la calendarizzazione. Docenti: 6 docenti UNIMI Dipartimento FISICA, 1 esperto della materia esterno. Nel primo anno (2025-2026) si prevedono 7 incontri (totale di 14 ore) sui fondamenti della fisica nucleare e le sue applicazioni (nomenclatura, instabilità, decadimenti e reazioni nucleari, descrizione energetica, fissione e fusione nucleare, fisica sanitaria, beni culturali e fisica per l'ambiente). A settembre del secondo anno (2026-2027) i docenti parteciperanno ad alcune giornate della Summer School di Macugnaga "RADIOLAB" per 8 ore. Seguiranno 8 ore di attività sperimentali da svolgersi in laboratorio (LASA, Segrate, MI) o durante visite a reattori nucleari di ricerca (LENA, Pavia)

Conclusioni

Conclusioni e prospettive

Nei precedenti capitoli si sono tratteggiati gli obiettivi, le modalità di lavoro, il contributo innovativo e gli esiti di un'attività di ricerca in accordo con le finalità previste dal progetto presentato, estendendone il campo a contesti inizialmente non prevedibili. È stato infatti realizzato lo scopo iniziale della ricerca, cioè la collazione dei materiali del corso "Armi nucleari, disarmo e proliferazione nucleare", tenuto dal Prof. Paolo Cotta-Ramusino nel suo ultimo anno di docenza, per migliorarne la diffusione a un pubblico più esteso di quello universitario. A questa attività si è affiancata una riflessione relativa alla didattica della FN per la scuola secondaria di secondo grado, che inizialmente doveva essere circoscritta all'aggiornamento della relativa sezione da svolgere nell'attività curricolare. A queste tuttavia si sono aggiunte fasi di lavoro anche impreviste, che hanno permesso di avere una più chiara consapevolezza della cornice in cui la ricerca si sarebbe svolta e lo svolgimento di azioni a corredo di quelle previste. Per averne un quadro unitario, conviene quindi ripercorrere sinteticamente il lavoro svolto.

L'analisi iniziale della ricerca ha preso le mosse dallo stato dell'arte della didattica della FN, sezione poco frequentata dalla riflessione accademica, non solo a livello nazionale, a meno che non si eccettuino alcuni esempi di collaborazione scuola-università che si risolvono spesso in attività di laboratorio efficaci, ma territoriali, non sempre sistematiche e spesso inquadrare in prassi didattiche tradizionali a discrezione del docente di classe. Nell'ispezione sullo stato dell'arte della didattica della FN nella scuola secondaria di secondo grado è emerso che questa è spesso limitata da cause di diversa natura, riconducibili a cause istituzionali (scarsa valorizzazione della FN nelle linee guida per l'insegnamento), cause riconducibili agli strumenti didattici (libri di testo non aggiornati) e a cause di contesto legate alla scarsa formazione/aggiornamento dei docenti titolari delle cattedre di fisica. Ciò ha una ripercussione sull'alfabetizzazione nucleare degli studenti che spesso si colloca al di sotto di valori di accettabilità. Questo risultato, ottenuto tramite un sondaggio effettuato su un campione ampio comprendente studenti dell'ultimo anno del liceo o del primo anno di corso STEM, è ancor più significativo se si considera che gli studenti che hanno seguito anche poche ore di FN in percorsi didattici curricolari al liceo si collocano in una fascia alta di punteggio del questionario proposto. Questo dato ha permesso di individuare un segmento di operatività per il progetto

di ricerca, in quanto ha reso evidente che la didattica della FN a liceo non solo è possibile, ma può anche avere effetti estremamente positivi sulle popolazioni di studenti coinvolti. A fianco di questa ricognizione è stata anche svolta un'analisi sull'influenza di genere nell'acquisizione di conoscenze di FN da parte di classi liceali. Se in generale emerge una lieve discrepanza tra gli esiti delle popolazioni cis-maschile e cis-femminile a svantaggio delle seconde, indipendentemente da altri fattori (numerosità della classe, fascia di punteggio, ...), è anche vero che in classi a scarsa presenza cis-femminile questo fenomeno è più contenuto. Per motivare questo comportamento sono state fatte ipotesi che meritano un'indagine più ampia, su un campione selezionato con criteri più restrittivi e che tengano conto di fattori che in questo primo monitoraggio non sono stati presi in considerazione.

A fianco di queste attività iniziali, è stato anche rielaborato il materiale del corso "Armi nucleari, disarmo e proliferazione nucleare", tenuto dal Prof. Paolo Cotta-Ramusino. Dopo essere stato seguito completamente nella sua ultima edizione, il corso è stato messo al vaglio per questa ricerca e in particolare i materiali forniti dal docente in forma di dispense sono stati rivisti, ampliati, riorganizzati in forma di sito (disnuc.fisica.unimi.it) nella pagina web di dipartimento, al fine di renderli fruibili da un pubblico vasto soprattutto attraverso dispositivi mobili (table, smartphone). La struttura del sito è agile e i contenuti presentati sintetici e di facile consultazione. Allo stesso tempo presenta numerosi collegamenti interni ed esterni al sito stesso a contenuti spesso dettagliati e con informazioni spesso di difficile reperimento. Nonostante sia accessibile a ogni tipologia di utente, il sito è principalmente pensato per studenti, insegnanti e in generale per comunità educative. Lì infatti vi trovano spazio le lezioni del Prof. Cotta suddivise nelle sezioni: La bomba, La proliferazione e i primi trattati, Missili, trattati e disarmo, Strategie nucleari, Rischi e controversie internazionali, Fisici e movimenti per il disarmo. Questa parte è arricchita da una quarantina di pagine principalmente con contenuti di storia della bomba nucleare, che il candidato ha appositamente creato per il sito. Anche questa parte è suddivisa in sezioni: Le prime scoperte, La Germania, La notizia bomba in America, Il Progetto Manhattan, Il Giappone, La guerra fredda, L'U.R.S.S., Archivio nucleare, Associazioni per il disarmo.

Il prosieguo del lavoro ha riguardato nello specifico la didattica della FN, con l'intento di sviluppare un corso di lezioni per studenti della scuola secondaria di secondo grado e attività di formazione e aggiornamento per i docenti. Oltre agli obiettivi didattici individuati a livello istituzionale, italiano e europeo, due sono state le principali finalità che si intendevano realizzare con il corso: lo sviluppo di un pensiero critico per la spiegazione di fenomeni di FN e l'inclusione degli interi gruppi-classe nei processi di apprendimento.

Per quel che riguarda la prima finalità si è cercato di costruire un percorso con contenuti, strumenti didattici, modalità di insegnamento e setting di apprendimento organizzati in modo da favorire negli studenti possibilità di riflessione o dinamiche di confronto peer to peer tipiche dell'active learning. Questo approccio ha permesso di strutturare una serie di lezioni versatili, che si sono ben adattate a contesti formali e informali, curricolari o extracurricolari, obbligatori o facoltativi e facilmente replicabili. Nel corso del lavoro si è precisato che l'insegnamento della FN non è inteso come un'introduzione rigorosa, di tipo accademico, alla sezione di FN, come potrebbe essere svolta in ambito accademico. Lo scopo del lavoro è stato quello di far acquisire conoscenze di base, capacità di leggere e interpretare dati, di permettere di formulare leggi semplici in forma analitica o grafica e di immaginare

modelli elementari per la spiegazione dei fenomeni, inquadrando l'intera sezione di FN nel suo sviluppo storico. I contenuti fondamentali della FN (nomenclatura e descrizione del nucleo, energia di legame e potenziale nucleare, instabilità, decadimenti nucleari, fissione e fusione) sono stati quindi organizzati in modo da essere veicolati più attraverso riflessioni e discussioni attorno a questionari, quesiti e problemi che non attraverso un insegnamento frontale. Contrariamente a quanto sviluppato nei manuali scolastici in uso nei licei, si è privilegiato un approccio di tipo energetico per la spiegazione dei fenomeni nucleari, senza imporre una descrizione apodittica a cui spesso si rifanno le prassi didattiche della scuola secondaria. Nella progettazione delle lezioni si è quindi fatto riferimento a modelli pedagogici funzionalisti, adatti alla valorizzazione dell'active learning. Non potendo immaginare attività di laboratorio in senso stretto per motivi di radioprotezione, almeno non per un corso che ambiva ad essere versatile e facilmente replicato, sono stati appositamente progettati, realizzati e nei casi più innovativi anche validati, diversi materiali didattici (questionari, cloze, puzzle, problemi) che si sono sostituiti al laboratorio e alle dinamiche di gioco previste dalla pedagogia funzionalista basata sul *learning by doing*. Per la formulazione di questi materiali si è guardato all'Inquiry Based Learning come metodologia didattica a cui è stata affiancata la riflessione pragmatistica di Charles S. Peirce e in particolare quella sviluppata attorno al concetto di faneron, presa inizialmente come modello per la comprensione dei processi cognitivi e poi come riferimento per la declinazione pedagogica della faneroscopia.

La seconda finalità centrata sull'inclusione scolastica è stata realizzata concependo fasi di lavoro individuali alternate a fasi di lavoro in gruppo. Le attività sono quindi pensate anche per momenti di riflessione e confronto all'interno di un piccolo gruppo di due/tre studenti, in cui un leader guida il confronto senza inibire i contributi dei compagni e, anzi, cercando di motivare e coinvolgere anche gli elementi più deboli. In questi dibattiti peer to peer e per la risoluzione di problematiche complesse è stato anche pensato l'utilizzo di ausili (appunti, libro di testo, smartphon e internet), come riferimento per la rielaborazione di concetti sviluppati autonomamente dagli studenti.

Le lezioni sono state inizialmente testate con due gruppi di studenti liceali, divisi in una classe test e una classe di controllo, coinvolte in un progetto pomeridiano extracurricolare. Gli studenti della classe test hanno seguito le lezioni sul progetto sopra esposto, mentre quelli della classe di controllo hanno seguito un percorso tradizionale (lezioni frontali di FN, sugli stessi argomenti). L'apprendimento dei concetti e lo sviluppo di competenze per la risoluzione di problemi di FN ha consentito di validare il corso proposto, la cui efficacia è emersa in modo netto. Questo primo esperimento didattico è stato anche un'occasione per correggere e rifinire le lezioni già progettate, in particolare in merito alle tempistiche da adottare e all'individuazione degli snodi concettuali più difficili da comunicare. Si è quindi imposta una revisione delle lezioni a cui è poi seguita una seconda sperimentazione in aula. Le lezioni in questo caso hanno costituito una parte del percorso curricolare mattutino e sono state svolte in una classe quinta di un liceo scientifico. L'attività di insegnamento si è sviluppata come la precedente, in modo più fluido e con maggior consapevolezza da parte del docente delle potenzialità del progetto. Al termine delle lezioni sono state svolte anche prove di valutazione, orale e scritta, che hanno fornito anche una validazione, seppur parziale, del processo didattico sviluppato. I risultati infatti sono stati coerenti con quelli pregressi della classe: al di là di sporadici casi negativi, gli esiti riflettevano l'eterogeneità di composizione

della classe, anche se per tutti era risultato evidente un incremento di profitto sia in termini di possesso delle conoscenze che di acquisizione delle competenze. I risultati di un questionario di gradimento hanno confermato l'efficacia della proposta anche per gli stessi studenti. Gli esiti delle prove e i risultati dei questionari di gradimento non si prestano a considerazioni statistiche robuste, data la bassa numerosità della platea degli studenti. Tuttavia i dati ricavati si sono disposti in un quadro coerente ed estremamente positivo che ha permesso di perfezionare il percorso in alcuni passaggi, anche in vista di una sua possibile replicazione.

Sulla scorta di questa esperienza si è successivamente progettato un corso di formazione/aggiornamento in FN indirizzato ai docenti di matematica e fisica dei licei. Attraverso l'interlocuzione e una fase preliminare di co-progettazione coi docenti, il corso è stato successivamente realizzato nell'alveo del PNRR per una rete di licei e ha coinvolto una trentina di docenti, in tre moduli da dieci ore ciascuno, con diversi formatori provenienti dal mondo accademico, della ricerca, dell'industria e più in generale della filiera del nucleare. Il primo di questi ha affrontato i rudimenti di FN, seguendo il percorso didattico già attuato con gli studenti e si è concluso con due lezioni sulle attività di FN nell'ambito della ricerca di base e della fisica sanitaria. Nel secondo è stato dato spazio alle applicazioni di FN in campo archeometrico, ambientale, astrofisico e ai processi di produzione di energia (fissione e fusione) e al trattamento dei rifiuti. Per favorire la pianificazione didattica dei docenti sono state prodotte dispense tematiche che ripercorrono per rapidi cenni la storia plurimillennaria dell'atomismo, dalle prime ipotesi della scuola eleatica, passando per le conquiste prima dell'alchimia medievale e rinascimentale e poi dalla chimica settecentesca. Questi materiali consentono al docente interessato di organizzare un percorso ragionato e completo, dall'atomo al nucleo, che può reperire facilmente sul sito disnuc.fisica.unimi.it.

L'ultimo modulo, aperto anche a docenti di altre aree disciplinarie e a studenti suddivisi in piccoli gruppi di lavoro, è stato centrato sulle tematiche delle armi nucleari e del disarmo, seguendo la linea del corso del Prof. Cotta Ramusino, dell'ampliamento svolto e facendo uso di tutti quei materiali realizzati in questo progetto di ricerca (sito web disnuc.fisica.unimi.it, pubblicazioni, partecipazioni a congressi, lezioni nei licei, incontri di disseminazione in contesti informali). Si è cercato di abbracciare anche tematiche inerenti allo sviluppo storico del dopoguerra che in qualche modo hanno subito l'influsso degli eventi precedenti o successivi al bombardamento delle città giapponesi nel II conflitto mondiale. Sono così state richiamate esperienze di stampo artistico, letterario e filosofico affiancate a ricerche inerenti all'attuale contesto geo-politico internazionale condotte dagli studenti sulla base di materiali suggeriti dal docente, ma non solo, rielaborati criticamente anche in chiave di cittadinanza e pensate per una ripetizione dell'esperienza nelle ore di educazione civica.

Ognuno dei moduli è stato terminato con la compilazione da parte dei partecipanti di un questionario di gradimento, i cui risultati sono stati più che positivi e che hanno messo in luce criticità ridotte e facilmente correggibili in una eventuale riedizione del corso.

Durante il secondo e terzo anno di dottorato, a fianco delle attività di ricerca sopra riassunte, è iniziata un'interlocuzione con le istituzioni governative, principalmente il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) e il Ministero dell'Istruzione e del Merito (MIM), in cui si è discusso anche questo progetto di ricerca, sia per i suoi aspetti didattici, che per la possibilità fornita alla cultu-

ra del nucleare di diffondersi in ambiti non solo strettamente scolastici. Ciò ha permesso di partecipare alla piattaforma prevista dal Piano Nazionale per il Nucleare Sostenibile (PNNS) e in particolare ai gruppi di lavoro GdL_6 (formazione) e GdL_7 (comunicazione) con contributi specifici appositamente redatti, in merito alle questioni della formazione pre-diploma in FN e allo sviluppo di modalità di comunicazione innovativa tese a una maggior accettabilità sociale delle applicazioni della FN in ambito energetico. Le relazioni finali, pubblicate dal MASE, sono infine confluite nella legge delega “Nucleare Sostenibile” del 28 febbraio 2025.

Al termine di questo lavoro è possibile pertanto concludere con alcune osservazioni:

- quando attuate, le esperienze didattiche di FN nella scuola secondaria di secondo grado danno esiti fortemente positivi; nonostante l’insegnamento della FN per cause diverse non sia né favorito a livello normativo né abitualmente praticato,
- la progettazione di un corso di lezioni di FN con elementi innovativi sia per l’impianto pedagogico, che per la scelta degli strumenti e delle modalità didattiche ha consentito la realizzazione a più riprese di lezioni di FN per studenti liceali, con un buon esito in termini di successo formativo e gradimento degli studenti;
- lo svolgimento di un corso di formazione su temi di FN per docenti della scuola secondaria di secondo grado ha permesso l’emersione di un interesse da parte dei docenti a colmare e/o rifinire il proprio profilo di competenze professionali e al tempo stesso ha messo in evidenza che la didattica della FN nella scuola, in modo non estemporaneo o su scala territoriale, è non solo possibile, ma auspicata e sostenuta dalla componente dei docenti delle scuole;
- l’interlocuzione con le istituzioni ha evidenziato che dove viene reso possibile il confronto tra i diversi stakeholder della filiera del nucleare, compresi quelli dell’istruzione e della formazione, si dà avvio a dinamiche positive che generano strumenti utili ai processi decisionali finalizzati alla diffusione della cultura del nucleare e alle applicazioni della filiera del nucleare.

Attualmente le prospettive di questa esperienza si collocano in diversi ambiti:

- la ricerca svolta ha contribuito a proporre la candidatura dell’Università degli Studi di Milano all’avviso pubblico del Dipartimento per le Pari Opportunità della Presidenza del Consiglio “Per il finanziamento di progetti innovativi di formazione sulle discipline STEM per il personale docente al fine di favorire lo sviluppo delle competenze stem nelle studentesse e negli studenti STEM università 2024” con il progetto STEM4YOU didattico rivolto alle scuole superiori di I e II grado;
- in un’eventuale riedizione dei corsi, sia per studenti, sia per docenti, sarà possibile valutare un ampliamento delle attività, in forma modulare e/o a scelta, introducendo laboratori didattici di FN, visite a enti di ricerca e centri di stoccaggio, summer school in fisica nucleare, avvalendosi della disponibilità di

enti (SOGIN; Ansaldo nucleare, dipartimenti universitari) e del loro personale che già si adoperano sul fronte della divulgazione e della disseminazione della FN;

- i materiali e i percorsi didattici sviluppati possono in linea di principio essere perfezionati, aggiornati, arricchiti di nuovi contributi anche sfruttando progetti di ricerca analoghi (laurea, dottorati), anche per ulteriori validazioni;
- sul fronte della cultura del disarmo il sito disnuc.fisica.unimi.it merita un continuo aggiornamento e una visibilità sempre maggiore presso le comunità educative (scuole, università, enti ed associazioni che lavorano per la pace).

Appendici

Elenco appendici

- App. 1 – Questionario per studenti del I anno di università corsi STEM
- App. 2 – Questionario per studenti del V anno del liceo scientifico
- App. 3 – Questionario di fisica del nucleo
- App. 4 – Puzzle
- App. 5 – Questionario potenziale nucleare
- App. 6 – Prova orale
- App. 7 – Prova scritta
- App. 8 – Questionario per docenti: atomismo antico e diatribe rinascimentali
- App. 9 – Questionario di chimica atomica
- App. 10 – Questionario di gradimento del corso di formazione per docenti M4C1I2.1-2023-1222-P-36049, modulo I
- App. 11 – Questionario di gradimento del corso di formazione per docenti M4C1I2.1-2023-1222-P 36049, modulo II
- All. 12 – Questionario di gradimento del workshop per docenti M4C1I2.1-2023-1222-P-36049, modulo III
- App. 13 – Questionario di gradimento del workshop per studenti M4C1I2.1-2023-1222-P-36049, modulo III
- App. 14 – Integrazioni ai file NW* per il sito disnuc.fisica.unimi.it – bozze
- App. 15 – Allegato 1 al documento finale del GdL6 della PNNS del MASE

QUESTIONARIO PER STUDENTI DEL I ANNO DI UNIVERSITÀ CORSI STEM

DOMANDE INIZIALI

- A. La tua età è:
minore o pari a 20 anni
strettamente maggiore di 20 anni
- B. Il tuo genere è:
Femminile
Maschile
Preferisco non specificare il genere
- C. La tua formazione scolastica complessiva precedente all'immatricolazione universitaria si è svolta principalmente:
In Italia
All'estero
- D. La tua formazione scolastica complessiva precedente all'immatricolazione universitaria si è svolta principalmente:
Al liceo classico
Al liceo scientifico opzione tradizionale
Al liceo scientifico opzione scienze applicate o altre sperimentazioni del liceo scientifico
Al liceo, né classico né scientifico
All'istituto tecnico indirizzo meccanica, mecatronica ed energia
All'istituto tecnico indirizzo elettronica ed elettrotecnica
All'istituto tecnico indirizzo chimica materiali e biotecnologie
All'istituto tecnico, ma di indirizzo differente rispetto ai precedenti elencati
Nei corsi di formazione professionale
Altro
- E. Nella tua formazione scolastica precedente all'immatricolazione universitaria hai affrontato una sezione di fisica nucleare?
Sì
No
- F. Nella tua formazione scolastica precedente all'immatricolazione universitaria quante ore sono state dedicate alla fisica nucleare?
0
da 1 a 5
da 6 a 10
oltre 10

QUESTIONARIO

(X risposta corretta)

1. Un atomo è costituito:
solo da protoni e neutroni
da protoni, neutroni ed elettroni X
solo da neutroni ed elettroni
solo da elettroni e protoni
2. Un nucleo è costituito:
solo da protoni e neutroni X
da protoni, neutroni ed elettroni
solo da neutroni ed elettroni
solo da elettroni e protoni
3. Gli isotopi di un elemento contengono:
lo stesso numero di protoni X
lo stesso numero di neutroni
lo stesso numero di protoni e neutroni
un numero variabile di protoni e neutroni
4. Un isotopo:
è necessariamente stabile
può essere stabile o instabile X
è necessariamente instabile
decade necessariamente in un altro isotopo
5. L'azoto 15 nel nucleo contiene:
8 protoni
9 protoni
8 neutroni X
14 elettroni
6. La legge del decadimento radioattivo, che fornisce il numero di nuclei di un radioisotopo in funzione del tempo, è:
lineare
quadratica
logaritmica
esponenziale X
7. I decadimenti nucleari sono:
di un tipo
di due tipi
di tre tipi X
di quattro tipi

8. In un decadimento α :
- il nucleo prodotto ha sempre un numero di neutroni maggiore di quello del nucleo padre
 - il nucleo prodotto ha sempre un numero di neutroni minore di quello del nucleo padre **x**
 - il nucleo prodotto ha sempre un numero di protoni maggiore di quello del nucleo padre
 - viene sempre emesso un neutrino o un antineutrino
9. In un decadimento β :
- il peso atomico varia sempre
 - il nucleo prodotto ha sempre un numero di neutroni minore di quello del nucleo padre
 - il nucleo prodotto ha sempre un numero di protoni maggiore di quello del nucleo padre
 - viene sempre emesso un neutrino o un antineutrino **x**
10. La una zona della tavola isotopica a cui tendono i nuclei instabili dopo un decadimento nucleare:
- è detta valle di stabilità **x**
 - è quella caratterizzata dal valore minimo di energia a seguito di un decadimento beta
 - è quella caratterizzata dal valore minimo di energia a seguito di un decadimento gamma
 - è quella caratterizzata dal valore minimo di energia a seguito di un decadimento alfa
11. I raggi γ sono:
- radiazione elettromagnetica ad alta energia **x**
 - positroni
 - nuclei di idrogeno
 - nuclei di elio
12. In un decadimento, la vita media è il tempo dopo il quale un numero N di nuclei si riduce a:
- $N/\sqrt{2}$
 - $N/2$
 - N/e **x**
 - N/π
13. L'attività di un radionuclide si misura in:
- Becquerel **x**
 - Sievert
 - Fermi
 - Geiger
14. La dose assorbita si misura in:
- Curie
 - Gray **x**
 - Segré
 - Rutheford
15. Il termine nucleino:
- indica un elettrone
 - indica un positrone
 - non indica nulla di particolare **x**
 - indica indistintamente un neutrino o un antineutrino

16. Il termine nucleone:
indica indistintamente un muone o un pione
indica un nucleo nella fase di fissione
non indica nulla di particolare
indica indistintamente un neutrone o un protone **x**
17. Gli isotopi di un elemento contengono:
un numero variabile di protoni e neutroni
lo stesso numero di neutroni
lo stesso numero di protoni e neutroni
lo stesso numero di protoni **x**
18. I neutrini sono prodotti nei
decadimenti α
decadimenti β **x**
decadimenti γ
nei decadimenti α e β
19. La classificazione IAEA del 1981 suddivide le scorie nucleari:
in due categorie: a bassa e alta attività
in due categorie: a basso e alto pericolo
in tre categorie: a basso, medio e alto rischio
in tre categorie: a bassa, media e alta attività **x**
20. Se le scorie di alto livello prodotte dall'industria nucleare mondiale in tutta la storia dell'umanità fossero stoccate in un unico volume, occuperebbero circa:
50 vagoni ferroviari **x**
uno stadio pari a quello di S. Siro
dieci stadi pari a quello di S. Siro
il volume della Luna
21. I neutrini sono prodotti nei
decadimenti β **x**
nei decadimenti α e β
decadimenti γ
decadimenti α
22. Gli incidenti storici che hanno coinvolto reattori nucleari sono:
due: Chernobyl e Fukushima
tre: Chernobyl, Fukushima e Three Mile Island **x**
tre: Chernobyl, Fukushima e Creys-Malville (SuperPhoenix)
tre: Chernobyl, Fukushima e Sendai
23. In generale si può affermare che:
la fissione riguarda i nuclei leggeri e la fusione i nuclei pesanti
la fissione riguarda i nuclei pesanti e la fusione i nuclei leggeri **x**
fissione e fusione sono processi che possono coinvolgere due nuclei qualsiasi

fissione e fusione coinvolgono tutti i nuclei ma dello stesso tipo, leggeri con leggeri, pesanti con pesanti

24. I raggi γ sono:

- positroni
- nuclei di elio
- radiazione elettromagnetica ad alta energia **x**
- nuclei di idrogeno

25. Oltre alla chemioterapia e alla radioterapia, i tumori possono essere curati:

- solo con elettroni
- solo con protoni
- con protoni e neutroni **x**
- con neutroni e elettroni

26. Un'applicazione basata sulla fisica nucleare è:

- la vaccinazione controllata
- la sterilizzazione della posta cartacea **x**
- la depigmentazione del derma
- la produzione di psicofarmaci

27. Per quale comparto nel contratto di lavoro è prevista una dose di radiazione annua superiore a quella del cittadino comune:

- personale aereo **x**
- lavoratori dello spettacolo
- metalmeccanici
- chimici

28. una testata nucleare tattica da 20 megatoni libera nei primi istanti di esplosione una energia equivalente a:

- quella di 20 milioni di tonnellate di tritolo **x**
- 2×10^{10} J
- l'equivalente di 10 milioni di barili di petrolio
- circa 200 TWh pari a un terzo dell'energia consumata dall'umanità nel 2019

QUESTIONARIO PER STUDENTI DEL V ANNO DEL LICEO SCIENTIFICO

DOMANDE INIZIALI

- A. La tua età è:
minore o pari a 19 anni
strettamente maggiore di 19 anni
- B. Il tuo genere è:
cis-femminile
cis-maschile
Preferisco non specificare il genere
- C. La tua formazione nel triennio della scuola superiore si è svolta principalmente:
nello stesso istituto e nella stessa classe
nello stesso istituto ma in classi diverse
in diversi istituti
altro
- D. Nella tua formazione scolastica hai affrontato una sezione di fisica nucleare?
Sì
No
- E. Nella tua formazione scolastica precedente all'immatricolazione universitaria quante ore sono state dedicate alla fisica nucleare?
0
da 1 a 5
da 6 a 10
oltre 10

QUESTIONARIO

(X risposta corretta)

1. Un atomo è costituito:
solo da protoni e neutroni
da protoni, neutroni ed elettroni X
solo da neutroni ed elettroni
solo da elettroni e protoni
2. Un nucleo è costituito:
solo da protoni e neutroni X
da protoni, neutroni ed elettroni
solo da neutroni ed elettroni
solo da elettroni e protoni
3. Gli isotopi di un elemento contengono:
lo stesso numero di protoni X
lo stesso numero di neutroni
lo stesso numero di protoni e neutroni
un numero variabile di protoni e neutroni
4. Un isotopo:
è necessariamente stabile
può essere stabile o instabile X
è necessariamente instabile
decade necessariamente in un altro isotopo
5. L'azoto 15 nel nucleo contiene:
8 protoni
9 protoni
8 neutroni X
14 elettroni
6. La legge del decadimento radioattivo, che fornisce il numero di nuclei di un radioisotopo in funzione del tempo, è:
lineare
quadratica
logaritmica
esponenziale X
7. I decadimenti nucleari sono:
di un tipo
di due tipi
di tre tipi X
di quattro tipi

8. In un decadimento α :
- il nucleo prodotto ha sempre un numero di neutroni maggiore di quello del nucleo padre
 - il nucleo prodotto ha sempre un numero di neutroni minore di quello del nucleo padre **x**
 - il nucleo prodotto ha sempre un numero di protoni maggiore di quello del nucleo padre
 - viene sempre emesso un neutrino o un antineutrino
9. In un decadimento β :
- il peso atomico varia sempre
 - il nucleo prodotto ha sempre un numero di neutroni minore di quello del nucleo padre
 - il nucleo prodotto ha sempre un numero di protoni maggiore di quello del nucleo padre
 - viene sempre emesso un neutrino o un antineutrino **x**
10. La una zona della tavola isotopica a cui tendono i nuclei instabili dopo un decadimento nucleare:
- è detta valle di stabilità **x**
 - è quella caratterizzata dal valore minimo di energia a seguito di un decadimento beta
 - è quella caratterizzata dal valore minimo di energia a seguito di un decadimento gamma
 - è quella caratterizzata dal valore minimo di energia a seguito di un decadimento alfa
11. I raggi γ sono:
- radiazione elettromagnetica ad alta energia **x**
 - positroni
 - nuclei di idrogeno
 - nuclei di elio
12. In un decadimento, la vita media è il tempo dopo il quale un numero N di nuclei si riduce a:
- $N/\sqrt{2}$
 - $N/2$
 - N/e **x**
 - N/π
13. L'attività di un radionuclide si misura in:
- Becquerel **x**
 - Sievert
 - Fermi
 - Geiger
14. La dose assorbita si misura in:
- Curie
 - Gray **x**
 - Segré
 - Rutheford
15. Il termine nucleino:
- indica un elettrone
 - indica un positrone
 - non indica nulla di particolare **x**

indica indistintamente un neutrino o un antineutrino

16. Il termine nucleone:

- indica indistintamente un muone o un pione
- indica un nucleo nella fase di fissione
- non indica nulla di particolare
- indica indistintamente un neutrone o un protone **x**

17. Gli isotopi di un elemento contengono:

- un numero variabile di protoni e neutroni
- lo stesso numero di neutroni
- lo stesso numero di protoni e neutroni
- lo stesso numero di protoni **x**

18. I neutrini sono prodotti nei

- decadimenti α
- decadimenti β **x**
- decadimenti γ
- nei decadimenti α e β

19. La classificazione IAEA del 1981 suddivide le scorie nucleari:

- in due categorie: a bassa e alta attività
- in due categorie: a basso e alto pericolo
- in tre categorie: a basso, medio e alto rischio
- in tre categorie: a bassa, media e alta attività **x**

20. Se le scorie di alto livello prodotte dall'industria nucleare mondiale in tutta la storia dell'umanità fossero stoccate in un unico volume, occuperebbero circa:

- 50 vagoni ferroviari **x**
- uno stadio pari a quello di S. Siro
- dieci stadi pari a quello di S. Siro
- il volume della Luna

21. I neutrini sono prodotti nei

- decadimenti β **x**
- nei decadimenti α e β
- decadimenti γ
- decadimenti α

22. Gli incidenti storici che hanno coinvolto reattori nucleari sono:

- due: Chernobyl e Fukushima
- tre: Chernobyl, Fukushima e Three Mile Island **x**
- tre: Chernobyl, Fukushima e Creys-Malville (SuperPhoenix)
- tre: Chernobyl, Fukushima e Sendai

23. In generale si può affermare che:

- la fissione riguarda i nuclei leggeri e la fusione i nuclei pesanti
- la fissione riguarda i nuclei pesanti e la fusione i nuclei leggeri **x**

fissione e fusione sono processi che possono coinvolgere due nuclei qualsiasi
fissione e fusione coinvolgono tutti i nuclei ma dello stesso tipo, leggeri con leggeri, pesanti con pesanti

24. I raggi γ sono:

- positroni
- nuclei di elio
- radiazione elettromagnetica ad alta energia **x**
- nuclei di idrogeno

25. Oltre alla chemioterapia e alla radioterapia, i tumori possono essere curati:

- solo con elettroni
- solo con protoni
- con protoni e neutroni **x**
- con neutroni e elettroni

26. Un'applicazione basata sulla fisica nucleare è:

- la vaccinazione controllata
- la sterilizzazione della posta cartacea **x**
- la depigmentazione del derma
- la produzione di psicofarmaci

27. Per quale comparto nel contratto di lavoro è prevista una dose di radiazione annua superiore a quella del cittadino comune:

- personale aereo **x**
- lavoratori dello spettacolo
- metalmecanici
- chimici

28. una testata nucleare tattica da 20 megatoni libera nei primi istanti di esplosione una energia equivalente a:

- quella di 20 milioni di tonnellate di tritolo **x**
- 2×10^{10} J
- l'equivalente di 10 milioni di barili di petrolio
- circa 200 TWh pari a un terzo dell'energia consumata dall'umanità nel 2019

29. Accetto la policy dell'Università degli Studi di Milano in merito al trattamento dei dati e della loro archiviazione

Sì

QUESTIONARIO FISICA DEL NUCLEO

Fisica del nucleo

Si richiede di rispondere alle seguenti domanda, rispettando il numero massimo di righe indicato.

1. Nel 1932 Carl David Anderson rivela il positrone, una particella con le proprietà dell'elettrone, ma di carica positiva. Nel 1933 Jean Thibaud fa collidere un fascio di positroni con un fascio di elettroni, misurando emissione di energia elettromagnetica. La reazione può essere scritta come:

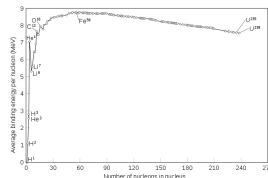


Si spieghi il fenomeno e si valuti quantitativamente l'energia emessa. [max 3 righe]

2. Si determini l'energia di legame dei nucleoni del deuterio, sapendo che le masse del protone, del neutrone e del deutone valgono in u.m.a. rispettivamente $m_p=1.0078$, $m_n=1.0087$ e $m_D=2.0141$ [max 2 righe]

3. Ipotizza la forma di un potenziale nucleare (anche graficamente), motivando la risposta data. [max 3 righe]

4. Alla luce del grafico seguente e del principio di indeterminazione $\Delta p \cdot \Delta x \approx \hbar$ si dimostri che non può contenere elettroni come particelle costituenti? (Suggerimento: si ricordi la relazione relativistica per l'energia totale di un corpo di massa a riposo m : $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$) [max 4 righe] **con ausilio**



Puzzle

Si richiede di completare i campi indicati dalle lettere maiuscole (A, B, C, ...) con una delle proposte numerate al termine del brano.

IL MODELLO DI THOMSON

Il modello atomico di Thomson

Lo scattering X e altre evidenze sperimentali ricavate fino al 1910, come quelle ottenute dall'effetto fotoelettrico, permisero a Joseph John Thomson (1856-1940) di formulare un modello ipotetico per l'atomo, che si impose su quelli diffusi in letteratura.

Questo modello, spesso banalizzato col termine "modello a panettone", introduce alcune ipotesi cruciali anche per la modellazione successiva, che possono così essere riassunte:

- L'atomo è generalmente neutro
- La carica positiva in esso contenuta è in modulo pari a quella negativa
- La carica positiva è distribuita in modo omogeneo nell'atomo
- Le cariche negative - gli elettroni - sono particelle minuscole, localizzate, immerse nell'atomo positivo
- Gli elettroni possono muoversi liberamente nell'atomo.

Nello spazio l'atomo occupa una regione sferica il cui raggio è dell'ordine di 10^{-10} m.

A

[Fig. 1].

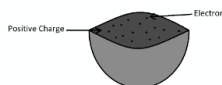


Fig. 1: schematizzazione di una sezione dell'atomo di Thomson

Il moto degli elettroni

Per quel che riguarda il moto degli elettroni Thomson ipotizzò che nello stato fondamentale dell'atomo occupano una posizione fissata di equilibrio. Quando l'atomo è in uno stato eccitato dovuto per esempio all'alta temperatura, gli elettroni vibrano attorno a una posizione di equilibrio. Si può dimostrare che se l'elettrone è posto a una distanza a dal centro della sfera, la forza F che esso subisce è data da $F = -ka$.

B

L'esperimento di Rutheford-Geiger-Marsden

Uno degli studenti più brillanti di Thomson, Ernest Rutheford (1871-1937), investigò più in profondità la materia, tramite l'esperimento che porta il suo nome e che restituì informazioni sulla struttura fine dell'atomo. Sostenuto dagli assistenti Geiger e Marsden, nel 1909 Rutheford elaborò questo setup sperimentale. Un fascio di particelle α emesse da decadimenti di nuclei radioattivi e doppiamente ionizzate viene collimato e diretto contro una lamina d'oro, che viene quasi completamente attraversata dal fascio.

C

I nuclei di elio che interagiscono con il metallo vengono deviati e rilasciano una traccia su uno schermo ricoperto da solfuri di zinco (ZnS) [Fig. 2].

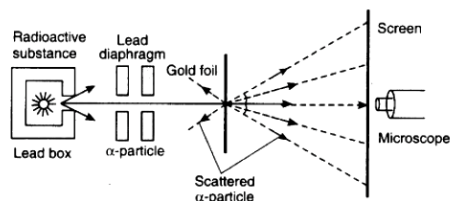


Fig. 2: schematizzazione dell'esperimento di Rutheford

Le tracce rilasciate sullo schermo possono essere conteggiate tramite un microscopio in funzione dell'angolo di deviazione. Ciò che si evidenzia è che la maggior parte delle particelle α non subisce nessuna deviazione dalla traiettoria iniziale, mentre alcune vengono deviate e altre retrodiffuse [Fig. 3].

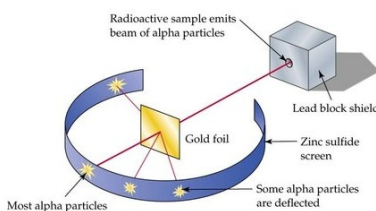


Fig. 3: la maggior parte delle particelle del fascio non subiscono deviazioni, alcune vengono deviate, altre retrodiffuse

Questi risultati permettono di trarre diverse conclusioni sulla composizione microscopica della materia.

Vantaggi e limiti del modello di Thomson

D

Le particelle che vengono deviate sono quelle che, avvicinandosi agli atomi del reticolo, subiscono un'interazione elettrostatica. Si mostra facilmente che il modello di Thomson risulta inadeguato all'interpretazione di queste deflessioni [Fig. 4].

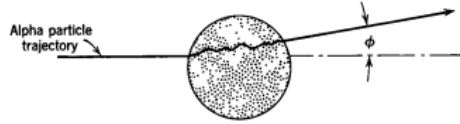


Fig. 4: rappresentazione dell'esito di un'interazione di una particella α con un atomo di Thomson

Nell'ipotesi che i nuclei di elio siano devianti dagli elettroni di massa molto inferiore presenti nell'atomo, gli angoli di scattering in un eventuale urto elastico sarebbero minimi e non confrontabili con quelli misurati sperimentalmente. Qualora si ipotizzasse che la deviazione delle particelle α sia invece dovuta all'interazione elettrostatica con la carica positiva, si otterrebbero anche in questo caso valori molto ridotti per gli angoli di scattering, dato che la carica positiva nell'atomo di Thomson è diffusa su un volume sferico avente un raggio dell'ordine di 10^{-10} m.

Si possono dare valutazioni quantitative degli angoli di scattering, ipotizzando una semplice modellazione del problema e utilizzando il modello di Thomson. Sia N il numero di atomi con cui una singola particella α interagisce attraversando la lamina in un esperimento di Rutherford. Si può valutare la deviazione angolare θ subita da una particella α rispetto alla sua traiettoria iniziale e dovuta a una singola interazione con un atomo del reticolo di numero atomico Z . L'angolo θ indotto da una sfera uniformemente carica di raggio r è legato alla variazione relativa di impulso $F\Delta t$ dalla relazione:

$$\sin\theta = \frac{\Delta p}{p} = \frac{F\Delta t}{p}$$

dove $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{r^2}$ è la forza determinata dalla interazione coulombiana, e $\Delta t = \frac{2r}{v}$ è il tempo di interazione della particella α in moto a velocità v con l'atomo [Fig. 5].

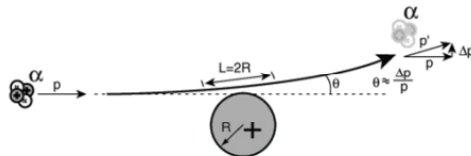


Fig. 5: cinematica dell'interazione tra particelle α , con impulso p , e un atomo di Thomson

Si ottiene quindi:

$$\sin\theta = \frac{F\Delta t}{p} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{r^2} \frac{1}{v} \frac{1}{mv} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{rK} \quad (1)$$

dove K è l'energia cinetica della particella α . Per un valore dell'energia cinetica pari a $K = 4.87 \cdot 10^6 \text{ eV}$ in un esperimento con bersaglio costituito da una targhetta d'oro ($Z = 89$, $r = 174 \text{ pm}$), dalla relazione (1) si ottiene per θ un valore pari a $\theta = 3.4 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$.

Questo risultato può essere confrontato con una valutazione sperimentale. Se con θ si indica la deviazione angolare subita dalla particella α dopo una singola interazione con un atomo e con Θ la deviazione totale dopo le interazioni con N atomi, allora la deviazione totale quadratica media $(\overline{\Theta^2})^{1/2}$ del fascio sarà data da [1]:

$$(\overline{\Theta^2})^{1/2} = \sqrt{N}(\overline{\theta^2})^{1/2} \quad (2)$$

dove $(\overline{\theta^2})^{1/2}$ misura la deviazione quadratica media dovuta a una singola interazione e $\sqrt{N}$ tiene conto della casualità della deflessione, in accordo con la distribuzione casuale degli eventi.

Se in un esperimento di Geiger-Marsden lo spessore della lamina d'oro è di $1 \mu\text{m}$ e l'angolo medio di scattering vale $(\overline{\Theta^2})^{1/2} \approx 1^\circ \approx 2 \cdot 10^{-2} \text{ rad}$, si può determinare dalla relazione (2) il valore dell'angolo θ e confrontarlo con quello precedentemente ricavato da considerazioni di tipo meccanico. Il numero N di atomi contenuti nella lamina è dato dal rapporto tra lo spessore della lamina e il diametro atomico:

$$N = \frac{10^{-6} \text{ m}}{10^{-10} \text{ m}} = 10^4$$

che sostituito nell'equazione (2) fornisce il risultato richiesto:

$$(\overline{\theta^2})^{1/2} = \frac{(\overline{\Theta^2})^{1/2}}{\sqrt{N}} = \frac{2 \cdot 10^{-2} \text{ rad}}{10^2} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$$

in buon accordo con la valutazione precedente ottenuta per via teorica.

Il modello di Thomson si rivela quindi capace di fornire un'adeguata descrizione dell'esperimento di Rutherford-Geiger-Marsden almeno per piccoli angoli. L'inadeguatezza del modello si rivela per angoli grandi, come è possibile dimostrare.

Si può infine concludere che il modello di Thomson presenta diversi vantaggi che possono così essere riassunti:

- L'atomo è costituito da cariche positive e negative
- In accordo con l'esperimento di Thomson, le cariche negative, gli elettroni, sono localizzati e distribuiti in una zona sferica omogenea di carica positiva
- Il moto degli elettroni attorno alla posizione di equilibrio è armonico e comporta l'emissione di radiazione ultravioletta. Questo comportamento è in disaccordo con i dati degli spettri di emissione, ma resta il fatto che l'emissione della radiazione è attribuita al moto degli elettroni
- Lo studio analitico della distribuzione angolare delle particelle α emesse in un esperimento di Geiger-Marsden permette di dimostrare che per piccoli angoli c'è completo accordo tra le previsioni del modello di Thomson e i dati sperimentali, mentre il modello si rivela inadeguato nella descrizione delle deflessioni per grandi angoli, superiori a 90° .

PROPOSTE DI SOSTITUZIONE

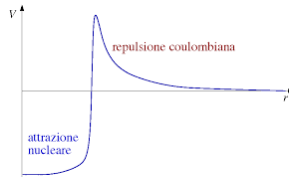
1. Una frazione elevata viene deviata dalla traiettoria iniziale, dato che le interazioni del fascio con il reticolo metallico sono molto numerose.
2. Questa forza è costante, ciò che rende uniformemente accelerato il moto dell'elettrone.
3. Questo può essere ricavato solo dalla densità dell'elemento e dal suo peso atomico, sfruttando il numero di Avogadro.
4. Il fatto che molte particelle del fascio vengano deviate comporta che per queste ci sia interazione con gli atomi del reticolo metallico e che quindi lo spazio vuoto tra un atomo e l'altro della lastra è trascurabile.
5. Il moto dell'elettrone è quindi rettilineo uniforme.
6. Questo può essere ricavato solo dal peso atomico dell'elemento, sfruttando il numero di Avogadro.
7. Una frazione ridotta viene deviata dalla traiettoria iniziale, dato che le interazioni del fascio con il reticolo metallico sono scarse.
8. Questa forza è costante e accoppiata alla velocità dell'elettrone genererà moti parabolici per l'elettrone internamente all'atomo.
9. Questa forza è proporzionale al vettore posizione dell'elettrone, di intensità proporzionale alla posizione, ciò che rende circolare il moto dell'elettrone.
10. Una frazione ridotta viene deviata dalla traiettoria iniziale, dato che il fascio è costituito da un numero ridotto di particelle α .
11. Questo può essere ricavato solo dalla densità dell'elemento, dal suo peso atomico e dal numero di moli.
12. Il fatto che molte particelle del fascio non vengano deviate comporta che per queste non ci sia interazione con gli atomi del reticolo metallico e che quindi lo spazio vuoto tra un atomo e l'altro della lastra non è trascurabile, anzi occupa una porzione significativa.
13. Il fatto che molte particelle del fascio vengano deviate comporta che per queste ci sia interazione con gli atomi del reticolo metallico nonostante lo spazio vuoto tra un atomo e l'altro della lastra non sia trascurabile.
14. Questa forza è opposta al vettore posizione dell'elettrone e quindi di richiamo e di intensità proporzionale alla posizione, ciò che rende armonico il moto dell'elettrone.
15. Una frazione ridotta viene deviata dalla traiettoria iniziale, dato che le interazioni del fascio con il reticolo metallico sono scarse. Questo può essere ricavato dalla densità dell'elemento e dal numero di moli, sfruttando il numero di Avogadro
16. Il fatto che molte particelle del fascio non vengano deviate nonostante lo spazio vuoto tra un atomo e l'altro della lastra non sia trascurabile, permette di formulare un'ipotesi sulla natura dell'etere che in realtà occupa lo spazio intermolecolare.

Risposte (fornite ai corsisti dopo la consegna del questionario compilato)

QUESITO	A	B	C	D
RISPOSTA	3	14	7	12

QUESTIONARIO POTENZIALE NUCLEARE

1. Rappresenta il solo potenziale elettrostatico generato da un nucleo in funzione della distanza
2. Rappresenta il solo potenziale nucleare generato dai nucleoni, in funzione della distanza
3. Copia il grafico riportato alla lavagna e discuti le tre situazioni proposte [max 5 righe]



- a) Energia E compresa tra il $E=E_{\min}$ e $E=0$
- b) Energia E compresa tra il $E=0$ e $E=E_{\max}$
- c) Energia superiore a $E=E_{\max}$

PROVA ORALE

Conoscenze/abilità:

Domanda	Risposta attesa	Note (risposta del candidato)
1 Completa e giustifica:		Candidato 2
${}_{74}^{182}W \rightarrow \dots + \alpha$	${}_{74}^{182}W \rightarrow {}_{72}^{178}Hf + \alpha$	Corretta e completa.
2 Completa e giustifica:		Candidato 4
${}_{74}^{159}W \rightarrow \dots + \alpha$	${}_{74}^{159}W \rightarrow {}_{72}^{155}Hf + \alpha$	Fatica a completare la reazione di decadimento
3 Completa e giustifica:		Candidato 3
${}_{90}^{236}U \rightarrow \dots + \dots$	${}_{90}^{236}U \rightarrow {}_{90}^{232}Th + \alpha$	Risponde correttamente
4 Come decade il tungsteno 159?		Candidato 1
${}_{74}^{159}W \rightarrow \dots$	${}_{74}^{159}W \rightarrow {}_{73}^{159}Ta + e^+ + \nu_e$	Risponde correttamente proponendo inizialmente il decadimento alfa, già sentito dal candidato 4, poi si corregge e propone i decadimenti beta.

Abilità (domanda rivolta al gruppo dei 4 candidati che possono confrontarsi tra loro senza ausili):

Domanda	Risposta attesa	Note (risposta del candidato)
Completa e giustifica:		Il gruppo si confronta a lungo (qualche minuto) per poi arrivare alla risposta corretta e giustificandola anche se con una motivazione non del tutto corretta. Nella spiegazione fornita, infatti, il gadolinio si trasforma in samario attraverso due decadimenti beta distinti. Gli studenti, non avendo mai visto il decadimento doppio beta hanno immaginato più
${}_{64}^{150}Gd \rightarrow {}_{62}^{150}Sm + \dots$	${}_{64}^{150}Gd \rightarrow {}_{62}^{150}Sm + 2e^+ + 2\nu_e$ Decadimento doppio beta.	

semplicemente la
successione di due
decadimenti beta che non un
unico doppio beta.

Abilità (domanda rivolta al gruppo dei 4 candidati che possono confrontarsi tra loro senza ausili):

Domanda	Risposta attesa	Note (risposta del candidato)
Sapendo che la vita media del neutrone libero è di circa 887 s, dopo quanto tempo 1000 neutroni si sono trasformati in 500 protoni?	Dopo un tempo pari al tempo di dimezzamento, ossia $\tau \ln 2 = 887s \ln 2 = 615 s$	Il gruppo lavora molto sulla scrittura delle leggi relative al decadimento, riprendendo sia l'equazione differenziale, sia la legge del decadimento. Le versioni offerte sono spesso contrassegnate da errori, anche solo dimensionali, che vengono discussi con il docente. La prova dimostra che gli studenti non hanno né abilità, né conoscenze di base in merito alla formalizzazione analitica dei fenomeni di decadimento.

Competenze (domanda rivolta al gruppo dei 4 candidati che possono confrontarsi tra loro e con l'ausilio degli appunti, del libro e della rete):

Domanda	Risposta attesa	Note (risposta del candidato)
Come si forma il nucleo di carbonio 12?	Attraverso il processo 3 alpha: prima si ha la trasformazione endogena ${}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^8_4\text{Be}$ Successivamente il berillio 8 con un nucleo di elio genera il carbonio 12 ${}^8_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + \text{energia}$ Il doppio processo produce un'energia di 7,272 MeV.	All'interno del gruppo nasce un confronto prolungato (circa dieci minuti) per la comprensione completa del processo, che al termine viene esposto ai compagni di classe, in una forma corretta anche se non completa.

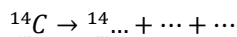
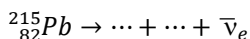
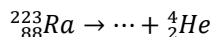
TESTO DELLA PROVA SCRITTA

Partecipanti: 14 studenti della classe quinta liceo.

I PARTE: Lo studente (o il gruppo) può utilizzare una calcolatrice scientifica non programmabile e la tavola periodica

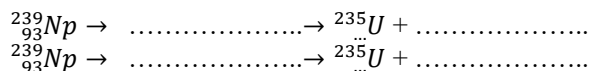
Sezione individuale

1. Completa i seguenti decadimenti:



2. Ipotizzando una catena di due decadimenti, in quali modi il ${}^{239}_{93}\text{Np}$ può decadere in ${}^{235}_{\dots}\text{U}$?

Completa:



3. Un numero di nuclei instabili N_0 decade con una vita media pari a $\tau = 1000$ anni. Quanto tempo è necessario affinché il numero di nuclei N_0 si riduca a un quarto del valore iniziale?

Sezione di gruppo

4. Esponi l'effetto tunnel. [max 7 righe]

Sezione di gruppo (con ausili)

II PARTE: Il gruppo può utilizzare una calcolatrice scientifica non programabile, la tavola periodica, gli appunti, il libro di testo e lo smartphone

Si risponda in modo esauriente a una delle due consegne [max. 10 righe]:

5. Perché i nuclei stabili pari-pari hanno una maggior energia di legame per nucleone dei nuclei pari-dispari e dei nuclei dispari-dispari?
6. Il metodo della datazione archeometrica con il radiocarbonio si basa sulla legge di decadimento esponenziale, ipotizzando che la concentrazione $\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}}$ all'equilibrio per un essere vivente sia costante e misurando la concentrazione nel reperto nell'istante in cui si compie la misura. É necessario, tuttavia, avere informazioni di tipo dendrocronologico. Si spieghi la problematica, fornendo una spiegazione esauriente.

Questionario per docenti: atomismo antico e moderno

A ogni domanda corrispondono 4 possibili risposte di cui una sola è corretta. Si richiede di compilare la seguente tabella:

QUESITO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RISPOSTA												

1. Il termine greco *atomon*:
 - A. è femminile e significa indivisibile
 - B. è neutro e significa impenetrabile
 - C. è maschile e significa impenetrabile
 - D. è neutro e significa indivisibile

2. I fondatori dell'atomismo antico furono:
 - A. Anassimandro e Leucippo
 - B. Democrito e Leucippo
 - C. Melisso e Democrito
 - D. Anassimandro e Democrito

3. I principali oppositori degli atomisti furono:
 - A. Protagora e Gorgia
 - B. Gli eleati
 - C. Gli aristotelici
 - D. I platonici

4. La principale divergenza che oppone atomisti e anti-atomisti riguarda:
 - A. L'indivisibilità dell'atomo
 - B. La natura dell'anima
 - C. La distinzione tra Essere e Non-Essere
 - D. La molteplicità dell'Essere

5. Per gli atomisti il moto degli atomi:
 - A. Non esiste e gli atomi sono immobili nello spazio pieno
 - B. Non esiste e gli atomi sono immobili nello spazio vuoto
 - C. Si sviluppa nel vuoto
 - D. Non può svilupparsi nel vuoto perché il vuoto è rappresentazione del Non-Essere mentre gli atomi determinano l'Essere

6. Per gli atomisti antichi le qualità dei fenomeni sono dovute:
 - A. Alla percezione del soggetto
 - B. Agli atomi
 - C. Agli atomi e alla percezione del soggetto
 - D. Alla natura dell'Essere

7. Nell'atomismo platonico si intende:
 - A. φαίνομενα σώζειν, ossia salvare i fenomeni

- B. Rinunciare all'indagine sui *noumeni*
 - C. Istituire un apparato teleologico descrittivo
 - D. Rigettare completamente le teorie atomistiche
8. Nella fisica aristotelica:
- A. Si rinuncia parzialmente all'atomismo
 - B. Si trattiene l'idea delle qualità degli atomi
 - C. Si rinuncia al moto degli atomi
 - D. Si presuppone l'infinita divisibilità della materia
9. La teoria dei *minima naturalia* (XVI sec.):
- A. È una teoria in cui la materia è infinitamente divisibile, sostenuta da aristotelici e Padri della Chiesa
 - B. È una teoria in cui la materia è divisibile, ma non oltre un certo limite, sostenuta da aristotelici e Padri della Chiesa
 - C. È una teoria in cui la materia è divisibile, ma non oltre un certo limite, sostenuta da neo-atomisti rinascimentali
 - D. È una teoria in cui la materia è infinitamente divisibile, sostenuta da neo-atomisti rinascimentali
10. Il dibattito sull'atomismo nell'Italia del XVI secolo vede contrapporsi corpuscolaristi e continuisti in cui si distinguono:
- A. Cardano e Fracastoro tra i continuisti e Giordano Bruno tra i corpuscolaristi
 - B. Cardano e Fracastoro tra i corpuscolaristi e Scaglieno tra i continuisti
 - C. Scaglieno tra i continuisti e Giordano Bruno tra i corpuscolaristi
 - D. Giordano Bruno tra i continuisti e Scaglieno tra i corpuscolaristi
11. Con il rinvenimento del *De rerum Natura* di Lucrezio, gli atomisti rinascimentali ipotizzarono una teoria che avrebbe aperto la strada a:
- A. L'interpretazione degli stati della materia attraverso i legami degli atomi
 - B. La dinamica newtoniana
 - C. Il secondo principio della termodinamica
 - D. La meccanica quantistica
12. Nell'opera *The Sceptical Chymist* Boyle espose una teoria atomista moderna compiuta rifacendosi all'opera di:
- A. Epicuro e Newton
 - B. Melisso e Newton
 - C. Melisso e Cartesio
 - D. Epicuro e Galilei

Risposte (fornite ai corsisti dopo la consegna del questionario compilato)

QUESITO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RISPOSTA	A	B	B	D	C	C	C	D	A	B	A	D

QUESTIONARIO CHIMICA ATOMICA

Chimica atomica

Si richiede di rispondere alle seguenti domanda, rispettando il numero massimo di righe indicato.

1. Si enunci sinteticamente il principio di conservazione della massa di Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794), indicando come fu raggiunto il risultato. [max 4 righe]

2. Quali furono i problemi incontrati dai contemporanei di Lavoisier nell'analisi dei processi di combustione? [max 2 righe]

3. Si enunci sinteticamente la *legge delle proporzioni definite* (1794), dovuta a Joseph Louis Proust, [max 2 righe]

4. Si fornisca un esempio per cui si può affermare che la legge di Proust può dirsi incompleta? [max 2 righe]

5. Si enunci sinteticamente la legge delle proporzioni multiple di Dalton (1805) e se ne discuta l'importanza alla luce dell'incompletezza della legge di Proust. [max. 4 righe]

6. Si spieghi la seguente tabella, in relazione alla legge di Gay-Lussac dei rapporti multipli in volume [max 3 righe]:

Volume idrogeno [ml]	Volume ossigeno [ml]	Volume acqua [ml]	Volume non reagente [ml]
10	10	10	5 ossigeno
15	10	15	2,5 ossigeno
20	10	20	0
25	10	20	5 idrogeno
30	10	20	10 idrogeno

Tab 1.: volumi di idrogeno, ossigeno, acqua e residui non reagenti nella reazione di produzione dell'acqua

7. Qual è l'innovazione concettuale introdotta da Amedeo Avogadro (1776-1856)? [max 3 righe]

App. 10

Questionario di gradimento del corso di formazione per docenti M4C1I2.1-2023-1222-P-36049,
modulo I

1. La sua età si colloca nella fascia:

25-35 anni
36-45 anni
46-55 anni
oltre i 55 anni

2. La sua laurea magistrale (o laurea vecchio ordinamento) è in:

Fisica
Matematica
Altro
Non ho completato il percorso di laurea magistrale

3. Ha insegnato al triennio del liceo per un numero intero N di anni:

$N < 6$
 $5 < N < 11$
 $10 < N < 16$
 $N > 15$

4. Ha insegnato nell'ultimo anno di corso del liceo per un numero intero N di anni:

$N < 3$
 $2 < N < 8$
 $7 < N < 13$
 $N > 12$

5. Ha insegnato fisica nucleare al liceo per un numero intero N di anni:

$N < 3$
 $2 < N < 8$
 $7 < N < 13$
 $N > 12$

6. Gli argomenti trattati nel corso sono stati interessanti?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

7. Gli argomenti trattati nel corso hanno risposto alle sue aspettative?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

8. Gli argomenti trattati nel corso erano accessibili?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

9. I metodi utilizzati durante le lezioni erano adeguati ai contenuti sviluppati?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

10. I metodi utilizzati durante il corso erano favorevoli per il coinvolgimento dei partecipanti?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

11. I materiali utilizzati e condivisi con i partecipanti sono stati utili al processo di formazione?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

12. Il numero degli interventi è stato sufficiente a sviluppare le tematiche del corso?

sì

no, meglio meno interventi

no, meglio più interventi

13. La durata degli interventi era adeguata?

sì

no, meglio più corta

no, meglio più lunga

14. Come reputa la modalità di svolgimento mista del corso “in presenza e da remoto”?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Pessima

eccellente

15. Le informazioni relative all'organizzazione sono state tempestive?

sì

no

16. Il calendario degli incontri è stato adeguato?

sì
no

17. La struttura tecnica dell'ente formatore si è rivelata adeguata?

sì
no

18. In che misura i docenti erano preparati e competenti?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla completamente

19. I docenti hanno comunicato in maniera chiara e comprensibile?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla completamente

20. I docenti hanno fornito spunti di riflessione e approfondimento?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
per nulla					completamente				

21. In che misura il corso è stato utile per la sua formazione personale?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla completamente

22. In che misura il corso è stato utile per l'effettiva possibilità di sviluppare argomenti di fisica nucleare nell'attività didattica?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla completamente

23. In che misura il corso ha fornito degli argomenti trasferibili nell'attività didattica?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
per nulla					completamente				

24. Nell'eventualità che ci sia un prosieguo del corso, in che misura vorrebbe che venissero sviluppate tematiche relative alla misura di radioattività?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla favorevole

completamente favorevole

25. Nell'eventualità che ci sia un prosieguo del corso, in che misura vorrebbe che venissero sviluppate tematiche di fisica nucleare per l'ambiente?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla favorevole

completamente favorevole

26. Nell'eventualità che ci sia un prosieguo del corso, in che misura vorrebbe che venissero sviluppate tematiche di fisica nucleare per la comprensione della nucleosintesi?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla favorevole

completamente favorevole

27. Nell'eventualità che ci sia un prosieguo del corso, in che misura vorrebbe che venissero sviluppate tematiche relative alla fissione nucleare e alla transizione energetica?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla favorevole

completamente favorevole

28. Nell'eventualità che ci sia un prosieguo del corso, in che misura vorrebbe che venissero sviluppate tematiche relative alla fusione nucleare?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla favorevole

completamente favorevole

29. Nell'eventualità che ci sia un prosieguo del corso, in che misura vorrebbe che venissero sviluppate tematiche relative alla radioprotezione?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla favorevole

completamente favorevole

30. Nell'eventualità che ci sia un prosieguo del corso, in che misura vorrebbe che venissero sviluppate tematiche relative al deposito nucleare per i rifiuti radioattivi e parco tecnologico (DNPT)?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla favorevole

completamente favorevole

31. In merito alla sezione di fisica nucleare, i libri di testo sono aggiornati?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

32. In merito alla sezione di fisica nucleare, i libri di testo propongono una didattica inclusiva?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

33. In merito alla sezione di fisica nucleare, i libri di testo si limitano a un'esposizione descrittiva dei fenomeni nucleari senza analizzarne le cause legate al potenziale nucleare?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

App. 11

Questionario di gradimento del corso di formazione per docenti M4C1I2.1-2023-1222-P-36049, modulo II

1. La sua età si colloca nella fascia:

25-35 anni
36-45 anni
46-55 anni
oltre i 55 anni

2. La sua laurea magistrale (o laurea vecchio ordinamento) è in:

Fisica
Matematica
Altro
Non ho completato il percorso di laurea magistrale

3. Ha insegnato al triennio del liceo per un numero intero N di anni:

$N < 6$
 $5 < N < 11$
 $10 < N < 16$
 $N > 15$

4. Ha insegnato nell'ultimo anno di corso del liceo per un numero intero N di anni:

$N < 3$
 $2 < N < 8$
 $7 < N < 13$
 $N > 12$

5. Ha insegnato fisica nucleare al liceo per un numero intero N di anni:

$N < 3$
 $2 < N < 8$
 $7 < N < 13$
 $N > 12$

6. Gli argomenti trattati nel corso sono stati interessanti?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

7. Gli argomenti trattati nel corso hanno risposto alle sue aspettative?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

8. Gli argomenti trattati nel corso erano accessibili?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

9. I metodi utilizzati durante le lezioni erano adeguati ai contenuti sviluppati?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

10. I metodi utilizzati durante il corso erano favorevoli per il coinvolgimento dei partecipanti?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

11. I materiali utilizzati e condivisi con i partecipanti sono stati utili al processo di formazione?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

12. Il numero degli interventi è stato sufficiente a sviluppare le tematiche del corso?

sì

no, meglio meno interventi

no, meglio più interventi

13. La durata degli interventi era adeguata?

sì

no, meglio più corta

no, meglio più lunga

14. Come reputa la modalità di svolgimento mista del corso “in presenza e da remoto”?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

pessima

eccellente

15. Le informazioni relative all'organizzazione sono state tempestive?

sì

no

16. Il calendario degli incontri è stato adeguato?

sì
no

17. La struttura tecnica dell'ente formatore si è rivelata adeguata?

sì
no

18. In che misura i docenti erano preparati e competenti?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

19. I docenti hanno comunicato in maniera chiara e comprensibile?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

20. I docenti hanno fornito spunti di riflessione e approfondimento?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

21. In che misura il corso è stato utile per la sua formazione personale?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

22. In che misura il corso è stato utile per l'effettiva possibilità di sviluppare argomenti di fisica nucleare nell'attività didattica?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

23. In che misura il corso ha fornito degli argomenti trasferibili nell'attività didattica?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

24. Nell'eventualità che ci sia un prosieguo del corso, in che misura vorrebbe che venissero sviluppate tematiche relative alla misura di radioprotezione?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla favorevole

completamente favorevole

25. Nell'eventualità che ci sia un prosieguito del corso, in che misura vorrebbe fossero incluse visite a reattori in attività?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla favorevole

completamente favorevole

26. Nell'eventualità che ci sia un prosieguito del corso, in che misura vorrebbe fossero incluse visite a enti di ricerca operativi in ambito nucleare?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla favorevole

completamente favorevole

27. Nell'eventualità che ci sia un prosieguito del corso, in che misura vorrebbe fossero incluse visite a depositi di rifiuti nucleari?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla favorevole

completamente favorevole

28. Nell'eventualità che ci sia un prosieguito del corso, in che misura vorrebbe fosse inclusa una summer school nucleare con attività di laboratorio?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla favorevole

completamente favorevole

29. Nell'eventualità che ci sia un prosieguito del corso, in che misura vorrebbe fossero incluse visite e attività di laboratorio presso i dipartimenti universitari?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla favorevole

completamente favorevole

30. Nell'eventualità che ci sia un prosieguito del corso, in che misura vorrebbe fosse inclusa la possibilità di seguire una lezione universitaria di fisica nucleare?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla favorevole

completamente favorevole

31. In merito alla sezione di fisica nucleare, i libri di testo sono completi?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

32. In merito alla sezione di fisica nucleare, i libri di testo sono aggiornati?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

33. In merito alla sezione delle applicazioni della fisica nucleare in ambito energetico (fissione, fusione, trattamento dei rifiuti, deposito nazionale), i libri di testo presentano i contenuti in forma corretta?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

App. 12

Questionario di gradimento del workshop per docenti M4C1I2.1-2023-1222-P-36049, modulo III

1. La sua età si colloca nella fascia:

25-35 anni
36-45 anni
46-55 anni
oltre i 55 anni

2. La sua laurea magistrale (o laurea vecchio ordinamento) è in:

Fisica
Matematica
Storia o Filosofia
Lettere
Altro
Non ho completato il percorso di laurea magistrale

3. Ha insegnato al triennio del liceo per un numero intero N di anni:

$N < 6$
 $5 < N < 11$
 $10 < N < 16$
 $N > 15$

4. Ha insegnato nell'ultimo anno di corso del liceo per un numero intero N di anni:

$N < 3$
 $2 < N < 8$
 $7 < N < 13$
 $N > 12$

5. Ha insegnato storia della bomba atomica e del disarmo nucleare al liceo per un numero intero N di anni:

$N < 3$
 $2 < N < 8$
 $7 < N < 13$
 $N > 12$

6. Gli argomenti trattati nel corso sono stati interessanti?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

7. Gli argomenti trattati nel corso hanno risposto alle sue aspettative?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

8. Gli argomenti trattati nel corso erano accessibili?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

9. I metodi utilizzati durante le lezioni erano adeguati ai contenuti sviluppati?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

10. I metodi utilizzati durante il corso erano favorevoli per il coinvolgimento dei partecipanti?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

11. I materiali utilizzati e condivisi con i partecipanti sono stati utili al processo di formazione?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

12. Il numero degli interventi è stato sufficiente a sviluppare le tematiche del corso?

sì

no, meglio meno interventi

no, meglio più interventi

13. La durata degli interventi era adeguata?

sì

no, meglio più corta

no, meglio più lunga

14. Come reputa la modalità di svolgimento del corso solo "in presenza"?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

pessima

eccellente

15. Le informazioni relative all'organizzazione sono state tempestive?

sì

no

16. Il calendario degli incontri è stato adeguato?

sì
no

17. La struttura tecnica dell'ente formatore si è rivelata adeguata?

sì
no

18. In che misura i docenti erano preparati e competenti?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla completamente

19. I docenti hanno comunicato in maniera chiara e comprensibile?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
per nulla					completamente				

20. I docenti hanno fornito spunti di riflessione e approfondimento?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
per nulla					completamente				

21. In che misura il corso è stato utile per la sua formazione personale?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla completamente

22. In che misura il corso è stato utile per l'effettiva possibilità di sviluppare argomenti legati alla storia della bomba atomica e del disarmo nucleare nell'attività didattica?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla completamente

23. In che misura il corso ha fornito degli argomenti trasferibili nell'attività didattica?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
per nulla					completamente				

24. In merito alla storia della bomba atomica e del disarmo nucleare, i libri di testo sono completi?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

25. In merito alla storia della bomba atomica e del disarmo nucleare, i libri di testo propongono una didattica transdisciplinare (fisica, storia, filosofia, storia dell'arte)?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

completamente

App. 13

Questionario di gradimento del workshop per studenti M4C1I2.1-2023-1222-P-36049, modulo III

1. La tua età è:

età < 17 anni
16 anni< età < 18 anni
17 anni< età < 19 anni
età >18 anni

2. Il tuo genere è:

femminile
maschile
transgender
altro
preferisco non specificare il genere

3. Ha frequentato il triennio del liceo nella stessa classe:

sì
no

4. Stai frequentando la classe:

quarta
quinta

5. Il tuo voto in Fisica nella pagella del primo quadrimestre è stato:

3
4
5
6
7
8
9
10

6. Quante lezioni del corso hai seguito?

1
2
3
4
5

7. Gli argomenti trattati erano interessanti?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

moltissimo

8. Gli argomenti trattati erano semplici da capire?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

moltissimo

9. Le lezioni di storia della bomba atomica e del disarmo trattate in forma transdisciplinare hanno reso più interessanti le materie scolastiche (fisica, storia, storia dell'arte)?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

moltissimo

10. Le lezioni potevano essere svolte online con la stessa efficacia?

sì
no

11. Le lezioni svolte a fianco dei docenti dell'istituto hanno migliorato l'apprendimento?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

moltissimo

12. Il lavoro di gruppo migliora l'apprendimento?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

sempre

13. Il lavoro di gruppo migliora l'apprendimento?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

moltissimo

14. Quanto nel mio gruppo si sono condivise e rielaborate idee?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

per nulla

totalmente

15. I docenti relatori del corso hanno incoraggiato la partecipazione degli studenti?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

mai

sempre

16. I docenti relatori del corso hanno commentato i lavori dei gruppi?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

mai

sempre

17. Internet è stato usato come fonte di informazione?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

mai

sempre

LA SCOPERTA DELLA FISSIONE

Fermi, Lise Meitner e Otto Frisch

Nel mese di dicembre 1938 Otto Hann e Fritz Strassmann, due chimici berlinesi, scrissero all'ex-collega e fisica Lise Meitner per avere chiarimenti in merito a un processo nucleare che stavano studiando. Bersagliando nuclei di uranio con neutroni sempre più lenti, i due chimici ottenevano nuclei molto più leggeri che identificarono nel bario, molto più leggero dell'uranio. Questo risultato non poteva essere spiegato tramite l'emissione di particelle elementari (neutroni o protoni) o particelle alpha, cioè attraverso i decadimenti fino ad allora conosciuti. Hann e Strassmann ipotizzarono di avere commesso un errore e che i nuclei emessi in realtà avrebbero potuto essere nuclei molto più pesanti e chimicamente affini al bario, come quelli di radio.

Lise Meitner, austriaca per nascita, si ritrovò tedesca a seguito dell'occupazione nazista dell'Austria avvenuta nel 1938 e, in quanto ebrea, dovette espatriare e rifugiarsi in Svezia, dopo aver attraversato l'Olanda e la Danimarca. Lì le fu possibile continuare le sue ricerche all'istituto Nobel fino al 1946. Il 19 dicembre 1938 ricevette la lettera di Hann e Strassmann a cui rispose dopo aver riflettuto col nipote Otto Frisch, un brillante fisico nucleare, sul processo che i due chimici non riuscivano a capire. Durante le lunghe passeggiate invernali nei boschi svedesi, Lise Meitner aveva concepito una nuova idea di trasformazione nucleare, che sarà poi definita fissione. La spiegazione data era molto semplice, come noterà lo stesso Niels Bohr affermando: "Eravamo tutti idioti! È proprio meraviglioso! Deve essere proprio così!" [A]. Un nucleo bombardato da neutroni si divide in due frammenti più leggeri, causando emissione di energia.

Per comprendere la genesi di questa idea, è necessario risalire agli esperimenti di quattro anni prima condotti a Roma da Enrico Fermi e dalla spiegazione che ne diede Bohr subito dopo. Nella sede del Dipartimento di Fisica di via Panisperna Enrico Fermi e gli altri giovani fisici del gruppo, coordinato da Orso Maria Corbino, avevano infatti deciso di proseguire gli esperimenti di Frédéric e Irène Joliot-Curie, bombardando il nucleo con neutroni e non con particelle alpha, come avevano fatto fino a quel momento i fisici francesi.

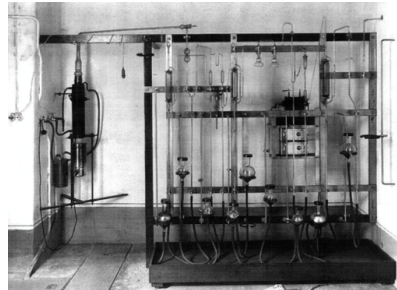


L'istituto di Fisica di via Panisperna a Roma

In questo modo, sfruttando l'assenza di carica dei neutroni, si sarebbero ridotti gli effetti elettrostatici sempre presenti nelle interazioni del nucleo con le particelle alpha. Per ottenere neutroni, Fermi sfruttò come sorgente una polvere di berillio mescolata a radon in piccoli tubi di vetro forniti dall'Istituto di Sanità Pubblica di Roma. Il berillio emetteva neutroni a seguito dell'assorbimento di particelle alpha emesse dal radon, a sua volta estratto dal radio.



tubicino di vetro con miscela di radio-berillio all'interno



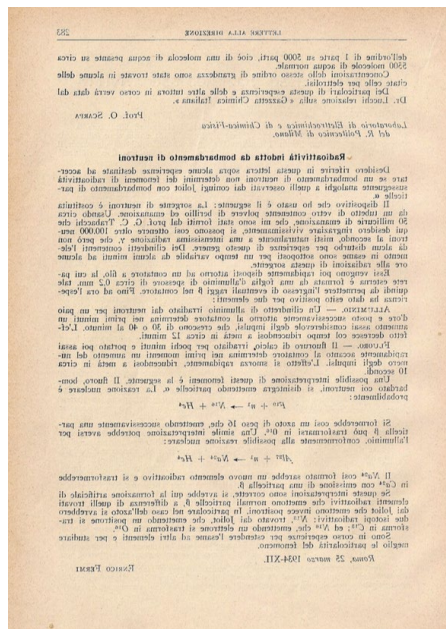
Apparato per l'estrazione del radon dal radio (Istituto della Sanità Pubblica)

Questo tipo di sorgente era più intensa di quelle al polonio, usate normalmente per la generazione di neutroni. Fermi capì che l'emissione gamma, prevista per le sorgenti al radio, non sarebbe in ogni caso stata un problema, dato che non avrebbe interferito con i decadimenti beta a cui Fermi era interessato nelle fasi di misura per il riconoscimento di eventuali prodotti radioattivi. Indagando con un contatore di Geiger-Müller l'assorbimento dei neutroni a partire dagli elementi più leggeri fino ai più pesanti, Fermi si accorse che il primo elemento della tavola periodica capace di assorbire neutroni sarebbe stato il fluoro.

	Ca F ₂			1'	2'	
	30"	40"	60"			
38)	12	4	5	31	11	0' 5500 9' 5653.8
28)	8	3	5	16	16	
40)	10	5	0	15	7	
95)	9	6	4	19	7	
81)	8	5	7	30	12	
81)	15	4	3	22	8	
1)	12	10	6	28	9	
36)	3	1	4	14	10	
74)	6	7	3	16	15	
33)	13	6	2	21	12	
	102	51	39	192	107	

Quaderno di Fermi, pag. 35: radioattività del fluoro indotta dai neutroni, misurata in intervalli di 20" a seguito dell'irraggiamento (il fluoro ha una vita media di circa 10")

I prodotti della reazione avrebbero poi subito decadimenti β^- , in quanto il neutrone in eccesso si sarebbe spontaneamente trasformato in un protone con emissione di elettroni.



Lettera di Enrico Fermi a “La Ricerca Scientifica” (25 marzo 1934), rivista del C.N.R.

Avrebbe poi osservato lo stesso comportamento anche in nuclei più pesanti, fino all’uranio, deducendo che i prodotti delle reazioni nucleari dovevano comportare la creazione di nuclei più pesanti dell’uranio, detti transuranici. Chiamò i primi due di questi ausonio e esperio: fu un clamoroso errore. L’uranio irraggiato di neutroni, infatti, non genera nuovi elementi, ma si scinde in due elementi leggeri; ma ci sarebbero voluti ancora quattro anni prima dell’intuizione di Lise Meitner e della completa comprensione delle reazioni nucleari.

Fermi fece un’ulteriore scoperta, mentre bombardava gli elementi con neutroni. Si rese conto che la presenza di alcune parti in legno prossime all’esperimento, avevano la capacità di enfatizzare l’esito dell’esperimento stesso, a differenza di quanto succedeva se l’esperimento veniva svolto su tavoli di marmo. In questo modo poté intuire che i neutroni rallentati dal legno avrebbero reso più probabile l’assorbimento da parte dei nuclei irraggiati. Una conferma di questo comportamento fu notata utilizzando uno strato di paraffina, ottimo rallentatore di neutroni dato che è costituita da elementi leggeri, interposto tra la sorgente di neutroni e il cilindro da analizzare.

Un secondo aspetto che comprese, era legato alla disposizione geometrica dei diversi componenti dell’esperimento. Per l’analisi degli elementi metallici, Fermi costruì piccoli cilindretti costituiti dal materiale da analizzare, in cui veniva posta la sorgente di neutroni. In questo modo la sorgente sfruttava l’intero angolo solido per l’irraggiamento del cilindro.



campione cilindrico cavo

Facendo ruotare il cilindretto attorno alla sorgente, Fermi si rese conto che la posizione reciproca della sorgente e del manufatto alterava la misura dei prodotti di reazione. Con queste due osservazioni sperimentali, Fermi comprese due questioni centrali dei processi di fissione, che sarebbero stati determinanti nella progettazione degli ordigni nucleari: la moderazione dei neutroni e la geometria dell'esperimento.

I risultati di Fermi del 1934 furono subito interpretati da Niels Bohr, che fece qualche ipotesi sulla natura del nucleo [B]. L'idea principale che ebbe il fisico danese fu di interpretare il fenomeno a seguito del bombardamento neutronico dei nuclei, come un assorbimento e di una modificazione del nucleo stesso. Il neutrone assorbito dal nucleo distribuisce energia a tutto il nucleo bersaglio e ne viene intrappolato, dando vita a un nucleo composto, una sorta di goccia d'acqua non completamente stabile. Questo nucleo di transitorio sarebbe stato oggetto di tre possibili comportamenti: diffusione elastica (prodotti identici alle particelle iniziali), diffusione anelastica (prodotti identici a quelli iniziali, ma con il nucleo in uno stato energetico eccitato), reazione nucleare (prodotti diversi da quelli iniziali).

Fu lo stesso Otto Frisch a chiarire il pensiero di Bohr: "Forse una goccia potrebbe dividersi in due gocce più piccole prima allungandosi, poi restringendosi al centro e infine torcendosi [...]. Il nucleo dell'uranio potrebbe essere una goccia alquanto tremolante e instabile, pronta a dividersi alla minima perturbazione, come quella data dall'impatto con un neutrone".

Una delle prime valutazioni quantitative fu effettuata da Lise Meitner e Otto Frisch. Dai valori dei Q delle reazioni nucleari che coinvolgevano l'uranio, ottennero infatti l'energia liberata da una fissione di ^{235}U . Nel caso in cui uno dei prodotti abbia massa atomica pari a 100 ($A=100$) ricavarono:

$$Q\text{-value} = \Delta(^{135}\text{A} + ^{100}\text{A}; ^{235}\text{U}) = 235 \times 8.4 - 235 \times 7.5 = 1974 \text{ MeV} - 1762 \text{ MeV} = 212 \text{ MeV},$$

un valore estremamente elevato, se si pensa che è relativo a una singola disintegrazione nucleare.

Frisch e Lise Meitner raccolsero i risultati e ne diedero una spiegazione completa in un articolo per la rivista Nature, a cui inviarono una bozza di articolo il 6 gennaio 1939, dopo averlo letto a Bohr, che era in partenza per gli Stati Uniti. Bohr promise di non rivelare la scoperta prima che l'articolo fosse uscito. Ne parlò solo in volo con Léon Rosenfeld, che, appena atterrato a New York, diffuse la notizia. Così, prima della pubblicazione del lavoro di Frisch e Meitner, l'intera costa orientale degli Stati Uniti era a conoscenza della fissione nucleare. Uno dei più entusiasti, anche se dapprima si era detto scettico della scoperta, fu Robert Oppenheimer, che ne vide subito le potenzialità in ambito bellico.

DALLA FISSIONE ALLA BOMBA (GERMANIA): LE RAGIONI DI UN FALLIMENTO

Già nel 1939 il fisico tedesco Kurt Diebner era certo che si potesse costruire un ordigno bellico realizzato sfruttando i principi della fissione nucleare. Con queste convinzioni e per realizzare questo obiettivo convinse Hitler a fondare un "Club dell'Uranio", che avrebbe coinvolto i migliori fisici tedeschi chiamati a progettare e a realizzare una bomba a fissione.



Kurt Deibner

Il Club dell'Uranio fu istituito, nonostante le perplessità dei fisici chiamati a farne parte. Per Deibner il Club avrebbe dovuto coinvolgere quasi esclusivamente fisici sperimentali: diffidava dei fisici teorici che non si erano interessati fino a quel momento alle applicazioni militari. La presenza del fisico teorico Werner Heisenberg, inoltre, avrebbe potuto offuscarlo e inizialmente Deibner pensò di non convocarlo nel Club. La necessità di un fisico come Heisenberg allo stesso tempo si imponeva naturalmente e il 25 settembre 1939 fu chiamato a far parte del Club dell'Uranio dove trovò Carl Friedrich Freiherr von Weizsäcker, con cui nacque una profonda amicizia finché Heisenberg si innamorò della figlia di Weizsäcker che invece si mostrò contrario al matrimonio e gli impedì di sposarla. I rapporti di Heisenberg con la famiglia Weizsäcker si fecero molto più freddi.



Carl Friedrich Freiherr von Weizsäcker

Quando furono chiari i principi della fissione nucleare, e soprattutto che l'Uranio 235 era fissile e l'Uranio 238 solo fissionabile, furono fatte le prime ipotesi sulla possibilità di costruire una bomba a fissione. Era nota la perplessità di Niels Bohr, il fisico danese, uno dei padri della meccanica quantistica. Bohr sosteneva infatti che non sarebbe stata necessaria una quantità enorme di uranio, data la scarsità dell'isotopo 235 nella composizione dell'elemento.

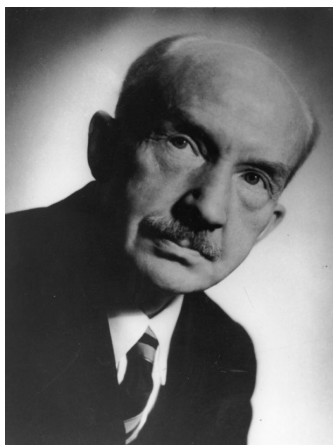


Niels Bohr

I dubbi di Bohr non fermarono gli altri scienziati. Nel Club dell'Uranio venne individuato un sottogruppo di fisici deputato alla costruzione di un reattore nucleare detto *Uranmaschine*, analogo a quello che realizzerà in seguito Fermi e noto come pila di Chicago. Già nel 1939 Heisenberg aveva scritto due rapporti scientifici: uno sul reattore e uno sulla fabbricazione della bomba. Poco tempo dopo, nel 1940, Weizsäcker intuì che l'uranio 238 non solo non era fissile, ma che assorbendo un neutrone sarebbe decaduto in nettunio e poi in plutonio. Per Weizsäcker, in realtà, il nettunio e non l'uranio avrebbe assorbito neutroni per poi decadere, ma questo dettaglio non modifica di molto la vicenda. Con queste premesse venne quindi progettata l'Uranmaschine, un reattore a uranio non arricchito, come la pila di Fermi, basato più sui processi inerenti l'uranio 238 che non l'uranio 235.

Viene perciò spontaneo chiedersi come mai la Germania non riuscì nello scopo di costruire una bomba nucleare, dato che si interessò molto presto alla possibilità di sfruttare la fissione nucleare per scopi bellici e che aveva istituito un gruppo di lavoro costituito da fisici tra i migliori al mondo, per di più rapidi nel comprendere i fenomeni e le potenzialità della fisica nucleare. Vale quindi la pena ripercorrere per sommi capi la successione delle disavventure che segnarono la corsa della Germania verso la costruzione della bomba.

La prima di queste porta il nome di Walter Bothe. Fisico tedesco, pur avendo manifestato una blanda opposizione al regime nazista, fece parte del Club dell'Uranio. Nel 1939 si imbarcò per gli Stati Uniti, dove si cimentò in esperimenti relativi alla fissione. Sotto l'impulso delle ricerche di Fermi sulla moderazione dei neutroni con acqua e paraffina, Bothe studiò la grafite (carbonio puro) come rallentatore di neutroni.



Walter Bothe

Per questo costruì una sfera di grafite di 90 cm di diametro per iniettarvi un fascio di neutroni che secondo le sue stime avrebbe dovuto essere arrestarsi dopo aver percorso un cammino medio di circa 71 cm. Le misure effettuate però evidenziarono che lo spazio di frenata dei neutroni era di 58 cm. Inizialmente Bothe attribuì la forte capacità di frenamento alla presenza nella sfera di grafite di impurezze di cadmio e boro, forti assorbitori di neutroni. L'eliminazione di questi due elementi non fece che peggiorare la situazione. I neutroni venivano frenati dopo aver percorso solo 35 cm all'interno della grafite.

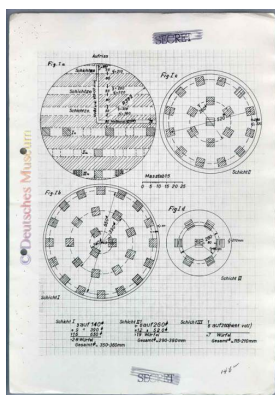
I risultati raccolti da Bothe erano viziati da diversi errori compiuti nelle procedure sperimentali, che non furono condotte con attenzione del fisico tedesco¹. I lavori che contestarono le conclusioni di Bothe non pervennero al Club dell'Uranio, in cui infine si decise per optare per un altro moderatore, l'acqua pesante, la cui molecola è indicata con D_2O , dove l'idrogeno è presente attraverso il suo isotopo a un neutrone, il deuterio. Questa era fabbricata in Norvegia, a Vemork, a cui i tedeschi si rivolsero facendo ordini massicci di acqua pesante (inizialmente 185 chilogrammi e poi, a seguire, 100 chilogrammi al mese). L'ordine fu però intercettato dai francesi che, con una rocambolesca operazione clandestina, recuperarono tutta l'acqua pesante, per poi trasferirla a Parigi, non ancora occupata.

Un'ulteriore limitazione al processo di fabbricazione della bomba da parte dei tedeschi, venne dagli esperimenti di Heisenberg sui primi reattori a fissione. Come già sottolineato, Heisenberg si era interessato alla possibilità di progettare un reattore già dal 1939. I primi che riuscì a realizzare, furono del 1942. Un prototipo, detto a sandwich, era costituito lastre tra loro parallele, contenenti ossido di uranio U_3O_8 tra loro alternate ad acqua pesate in cui erano immerse. Per migliorarne l'efficienza, tale schema fu perfezionato da Heisenberg immaginando una sfera a gusci concentrici di ossido di uranio alternato ad acqua pesante. Il prototipo era una sfera di 700 chilogrammi con un diametro di 80 centimetri, in cui una piccola sorgente di radio berillio poteva essere iniettata attraverso un piccolo cunicolo. Il berillio, assorbendo particelle alpha emesse dal radio, emette a sua volta neutroni e può dare inizio al processo a catena. Questi primi reattori, detti L-IV, iniziarono a mostrare da subito i loro limiti e durante le prime prove a provocare incidenti. L'uranio è infatti piroforico e, interagendo con l'ossigeno dà luogo a combustioni. Un incidente di questo tipo si

¹ Secondo alcuni, Walter Bothe non era adeguatamente concentrato durante le fasi sperimentali, perché vittima di un innamoramento che lo coinvolgeva completamente, distraendolo dall'attività sperimentale.

verificò quando un po' di polvere di uranio fuoriuscì nella fase di iniezione nel reattore. La polvere a contatto con l'atmosfera si incendiò, dando vita a fiamme alte 8 metri. Si trattò di un'esplosione chimica che però diffuse uranio nei laboratori in cui venne effettuata la prova. Taluni individuano in questo il primo incidente nucleare.

Nel giugno 1942 si verificò una seconda fuoriuscita di uranio nella vasca d'acqua in cui la sfera era tenuta per essere raffreddata. L'uranio strappò atomi di idrogeno all'acqua che appena poterono interagire con l'atmosfera, non appena la sfera fu tolta dall'acqua per essere esaminata, produssero un'esplosione. Venne così utilizzata dell'acqua per sedare l'incendio, che a sua volta a contatto con l'uranio generò un'ulteriore combustione enfatizzando l'incendio con fiamme alte 6 metri. Questi inconvenienti determinarono l'interruzione del progetto di Heisenberg che non poté portarlo a Berlino, come inizialmente previsto e fu costretto a continuare in solitudine il progetto.



Schematizzazioni dei primi reattori tedeschi

Nonostante il fallimento di Heisenberg, la notizia dei suoi esperimenti arrivò in Svizzera e da lì agli Stati Uniti. L'enfasi che caratterizzò queste comunicazioni fu tanto esagerata che negli USA si pensò che Heisenberg aveva ottenuto la prima esplosione nucleare, cosa che determinò una decisa accelerazione verso un progetto di fabbricazione della bomba da parte degli Stati Uniti. A fronte di queste reazioni, ci fu tra gli scienziati una netta presa di coscienza del pericolo a cui si andava incontro. Il 12 luglio 1939 i fisici Szilard e Wigner si recarono da Einstein per comunicargli lo stato dell'arte in merito alle conoscenze relative alla fissione e alla possibilità quanto meno teorica di realizzare un ordigno nucleare. Einstein era a digiuno di fisica nucleare, ma era in buoni rapporti con i reali del Belgio, di cui il Congo ricco di miniere di uranio era una colonia. La sua voce sarebbe stata ascoltata e i reali del Belgio avrebbero capito la reale importanza sullo scenario di guerra dei giacimenti di cui erano i controllori. Szilard accompagnato da Teller, tornò da Einstein il 2 agosto per convincerlo ad inviare una lettera al presidente Roosevelt, in cui venivano espressi i timori relativi alla bomba. Fu il primo passo verso una presa di consapevolezza da parte dell'amministrazione americana che era ormai necessario affrontare la questione.

Intanto in Germania i progetti di Heisenberg furono superati da quelli di Kurt Diebner, che per termalizzare i neutroni progettò un'enorme vasca di acqua pesante in cui sospendere piccoli cubetti contenenti uranio. In questo modo tutti i neutroni emessi venivano rallentati dal moderatore, contrariamente a quello che accadeva nei prototipi di Heisenberg dove parte dei neutroni si perdeva nelle lastre o nei gusci di uranio, senza raggiungere l'acqua pesante. I reattori di Diebner ottennero in questo modo un risultato notevole: a differenza del fattore moltiplicativo ottenuto da Heisenberg, ossia il 13%, fu possibile arrivare a un fattore del 110%.

Qualche anno più tardi fu lo stesso Heisenberg a ottenere da Diebner notevoli quantità di acqua pesante che gli consentirono di ripetere ricerche sui reattori e che gli fecero raggiungere un fattore di moltiplicazione pari al 670%. Per raggiungere un fattore di criticità sarebbero state comunque necessarie altre quantità di uranio e di acqua pesante. Ma ormai la guerra stava sfiancando la Germania e raggiungendo la zona del reattore. Quella nucleare certamente non era più una priorità del regime [B bis].

DALLA FISSIONE ALLA BOMBA (USA)

Negli Stati Uniti la scoperta della fissione venne vista come un evento clamoroso e molti fisici cominciarono a interessarsi agli aspetti teorici e alle possibili applicazioni. Sulla lavagna dello studio di Oppenheimer dopo poche settimane dall'annuncio, era possibile già vedere lo schizzo di una bomba a fissione. La cosa appare curiosa, se si considera il fatto che Oppenheimer fu uno dei pochi a disinteressarsi dell'argomento quasi subito, tornando a dedicarsi a questioni di astrofisica. Fino al 1942 non si sarebbe più interessato di fisica nucleare.

I primi a proporre una teoria compiuta della fissione, pubblicata sulla *Physical Review* nel 1939, furono Bohr e Wheeler. Uno dei primi problemi con cui si dovettero confrontare fu quello relativo alla comprensione della sezione d'urto di fissione. Si accorsero subito, infatti, che l'uranio assorbiva i neutroni ma dava vita a comportamenti diversi. In particolare, l'uranio 235 era fissile (generava fissione) se bombardato con neutroni termici, ossia poco energetici, come aveva scoperto Fermi. Al contrario l'uranio 238 era fissionabile, ossia assorbiva neutroni veloci senza scindersi in due frammenti, ma producendo uranio 239 che a sua volta decadeva in plutonio 239, questo invece fissile.

Bohr e Wheeler interpretarono il fenomeno in questo modo. La barriera di fissione dell'uranio 239 doveva essere molto meno attraversabile rispetto a quella dell'uranio 235, rendendo più competitivo l'assorbimento di neutroni e quindi i decadimenti successivi. Per l'uranio 235 invece, neutroni a energia più bassa potevano fornire un'energia sufficiente per far superare al nucleo composto la barriera di potenziale di fissione e avevano una più alta sezione d'urto, dato che a bassa energia possedevano una maggior lunghezza d'onda, cosa che rendeva più favorevole l'interazione con i nuclei d'uranio.

Una volta che un elemento fissile come l'uranio si scinde in due frammenti più piccoli, questi necessitano complessivamente di un minor numero di neutroni, dato che il numero di neutroni in un nucleo aumenta all'aumentare del numero atomico e se per nuclei leggeri è circa pari al numero atomico, per nuclei pesanti è molto superiore. Per questo nei processi di fissione alcuni neutroni si liberano e se termalizzati possono dar vita a ulteriori fissioni e quindi a un processo detto "a catena". Se per Bohr e Wheeler questi aspetti erano chiari, non fu subito evidente che un processo a catena poteva essere la base per la costruzione di un ordigno bellico. Se lo era sotto il profilo teorico, non poteva esserlo sotto quello della sua realizzazione. Bohr fu il primo a escludere convintamente la possibilità di una concreta realizzazione di una bomba basata sulle fissioni a catena, sostenendo che sarebbero state necessarie tonnellate di uranio 235, non disponibili a causa della bassa abbondanza di quell'isotopo dell'uranio.

I primi che nutrono qualche dubbio a riguardo, furono Pierles e Frisch che stimarono che ogni neutrone prodotto in una fissione ne avrebbe generata una seconda e così a seguire (sovrastimando il fenomeno) e che una massa critica di un chilogrammo di uranio 235 sarebbe stata sufficiente a costruire una bomba nucleare (oggi sappiamo che la massa critica è attorno a 15 chilogrammi). La convinzione dei due fisici fu presto condivisa anche da altri e i primi comitati istituzionali del Regno Unito (Committee on the Science Survey of Air Defense) e degli USA (Advisory Committee on Uranium) presero sul serio la questione. Roosevelt rinnovò il comitato creando un nuovo consiglio, il National

Defense Research Council (NDRC) e l'elezione di Winston Churchill in Gran Bretagna favorì la nascita di un comitato, il MAUD Committee, con lo scopo di sostenere le ricerche per la produzione di una bomba all'uranio. I due comitati collaborarono scambiandosi informazioni e inviando delegati da una sponda all'altra dell'Atlantico. Con un rapporto del 2 luglio 1941 si stabilì che la possibilità di costruire un ordigno con 11,35 chilogrammi di uranio 235 era realistica. Il 21 settembre 1941 il fisico americano Lawrence, con il preside della facoltà di fisica di Birmingham, Mark Oliphant, coinvolsero Robert Oppenheimer nel progetto di realizzazione della bomba. Fu l'inizio del progetto "Manhattan".

Uno dei principali problemi con cui si dovettero confrontare gli scienziati del progetto Manhattan fu il reperimento dell'uranio. I tedeschi, che avevano avuto un vantaggio di qualche anno nella progettazione della bomba, si erano anche preoccupati di fare incetta di uranio nelle miniere europee. Per questo fu istituita la missione Alsos, alle dipendenze del generale Boris Pash, che arrivò in Europa con lo scopo di sabotare il programma nucleare tedesco e recuperare la maggior parte di uranio. I tedeschi avevano accumulato 68 tonnellate di uranio ad Anversa e altre 30 furono ritrovate nel sud della Francia. Queste scorte salparono da Marsiglia alla volta di Boston, ma non avrebbero rappresentato una quantità sufficiente per il progetto. Pash era al corrente che circa altre 900 tonnellate erano state accumulate dai tedeschi, senza sapere bene dove erano state nascoste. Nel febbraio 1945 la brigata Alsos rinvenì le 900 tonnellate di uranio a Stassfurt, ormai territorio sovietico, dove vennero fatte spedire negli USA. I sovietici considerarono questo come uno dei primi atti della guerra fredda.

ASPETTI PROGETTUALI E OSTACOLI TECNICI NELLA REALIZZAZIONE DEI PRIMI ORDIGNI NUCLEARI

Nonostante i lavori del 1939 di Bohr e Wheeler avessero chiarito i principi su cui si basava il fenomeno della fissione, all'interno del progetto Manhattan i dubbi relativi alla fabbricazione della bomba erano principalmente due: il primo era relativo al numero di neutroni prodotti in una fissione indotta da neutroni termici, il secondo riguardava il tempo che intercorreva tra una fissione e la successiva. Nel 1943, dopo nove mesi dalle prime attività di laboratorio a Los Alamos, i due problemi furono risolti. I neutroni prodotti nella fissione erano maggiori di due e il tempo tra due fissioni consecutive era sufficiente breve da innescare un'esplosione.

Un ostacolo successivo fu rappresentato dalla separazione dell'isotopo 235 dell'uranio, necessario per l'arricchimento senza il quale non sarebbe stata concepibile una bomba. Gli impianti di Oak Ridge per la diffusione gassosa, con cui si sarebbe ottenuto uranio arricchito, sembravano infatti non soddisfare la produzione necessaria. Per questo nel gennaio 1944 la marina militare avviò un nuovo impianto a Philadelphia che per separare gli isotopi dell'uranio avrebbe sfruttato il fenomeno della diffusione termica. Nonostante questo, sembrava impossibile avere per l'estate del 1945 una bomba all'uranio. Per questo fu deciso di assemblare una bomba al plutonio, nonostante di questo elemento si sapesse poco o nulla, essendo di fabbricazione artificiale. Dato che l'unico limite per la costruzione di una bomba all'uranio era ormai solo di tipo tecnico, i laboratori di Los Alamos si concentrarono a studiare la nuova bomba, quella al plutonio. La bomba al plutonio fu inizialmente pensata come bomba a proiettile. Il materiale fissile in questo congegno viene suddiviso in due parti e la più piccola viene sparata nell'altra, generando così una massa critica e quindi l'esplosione. Il vantaggio offerto dal plutonio era dato dalla massa critica necessaria per l'esplosione, inferiore a quella dell'uranio. Si presentò però una difficoltà legata al plutonio. Fu evidente da subito che oltre al plutonio 239, individuato come combustibile fissile della bomba, nel congegno esplosivo sarebbe stato presente anche plutonio 240, che come tanti nuclei pari subisce fissione spontanea e non indotta da neutroni. Questo fenomeno poteva interferire con i due frammenti sottocritici e

innescare un'esplosione prima che i il frammento più piccolo venisse sparato in quello più massiccio. Fu il fisico italiano Emilio Segrè a studiare il fenomeno della fissione spontanea del plutonio 240 e dagli esperimenti che fece dedusse che l'attività del plutonio 240 non avrebbe interferito con l'esplosione della bomba. Nel gennaio 1940 il progetto di una bomba al plutonio a proiettile fu quindi avviato e, a causa della sua forma allungata, all'ordigno venne dato il nome di "Thin Man". In aprile, però, Segrè comunicò a tutti che la scoperta relativa al plutonio non era corretta. Da un'analisi del plutonio proveniente da ciclotrone, era emerso che la fissione spontanea era cinque volte superiore a quella misurata nel gennaio precedente. Il progetto fu quindi arrestato, anche se l'idea di costruire una bomba a proiettile poteva comunque essere utilizzata per la bomba all'uranio, dove sia il proiettile che il bersaglio sarebbero stati costituiti da uranio 235. Nel 2004 venne reso noto che a differenza di quanto diffuso precedentemente, il proiettile di uranio 235 era più massiccio del bersaglio di uranio. Nella bomba infatti una sfera a gusci concentrici di uranio avrebbe colpito un analogo bersaglio generando la massa sovracritica, ma la prima sfera costituiva il 60% del combustibile presente nell'ordigno, mentre i neutroni necessari a produrre le prime fissioni sarebbero stati iniettati da un proiettile di polonio-berillio. A questa bomba fu dato il nome di "Little Boy", date le dimensioni più ridotte rispetto a "Thin Man". Fu disegnata e infine realizzata. Fu l'ordigno che venne effettivamente sganciato sulla città di Hiroshima il 6 agosto 1945 alle ore 8:15.

L'idea di una bomba al plutonio non fu però abbandonata. Per superare il problema dell'innescare a proiettile, il fisico Seth Neddermeyer escogitò l'idea di una bomba a implosione. Secondo Neddermeyer la massa supercritica di uranio sarebbe infatti stata raggiunta non per effetto di un urto tra due frammenti, come nella bomba a proiettile, ma grazie all'implosione generata da un guscio di uranio capace di comprimere una sfera sottocritica di plutonio, aumentandone la densità. L'effetto di una maggiore densità, infatti, è quello di portare una massa sottocritica a un valore di criticità superiore a uno e determinarne l'esplosione. L'aumento della densità diminuisce il cammino medio che i neutroni devono compiere per innescare una fissione all'interno del combustibile e quindi ne aumenta il fattore di criticità. Sarebbe quindi stata necessaria una massa di plutonio inferiore a quella da utilizzare in una bomba a proiettile, ciò che avrebbe anche ridotto la presenza dell'isotopo 240, per il quale la progettazione della bomba Thin Man era stata abbandonato.

La nuova bomba al plutonio venne chiamata "Fat Man", dato che aveva una simmetria più simile a una sfera che non a un fucile, come per la Thin Man. Al progetto parteciparono molti scienziati alloggiati a Los Alamos, tra cui anche ragazzi molto giovani non sempre con formazione universitaria. Per studiare la geometria della bomba e la velocità di esplosione a Los Alamos ci furono molte detonazioni. A seguito della riorganizzazione dell'intero gruppo di persone coinvolte nel progetto Manhattan, si arrivò al risultato definitivo nel febbraio 1945. Il disegno della bomba prevedeva un ordigno di due tonnellate e mezza delle dimensioni di 1,37 m, costituito nella sua zona più interna da un nocciolo di plutonio di circa 4 cm di diametro forata per l'iniziatore, circondata da un guscio di uranio del diametro di circa 22 cm di diametro, racchiuso da un involucro di trentadue cariche esplosive che avrebbero concentrato l'onda d'urto sul guscio di uranio e sul nocciolo centrale.

Il 16 luglio 1945 alle ore 5: 29':45" avvenne la prima esplosione dovuta a un ordigno nucleare. Il test Trinity, condotto su una bomba al plutonio, aveva avuto luogo².

Il 6 agosto 1945 alle ore 8:15 sulla città giapponese di Hiroshima venne sganciata la bomba atomica Little Boy. Tre giorni più tardi, il 9 agosto alle ore 11:02 Nagasaki fu oggetto dell'esplosione di Fat Man. Il bilancio delle vittime, per la quasi totalità civili, varia tra le 150000 e le 250000³.

² Si preferì utilizzare per il test una bomba al plutonio, prodotto a sufficienza per la fabbricazione di due ordigni, uno pensato per un test e uno da sganciare nel teatro di combattimento. Al contrario, l'uranio recuperato era troppo scarso per la realizzazione di due bombe e se ne costruì soltanto una, la Little Boy.

³ 90000-166000 Hiroshima, 60000-80000 Nagasaki

LA BOMBA A FUSIONE

Il primo fisico a sostenere la possibilità di una bomba a fusione fu Edward Teller, fisico coinvolto nel progetto Manhattan dalla sua creazione. Staccatosi dal gruppo di scienziati che lavorava sulla bomba al plutonio a implosione, già dalla primavera del 1944 aveva iniziato a dedicarsi al progetto di una bomba all'idrogeno, che aveva battezzato "Super". Fino al 1949 i lavori di Teller non furono presi in grande considerazione dalla comunità degli scienziati, anche perché fino al 1945 impegnati nella costruzione delle bombe a fissione.

Il 3 settembre 1949 la marina statunitense rivelò tracce di cerio 141 e di ittrio 91 sui cieli del Giappone, ipotizzando che fossero il risultato di un esperimento condotto dall'Unione Sovietica. La conferma fu data il 19 settembre e a livello scientifico e istituzionale si pose il problema di come fronteggiare una potenza ormai avversa, in grado di produrre armi nucleari a fissione e probabilmente impegnata nella progettazione e realizzazione di bombe a fusione. I mesi successivi furono ricchi di incontri tra fisici, politici, militari e rappresentanti di istituzioni coinvolte con organismi di controllo. Teller si mise all'opera per convincere i migliori fisici a dedicarsi al progetto della Super, anche se a partire da Fermi dovette registrare contrarietà o forti opposizioni. In un incontro alla presenza di Bethe avvenuto il 21 ottobre 1949 anche Oppenheimer, in modo non diretto, manifestò la sua perplessità attorno all'idea della Super. A quel tempo Teller non aveva nessuna certezza del fatto che la bomba a fusione potesse essere realizzata: non aveva ancora conoscenze specifiche né di tipo teorico né di tipo ingegneristico per la sua fabbricazione. Un primo ostacolo al progetto della Super fu posto da tre relazioni scritte per la maggior parte da Oppenheimer e Manley per la GAC (General Advisory Committee), un sotto gruppo dell'A Commissione per l'energia atomica (AEC). In queste si scoraggiava il supporto a tali ricerche, data l'enorme potenza che avrebbe sviluppato l'ordigno e nell'ottica di fermare, con questa opzione americana, l'arresto della ricerca nucleare in ambito militare. A livello governativo si scontrarono così due opzioni: pro o contro la bomba a fusione. Teller si era opposto all'idea di Oppenheimer di bloccare il progetto e fece di tutto per promuovere la sua Super. Viceversa, la maggior parte dei fisici si era detta contraria alla bomba a fusione, anche se gli eventi bellici di fine anni '40 fecero cambiare idea a qualcuno di loro⁴. La controversia si risolse il 31 gennaio 1950 quando il presidente Truman ordinò all'AEC di intraprendere un programma per la realizzazione di una bomba a fusione, detta bomba H.

Inizialmente il gruppo di Teller, incaricato del compito, incontrò ostacoli non facili da superare. Il progetto della Super di Teller non sembrava realizzabile, almeno così conclusero Ulan, Everett e von Neumann, che del gruppo facevano parte. Il 31 dicembre 1951 Ulam escogitò una via d'uscita. Per generare un fenomeno di fusione nucleare, poteva essere impiegato lo stesso stratagemma utilizzato nella bomba a implosione. Una bomba nucleare primaria a fissione a uranio-plutonio, come la Fat Man, avrebbe quindi generato temperature sufficientemente elevate per produrre in una bomba secondaria un processo di fusione. Questa esplosione determina poi un'esplosione dovuta alla fissione dell'uranio posto intorno al nocciolo dell'ordigno. Tale congegno prese il nome di bomba Ulam-Teller. Il 1° novembre 1952 alle ore 7:15 sull'isola di Elugelab la bomba fu testata (test "Mike"). L'esplosione fu di circa 10 megatoni, circa 800-1000 volte superiore a quella provocata da Little Boy a Hiroshima. La sfera di fuoco era larga quasi 5 chilometri, a 50 chilometri distanza si era avvertita l'avanzata di un fronte di calore capace di trasportare un gradiente di qualche decina di gradi, vennero sollevate in aria circa ottanta tonnellate di terra e acqua. L'isola di Elugelab scomparve.

⁴ Fu il caso di Bethe: inizialmente sulle posizioni di Oppenheimer, confluitò nel gruppo di lavoro di Teller per la progettazione della bomba H, a seguito dei fatti di Corea.

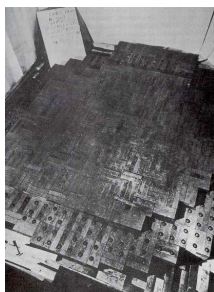
L'inconveniente della bomba fatta esplodere a Nagasaki era dato dal combustibile, il deuterio liquido, che raggiunge a soli 23.5 K la temperatura di ebollizione, cosa che non rendeva trasportabile questo tipo di bomba. La modifica successiva coinvolse quindi il combustibile: al deuterio fu sostituito il litio 6, che non presentava lo stesso genere di inconveniente. Questo tipo di ordigno fu sviluppato prima dall'Unione Sovietica che lo testò con successo nell'agosto del 1953 (test "Joe 4"). Gli USA iniziarono così una rincorsa nucleare e arrivarono a testare una bomba di identica concezione il 1° marzo 1954. Il test Castle Bravo fu condotto sull'atollo di Bikini e sprigionò circa 15 megatoni di energia. Un peschereccio giapponese a settanta miglia marine avvertì l'esplosione: ne videro i lampi di fuoco, sentirono il suo boato, videro il fungo di polvere salire in cielo. Dopo mesi i pescatori ebbero complicazioni di salute per effetto delle radiazioni subite uno di loro morì. L'atollo di Bikini è tuttora privo di vita. A seguito del test Castle Bravo, il nome di Bikini fu dato a un costume da bagno.

LA PILA DI FERMI

Con "pila di Fermi" si intende il primo prototipo di reattore nucleare che permise di realizzare la prima reazione a catena. Il 2 dicembre 1942 un gruppo di una quarantina di fisici e tecnici realizzò la pila sotto la supervisione di Enrico Fermi, presso lo stadio di squash dell'Università di Chicago, che sarebbe poi diventato lo stadio di Stagg Field. Di questo apparato restano poche foto e qualche riproduzione a schizzo.



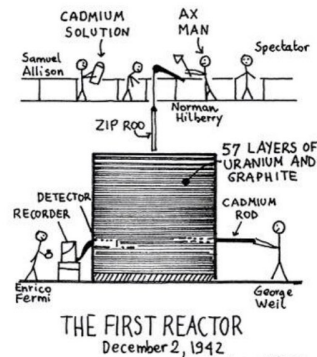
Immagine dall'alto della pila di Fermi in costruzione, sotto un dettaglio



Disegno raffigurante la pila di Fermi

Costituita da circa 360 tonnellate di mattoni di grafite, larga sette metri e alta due piani, poteva alloggiare 18000 solidi di uranio di forma ovoidale di due chilogrammi e mezzo l'uno, posti nella parte centrale della pila, dove i mattoni erano opportunamente forati. Nella pila erano poste anche alcune barre di cadmio, il cui inserimento era regolabile dall'esterno e che avrebbero potuto regolare il numero di neutroni termici all'interno della pila, in quanto il cadmio è un loro buon assorbitore. In questo modo si sarebbe evitato un processo di accensione della pila troppo rapido o incontrollato: regolando le barre si sarebbe realizzata la reazione a catena gradualmente. Una barra

di cadmio sospesa attraverso una fune, pronta a essere rilasciata tramite un taglio netto della fune da parte di un “tecnico-boia” (*SCRAM, Safety Control-Rod Axe Man*), e tre uomini pronti a rovesciare secchi colmi d’acqua e cadmio sulla pila erano i due sistemi di sicurezza rudimentali del reattore.



Schema della pila di Fermi

In una fissione di un nucleo di uranio 235 vengono prodotti circa 2,5 neutroni. Di questi uno può termalizzarsi e rendersi utile per una seconda fissione, che può ripetersi allo stesso modo, dando vita a una reazione a catena. Gli altri neutroni prodotti possono essere assorbiti dall’uranio 238 o perdersi nel reattore. Il reattore è critico quando il rapporto k tra i neutroni prodotti in una fissione e la somma di quelli assorbiti o perduti nella generazione precedente è pari a uno. In questo caso la catena si autosostiene. Prima del 2 dicembre, Fermi continuò per mesi a controllare la reattività del reattore mentre il numero di mattonelle impilate cresceva. Il 2 dicembre la pila era prossima alla condizione di criticità. Verso le due del pomeriggio Fermi diede inizio alla prova. Fece estrarre le barre di cadmio tranne una e iniziò a misurare il fattore di criticità k . Se k fosse stato inferiore a uno la reazione si sarebbe spenta (si generano meno neutroni termici di quelli necessari), se superiore a uno si sarebbe entrati in regime sovracritico con la liberazione di un’enorme quantità di energia, se il processo non fosse stato inibito. Fermi decise di togliere gradualmente l’ultima barra, mentre misurava la radioattività prodotta nella reazione. Alle ore 15:53 il fattore k raggiunse un valore pari a 1,0006 e la reazione si autososteneva. Il primo reattore nucleare era entrato in funzione e aveva dato prova di una reazione a catena compiuta.

Va ricordato che la pila di Fermi in realtà funzionava controllando principalmente i neutroni non emessi dalle fissioni di uranio 235. I neutroni emessi dalle fissioni, infatti, detti neutroni prompt o immediati o veloci, costituiscono il 98% della quantità totale dei neutroni presenti nel reattore in condizioni prossime alla criticità, ma la legge di aumento o diminuzione è esponenziale, il che espose la pila a uno scarso controllo, col rischio di un’esplosione. Per questo motivo Fermi decise di tenere la pila in regime di sottocriticità per l’effetto dei neutroni prompt e di regolare il fattore k attraverso il flusso di neutroni ritardati emessi da altre reazioni nucleari, generate per effetto dei neutroni assorbiti dall’uranio 238 o persi nel reattore. Un neutrone generato da una fissione è infatti veloce. Prima di termalizzarsi può generare altri neutroni veloci per scissione all’interno del blocco di uranio (sono i neutroni con energia maggiore di 1 MeV e quindi superiori alla soglia di energia per scissione). Nel processo di termalizzazione questi attraversano la zona delle risonanze e possono essere assorbiti dal 238, dando vita a U 239 e quindi poi plutonio (fissile) e nettunio oppure dal moderatore. Molti nuclei che si venivano così a creare, infatti, emettevano neutroni con tempi più lunghi, anche dell’ordine del minuto, col vantaggio di essere più facilmente controllati dalle barre di cadmio.

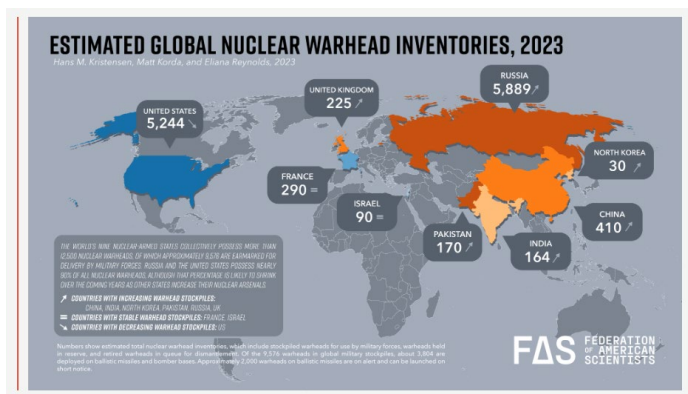
La pila di Fermi aveva avuto perciò un ulteriore merito. Aveva infatti dimostrato che era possibile una reazione a catena sfruttando l'uranio 238. L'uranio utilizzato nella pila era infatti di origine naturale: 4,5 tonnellate di uranio metallico e 45,5 tonnellate di ossido di uranio. Considerando che l'uranio contiene al 99,3% l'isotopo 238 e solo per lo 0,7% l'isotopo 235, appare evidente che il materiale utilizzato per sostenere la reazione era in gran parte uranio 238. Come anticipato sopra, l'uranio 238 irraggiato di neutroni veloci si trasforma nel nucleo composto di uranio 239, che a sua volta decade in plutonio 239. Anche questa trasformazione riconosciuta nella pila di Stagg Field costituisce un ulteriore merito del dispositivo progettato da Fermi. Per la prima volta si comprese come produrre plutonio [C, D].

AGGIORNAMENTI 2023.

Armi nucleari nel mondo.

Il numero complessivo di armi nucleari presenti sul pianeta al 2022 è di 12705⁵ [E], così distribuite: Francia 290, Regno Unito 225, Israele 90, Russia 5977, Corea del Nord 20, Cina 350, USA 5428, India 160, Pakistan 165). 9440 sono parte di scorte militari, 3732 invece sono dispiegate e operative, con 2000 di pronto utilizzo [F]. Regno Unito, Corea del Nord, Cina e Pakistan sono i paesi che hanno aumentato il numero di ordigni dal 2021 al 2022.

Attualmente la situazione è visibile nella seguente pianta (sul sito della Federation of American Scientists: fas.org):



Una dettagliata ripartizione dell'arsenale nucleare è fornita, ad esempio, nella successiva sinossi:

⁵ Non è semplice fare una valutazione esatta del numero di ordigni nucleari presenti sul pianeta, in quanto molti stati non comunicano esattamente numero e tipologia di armamenti

Table 1. United States nuclear forces, 2023.

Type/Designation	No.	Year deployed	Warheads x yield (kilotons)	Warheads (total available) ^a
ICBMs				
LGM-30G Minuteman III				
Mk12A	200	1979	1–3 W78 x 335 (MIRV)	600 ^b
Mk21/SERV	200	2006 ^c	1 W87 x 300	200 ^d
Total	400^e			800^f
SLBMs				
UGM-133A Trident II D5/LE	14/280 ^g			
Mk4A		2008 ^h	1–8 W76-1 x 90 (MIRV)	1,511 ⁱ
Mk4A		2019	1–2 W76-2 x 8 (MIRV) ^j	25 ^k
Mk5		1990	1–8 W88 x 455 (MIRV)	384
Total	14/280			1,920^l
Bombers				
B-52H Stratofortress	87/46 ^m	1961	ALCM/W80-1 x 5–150	500
B-2A Spirit	20/20	1994	B61-7 x 10–360/-11 x 400 B83-1 x low-1,200	288
Total	107/66ⁿ			788^o
Total strategic forces				3,508
Nonstrategic forces				
F-15E, F-16C/D, DCA	n/a	1979	1–5 B61-3/-4 bombs x 0.3–170 ^p	200
Total				200^q
Total stockpile				3,708
Deployed				1,770 ^r
Reserve (hedge and spares)				1,938
Retired, awaiting dismantlement				1,536
Total inventory				5,244

ALCM: air-launched cruise missile; DCA: dual-capable aircraft; ICBM: intercontinental ballistic missile; LGM: silo-launched ground-attack missile; MIRV: multiple independently targetable reentry vehicle; SERV: security-enhanced reentry vehicle; SLBM: submarine-launched ballistic missile.

^aLists total warheads available. Only a portion of these are deployed with launchers. See individual endnotes for details.

^bRoughly 200 of these are deployed on 200 Minuteman IIIs equipped with the Mk-12A reentry vehicle. The rest are in central storage.

^cThe W87 was initially deployed on the MX/Peacekeeper in 1986 but first transferred to the Minuteman in 2006.

^dThe 200 Mk21-equipped ICBMs can each carry one W87. The estimated remaining 340 W87s are in storage. Excess W87 pits are planned for use in the W78 Replacement Program, previously designated IW-1 but now called W87-1.

^eAnother 50 ICBMs are in storage for potential deployment in 50 empty silos.

^fOf these ICBM warheads, 400 are deployed on operational missiles and the rest are in long-term storage.

^gThe first figure is the total number of nuclear-powered ballistic missile submarines (SSBNs) in the US fleet; the second is the maximum number of missiles that they can carry. All 14 SSBNs have now completed their mid-life reactor refueling overhauls and could potentially carry 280 missiles, but 2–4 are undergoing repairs at any given time and the Pentagon has stated that no more than 240 SLBMs will be deployed. The life-extended Trident II D5LE is replacing the original missile.

^hThe W76-1 is a life-extended version of the W76-0 that was first deployed in 1978.

ⁱAll W76-0 warheads are thought to have now been replaced on ballistic missile submarines by W76-1 warheads, but some are still in storage, and more have been retired and are awaiting dismantlement.

^jThe W76-2 is a single-stage low-yield modification of the W76-1 with an estimated yield of 8 kilotons.

^kAssumes two SLBMs, each with one W76-2, available for each deployable SSBN.

^lOf these SLBM warheads, approximately 1,000 are deployed on missiles loaded in ballistic missile submarine launchers.

^mOf the 87 B-52s, 76 are in the active inventory. Of those, 46 are nuclear-capable, of which less than 40 are normally deployed.

ⁿThe first figure is the total aircraft inventory, including those used for training, testing, and back-up; the second is the portion of the primary-mission aircraft inventory estimated to be tasked with nuclear missions. The United States has a total of 66 nuclear-capable bombers (46 B-52s and 20 B-2s), but normally only about 50 nuclear bombers are deployed, with the remaining aircraft in overhaul.

^oOf these bomber weapons, up to 300 are deployed at bomber bases. These include an estimated 200 ALCMs at Minot Air Force Base and approximately 100 bombs at Whiteman Air Force Base. The remaining weapons are in long-term storage. B-52H aircraft are no longer tasked with delivering gravity bombs.

^pThe F-15E can carry up to 5 B61s. Some tactical B61s in Europe are available for NATO DCAs (F-16MLU, PA-200). The maximum yield of the B61-3 is 170 kilotons, while the maximum yield of the B61-4 is 50 kilotons.

^qAn estimated 100 B61-3 and –4 bombs are deployed in Europe, of which about 60 are earmarked for use by NATO aircraft. The remaining 100 bombs are in central storage in the United States as backup and contingency missions in the Indo-Pacific region. The new B61-12 gravity bomb is in production and will begin replacing the older versions in Europe and the United States from early-2023.

^rDeployed warheads include approximately 1,370 on ballistic missiles (400 on ICBMs and 970 on SLBMs), 300 weapons at heavy bomber bases, and 100 nonstrategic bombs deployed in Europe.

Utile il link:

<https://public.tableau.com/app/profile/kate.kohn/viz/EstimatedGlobalNuclearWarheadInventorys2021/Dashboard1>

Trattati

Trattato sulle forze nucleari a raggio intermedio (INF, Intermediate – Range Nuclear Force)

Firmato nel 1987 è entrato in vigore nel giugno 1988. Prevede l'eliminazione completa delle armi nucleari lanciabili da terra (USA e U.R.S.S.) con raggio di azione tra 500 km e 5000 km. Il trattato prevede ispezioni reciproche, In base all'INF vengono smantellati 2700 missili, anche se in seguito i due stati provvederanno ad acquisire e potenziare i missili a medio raggio, anche a fronte dell'elevata capacità missilistica di Cina e Corea del Nord. Secondo gli USA nel 2014 la Russia ha

schierato il missile da crociera 9M729 in violazione del trattato INF. Nel 2019 gli Usa escono dall'INF e la Russia ne sospende l'applicazione, il che determina l'esaurimento dell'INF.

Trattato di non proliferazione (TNP)

Secondo il TNP i paesi si dividono in due categorie: NWS (nuclear weapons states) e NNWS (non nuclear weapons states). I NWS hanno prodotto e/o fatto esplodere un'arma nucleare prima del 1° gennaio 1967 e sono USA, Russia (ex – U.R.S.S.), UK, Francia e Cina. Non possono trasferire armi nucleari ai paesi NNWS o assisterli nella progettazione. I paesi NNWS non possono acquisire o gestire armi nucleari.

I paesi che hanno firmato il TNP sono 191, praticamente tutti, eccetto India, Israele e Pakistan.

La Corea del Nord ha aderito al TNP nel 1983. Nel 1993 è stato scoperto un suo programma di armamento nucleare, fino ad allora segreto. Nel 2003 è così uscita dal TNP e ha effettuato il suo primo test nucleare del 2006. Ha effettuato negli anni successivi altri test su ordigni nucleari, su missili balistici intercontinentali (ICBM) e missili balistici lanciati da sottomarini. Il numero di lanci è stato 70, il più alto di sempre.

Il TNP si basa su tre pilastri:

1. Disarmo nucleare: obbligo di negoziare il disarmo nucleare in buona fede (art. 6)
2. Non proliferazione nucleare: prevenzione della proliferazione nucleare per gli stati NNWS (artt. 1 e 2)
3. Uso pacifico dell'energia nucleare: diritto inalienabile degli stati aderenti all'uso del nucleare civile (art. 4)

È prevista una conferenza di revisione del trattato ogni 5 anni. Alla X RevConv del TNP del 2022 è stata presentata una bozza di documento finale nonostante i contrasti tra NWS e NNWS e all'interno degli stessi NWS. Il documento non è stato infine adottato a causa dell'opposizione della Russia, contraria alle conclusioni tracciate, relative all'aggressione dell'Ucraina.

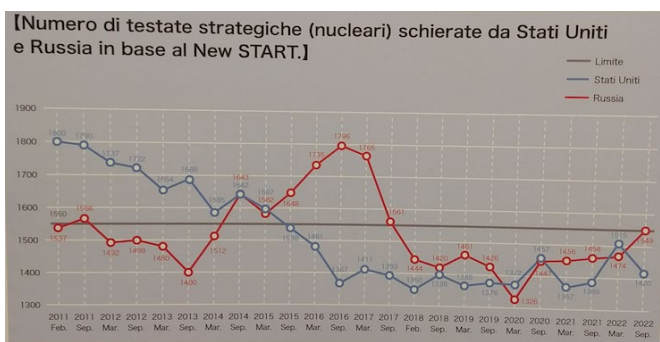
Trattato per la proibizione delle armi nucleari, o trattato per la proscrizione delle armi nucleari o trattato per la messa al bando delle armi nucleari (TPNW)

Approvato da 122 paesi nel luglio 2017, è stato firmato da 93 paesi; gli Stati aderenti al TPNW sono 68. Conviene ricordare che la firma di un trattato non vincola il paese a nessun tipo di azione conseguente, mentre la ratifica (attraverso le assemblee nazionali o altri organi deputati alla legiferazione) impone l'adeguamento legislativo al rispetto del trattato.

Il TPNW è pensato per il divieto completo delle armi nucleari. Proibisce per legge lo sviluppo, il possesso e l'uso o la minaccia delle armi nucleari.

New Start

È un trattato firmato il 10 aprile 2010 e entrato in vigore il 2011 (data di scadenza 5 febbraio 2021) e sostituisce i trattati precedenti scaduti (START, START I, START II, SORT). Prevede per USA e Russia una riduzione degli armamenti, dei missili ICBM e SLBM e bombardieri strategici, con una verifica bilaterale del rispetto del trattato. Nel 2018 la riduzione prevista è stata raggiunta e superata.



Andamento della riduzione delle armi nucleari in USA e Russia in base al New Start

NO. TOTALE DELLE ARMI STRATEGICHE OFFENSIVE DI RUSSIA E USA SOTTO IL TRATTATO NEW START, AL 5 FEB. E 1° SET. 2021							
Categoria	Limiti del Trattato ^a	Russia		USA			
	2011	feb. 2021	set. 2021	feb. 2011	set. 2021	Variaz.	Variaz.
ICBM, SLBM e bombardieri pesanti dispiegati	700	521	527	+6	882	665	-217
Testate su ICBM, SLBM e bombardieri pesanti dispiegati ^b	1.550	1.537	1.458	-79	1.800	1.389	-411
Sistemi di lancio ICBM, SLBM e bombardieri pesanti, dispiegati e non	800	865	742	-123	1.124	800	-324

ICBM = missili balistici intercontinentali; SLBM = missili balistici da lancio sottomarino.
^a Il Trattato è entrato in vigore il 5 feb. 2011. I limiti contenuti nel Trattato dovevano essere raggiunti entro il 5 feb. 2018.
^b Ogni bombardiere pesante, sia esso equipaggiato con missili da crociera o bombe a gravità, viene considerato come munito di una sola testata anche se può trasportare carichi maggiori.

L’amministrazione Biden ha prorogato per 5 anni il New Start, estendendolo fino al 5 febbraio 2026, mentre la Russia, pur non uscendo dal trattato, ha dichiarato il 21 febbraio 2023 di sospenderlo temporaneamente.

	Testate strategiche (nucleari) schierate	Veicoli strategici (nucleari) schierati		Veicoli e lanciamissili strategici schierati e non schierati
				
Limiti	1,550	700		800
Stati Uniti	1,420	659		800
Russia	1,549	540		759

Forze strategiche nucleari di USA e Russia secondo il New Start a settembre 2022 (fonte: U. S. Department of State)

La presenza tra gli NWS di un paese come la Cina ad alto incremento del numero di armi nucleari, gli USA hanno chiesto alla Cina di partecipare agli incontri sul disarmo. La Cina si è opposta, sostenendo che la sua disponibilità è legata alla riduzione degli arsenali nucleari di USA e Russia.



Tipologia di relazione tra USA, Russia e Cina sulle politiche nucleari

Disarmo nucleare

Nessun paese si oppone apertamente all'obiettivo di un mondo senza testate nucleari. Alcune misure di disarmo in atto sono le seguenti:

1. Entrata in vigore anticipata del trattato sulla messa al bando totale degli esperimenti nucleari (Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty, CNTBT)
2. Avvio dei negoziati per il trattato sulla messa al bando della produzione di materiale fissile (Fissile Material Cut off Treaty, FMCT)
3. Avvio dei negoziati per un trattato di disarmo nucleare dopo il New Start
4. Rafforzamento delle zone libere da armi nucleari
5. Impegno a non ricorrere per primi all'uso delle armi nucleari
6. Maggiore trasparenza
7. Disattivazione dello stato di allerta

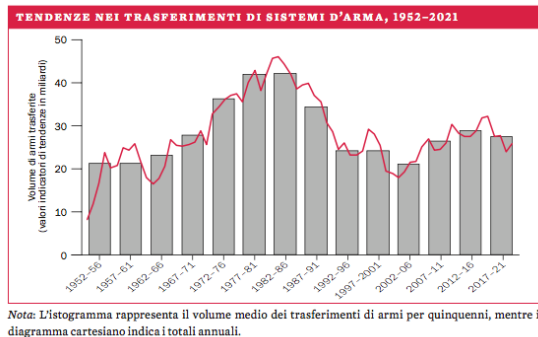
Spesa militare nel 2021

In generale, la spesa militare mondiale ammonta a 2113 miliardi di dollari, ossia il 2,2 % del PIL mondiale ed è aumentata per il settimo anno consecutivo (dello 0,7 % rispetto al 2020, del 12% rispetto al 2012). Ogni persona spende 268 dollari l'anno per le spese militari.

SPESA MILITARE MONDIALE, 2021		
Regione	Spesa (mrd US\$)	Variazione (%)
Africa	(39,7)	1,2
Africa subsahariana	20,1	4,1
Nord Africa	(19,6)	-1,7
Americhe	883	-1,2
America centrale e Caraibi	11,0	-2,5
Nord America	827	-1,2
Sud America	45,3	-0,6
Asia e Oceania	586	3,5
Asia centrale	1,8	-0,8
Asia meridionale	95,1	0,8
Asia orientale	411	4,9
Oceania	35,3	3,5
Sud-est asiatico	43,1	-2,3
Europa	418	3,0
Europa centrale e occidentale	342	3,1
Europa orientale	76,3	2,3
Medio Oriente	(186)	-3,3
Totale mondiale	2.113	0,7

() = stime incerte.
 Nota: Dati espressi in dollari statunitensi a prezzi e tassi di cambio correnti. Variazioni espresse in termini reali sulla base di dollari statunitensi a prezzi correnti (2020).

Le prime 100 aziende produttrici di armi hanno guadagnato 531 mld di dollari nel 2020. 41 di queste sono statunitensi, 5 cinesi.



I primi 25 stati dei 60 che esportano sistemi d'arma hanno fornito il 99% delle esportazioni (I primi sei: USA, Russia, Francia, Cina, Germania, Italia).

PRINCIPALI ESPORTATORI E IMPORTATORI DI SISTEMI D'ARMA, 2017-21				
Esportatore	Quota sull'export globale (%)	Importatore	Quota sull'import globale (%)	
1 USA	39	1 India	11	
2 Russia	19	2 Arabia Saudita	11	
3 Francia	11	3 Egitto	5,7	
4 Cina	4,6	4 Australia	5,4	
5 Germania	4,5	5 Cina	4,8	
6 Italia	3,1	6 Qatar	4,6	
7 Regno Unito	2,9	7 Corea del Sud	4,1	
8 Corea del Sud	2,8	8 Pakistan	3,0	
9 Spagna	2,5	9 EAU	2,8	
10 Israele	2,4	10 Giappone	2,6	

EAU = Emirati Arabi Uniti.

dal rapporto SIPRI

Bibliografia:

- [A] Heinrich Jaenecke, L'apocalisse atomica, Edizioni Cultura della Pace, 1991
- [B] Abraham Pais, Il danese tranquillo, Bollati Boringhieri, 1993
- [B bis] W. Heisenberg, Research in Germany on the technical application of atomic energy, in Nature, CLX, 211, 1947;
- [C] E. Fermi, Elementary theory of chain-reacting pile, in Science, CV, 27, 1947;
- [D] H. D. W. Smyth, Atomic energy for military purposes, Princeton 1945;
- [E] Sipri 2022
- [F] SIPRI Yearbook 2021, Armaments, Disarmament and International Security

Allegato 1 al documento finale del GdL_6 della PNNS del MASE

Ricognizione sulle attività di insegnamento in fisica nucleare pre-diploma.

Sono stati contattati i seguenti enti nazionali di riferimento per la didattica della fisica in merito ai fondamenti e alle applicazioni del Nucleare in Italia:

- INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare), sede nazionale, gruppo di lavoro COLLISIONI <https://collisioni.infn.it/> ;
- AIF (associazione Insegnanti di Fisica);
- SIF (Società Italiana di Fisica). Il dipartimento di Fisica di UNIMI - sezione didattica della Fisica ha infine svolto indagini in archivi istituzionali, su un campione qualificato di scuole di territori ad alto BES (Benessere equo e sostenibile – ISTAT) e con docenti collegati attraverso specifici programmi di orientamento (PLS).

Esiti

Si evidenzia in generale una scarsità di dati inerenti iniziative didattiche formali (lezioni curricolari ed extracurricolari), informali (conferenze, seminari, visite laboratori) e divulgative (attività di disseminazione, mostre, eventi). I dati raccolti permettono alcune considerazioni sulla reale diffusione dell'insegnamento e più in genere della cultura nucleare nella scuola secondaria di secondo grado.

È emerso quanto segue:

- Nell'ordinamento antecedente al riordino scolastico Gelmini (L. 103 6/8/2008, L. 169 30/10/2008) era prevista la figura del "perito nucleare", come esito del corso di studi degli Istituti tecnici industriali con indirizzo Energia Nucleare. Tali figure a esaurimento (fonte AIF) hanno principalmente accesso a ruoli tecnici nella scuola per la classe di concorso AR09. A seguito della riforma la didattica della Fisica Nucleare è quindi confluita negli Istituti tecnici, settore tecnologico, a indirizzo **Meccanica, Meccatronica ed Energia**. Gli studenti coinvolti sono relativamente pochi: il 19.4% (fonte MIM⁶) degli studenti italiani sceglie questo settore,

⁶ <https://www.miur.gov.it/-/iscrizioni-all-anno-scolastico-2023-2024-i-primi-dati-in-aumento-le-domande-agli-istituti->

e di questi solo il 2.8% sceglie l'indirizzo Meccanica, Meccatronica ed Energia. Da una analisi a campione dei P.T.O.F.⁷ istituzionali tale valore sembrerebbe ancor più ridotto, dato che l'insegnamento di tematiche nucleari è a discrezione dei singoli istituti che spesso le espungono dall'offerta formativa.

- L'offerta alle scuole di **attività** non sistematiche, spesso locali, di **fisica nucleare** proviene in parte dall'INFN che raggiunge con diverse proposte la maggior parte delle scuole secondarie (visite guidate ai laboratori, masterclass, PCTO, formazione per i docenti);

- altre proposte per le scuole arrivano dal **CERN** o dalla collaborazione **ITER**; 1 <https://www.miur.gov.it/-/iscrizioni-all-anno-scolastico-2023-2024-i-primi-dati-in-aumento-le-domande-agli-istituti-tecnici-il-57-1-sceglie-i-licei> 2 Piano Triennale dell'Offerta Formativa,

- attività di singoli laboratori universitari dedicati soprattutto alla **radioattività ambientale**, come risulta anche dalla letteratura⁸;

- la **SIF** ha pubblicato una serie dedicata specificamente alla Fisica Nucleare nell'ottica dell'insegnamento nella scuola secondaria; <https://www.sif.it/attivita/energy/scuola>

- nei licei del campione ad alto profilo scolastico (prove INVALSI di Matematica) esaminato da **UNIMI** l'attività didattica in Fisica Nucleare è limitata al solo 30% degli utenti. Quando svolta è caratterizzata da un numero medio di ore inferiore a 6 per l'intero ciclo e, quando superiore, svolta in discipline non necessariamente scientifiche.

tecnici-il-57-1-sceglie-i-licei.

⁷ Piano Triennale dell'Offerta Formativa

⁸ Groppi, F., Bazzocchi, A., Manenti, S., Gini, L., & Bonardi, M. L. (2009, August). Radon Laboratory: A Proposal for Scientific Culture Dissemination Among Young Students in Italy. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1164, No. 1, pp. 93-99). American Institute of Physics.

Colucci, M., Ambrosino, F., La Verde, G., Groppi, F., & Pugliese, M. (2023). ISOradioLab: an educational project on environmental radioactivity for Italian minor islands—the case study of Lampedusa and Linosa. The European Physical Journal Plus, 138(8), 691.

La Verde, G., Longobardi, C., Fronzino, T., La Commara, M., D'Avino, V., Coppola, F., & Pugliese, M. (2020). Environmental radiation and risk perception: A survey in the Campania region (southern Italy). Il Nuovo Cimento- B, 43(C), 150.

Groppi, F., Bonardi, M. L., Manenti, S., Gini, L., & Bazzocchi, A. (2014). Radon indoor measurements a way to educate to nuclear issue: Italian radiolab project. In Program Abstract Book: 4th International Nuclear Chemistry Congress (INCC) (pp. 61-61). [sn].

Commenti

Secondo AIF gli Obiettivi specifici di apprendimento per la parte riguardante la fisica del '900 sono spesso disattesi nelle scuole secondarie per diversi motivi che si possono così riassumere:

- la collocazione all'ultimo anno di tutta la fisica moderna: si sperimenta una minore disponibilità degli stessi studenti ad acquisire contenuti nuovi quando si è chiamati a diversi impegni: PCTO, Orientamento universitario, preparazione alle prove di accesso universitarie, preparazione dell'Esame di Stato;
- solo il 38% dei docenti di Fisica nelle scuole secondarie di secondo grado possiede una laurea in Fisica e può ragionevolmente aver affrontato studi di Fisica Nucleare. Alla luce dei dati riportati, emerge la necessità di un **corso di aggiornamento** per docenti della scuola secondaria e di introdurre un indirizzo di studi specialistico in fondamentali e applicazioni di fisica nucleare, attraverso una progettazione nel **gruppo di lavoro sulla riforma degli Istituti Tecnici**, anche attraverso una interlocuzione interministeriale MASE-MIM.

3 Groppi, F., Bazzocchi, A., Manenti, S., Gini, L., & Bonardi, M. L. (2009, August). Radon Laboratory: A Proposal for Scientific Culture Dissemination Among Young Students in Italy. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1164, No. 1, pp. 93-99). American Institute of Physics.

Colucci, M., Ambrosino, F., La Verde, G., Groppi, F., & Pugliese, M. (2023). ISOradioLAB: an educational project on environmental radioactivity for Italian minor islands—the case study of Lampedusa and Linosa. *The European Physical Journal Plus*, 138(8), 691.

La Verde, G., Longobardi, C., Fronzino, T., La Commara, M., D'Avino, V., Coppola, F., & Pugliese, M. (2020). Environmental radiation and risk perception: A survey in the campania region (southern Italy). *Il Nuovo Cimento- B*, 43(C), 150.

Groppi, F., Bonardi, M. L., Manenti, S., Gini, L., & Bazzocchi, A. (2014). Radon indoor measurements a way to educate to nuclear issue: Italian radiolab project. In *Program Abstract Book: 4th International Nuclear Chemistry Congress (INCC)* (pp. 61-61). [sn].

Allegati

Elenco allegati

- All. 1 – Locandina del corso di formazione STEM del Politecnico di Milano
- All. 2 – Presentazione del corso di formazione in fisica e ingegneria nucleare del Politecnico di Milano
- All. 3 – Calendario del corso di formazione per docenti della scuola secondaria, svolto al liceo “A. Banfi” di Vimercate
- All. 4 – Comunicazione del Tutor d’aula in merito alla figura del coordinatore scientifico

Locandina del corso di formazione STEM del Politecnico di Milano

Destinatari

Docenti della scuola secondaria di primo e secondo grado con l'interesse ad approfondire tematiche inerenti le discipline STEM e a formarsi sulle nuove frontiere della didattica.

Contenuti

Il corso si divide in due parti, la prima composta da due moduli:

- il **primo modulo** consiste in un percorso a scelta, ognuno composto da **4 webinar** sincroni e accesso a materiali didattici asincroni. Le lezioni saranno tenute da docenti del Politecnico di Milano su temi tecnico-scientifici innovativi, fornendo dispense e video didattici. La durata del modulo sarà di 6 settimane, durante le quali saranno distribuite le lezioni. È consentita l'iscrizione solo a uno dei tre percorsi disponibili;
- il **secondo modulo**, distribuito nell'arco di 4 settimane, è composto da **2 webinar** e ha come oggetto la didattica innovativa. È prevista una parte di studio individuale sul materiale fornito.

La seconda parte del corso consisterà nella realizzazione di un **"project work"** basato sui due moduli. Ai partecipanti sarà chiesto di progettare e realizzare un'attività innovativa con i propri studenti, sui temi del percorso STEM seguito. Al termine, dovrà essere consegnato un report dell'attività.

È richiesta la frequenza di almeno il **90%** degli incontri online e la consegna del project work per ottenere l'attestato di fine corso.

Obiettivi

Equipaggiare i docenti in servizio con conoscenze STEM e fornire degli strumenti didattici innovativi da portare in classe.

Collaborazioni

Progetto realizzato all'interno del progetto MUSA – Multilayered Urban Sustainability Action, finanziato dall'Unione Europea – NextGenerationEU, PNRR Missione 4 Componente 2 Linea di Investimento 1.5: Creazione e rafforzamento degli "ecosistemi dell'innovazione", costruzione di "leader territoriali di R&S"

Programma dei webinar sincroni

(gli orari e i giorni sono in via di definizione)

Apertura del Corso

Lunedì 2 Ottobre 2023

Presentazione del corso e saluti: Prof.ssa Di Blas

Percorso a scelta

Periodo Lunedì 2 Ottobre – Venerdì 13 Novembre 2023

- *La struttura nascosta di internet: Prof. Capone*
- *Fisica e ingegneria nucleare: Prof. Passoni*
- *Personaggi e scoperte della Fisica Moderna: Prof.ssa Russo*

Modelli didattici innovativi

Periodo Lunedì 21 Novembre 2023 – Venerdì 19 Gennaio 2024

- *Didattica Innovativa: Prof.ssa Di Blas*

Project Work

Lunedì 22 Gennaio – Venerdì 26 Aprile 2024

Finestra di consegna del project work

Chiusura del corso

Venerdì 10 Maggio 2024

Webinar di chiusura, saluti e ringraziamenti finali

Modalità di svolgimento

Durata:

35 ore
Ottobre 2023 – Maggio 2024

Orario dei webinar sincroni:

17.00 – 19.00 (orario indicativo)

Presso:

Il corso si terrà interamente online sulla piattaforma Teams. Il materiale didattico sarà fornito tramite la piattaforma Moodle.

Docenti

Prof. Antonio Capone – professore ordinario di Telecomunicazioni presso il Politecnico di Milano, preside della Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione. Le sue competenze sono nell'ambito delle reti di comunicazione e le sue principali attività di ricerca includono la gestione delle risorse in reti radio, l'ingegneria del traffico in software defined networks, la pianificazione e l'ottimizzazione di rete;

Prof.ssa Nicoletta Di Blas – professoressa associata di Didattica e Pedagogia Speciale presso il DEIB. Tiene corsi di comunicazione e è responsabile scientifica di HOC – LAB dove si occupa di ricerca nella didattica innovativa; dirige il DOL, il master online di tecnologie dell'educazione e il MIDIS, master per l'innovazione scolastica;

Prof. Matteo Passoni – professore ordinario di Fisica della Materia presso il Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano, dove insegna Fisica Nucleare e Fisica dei Plasmi. È attualmente vice-preside della Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e coordinatore del Corso di Studi in Ingegneria Nucleare;

Prof.ssa Valeria Russo – professoressa associata di Fisica della Materia presso il Dipartimento di Energia dove tiene gli insegnamenti di Fisica Atomica e Fisica della Materia. Le sue competenze sono nell'ambito della caratterizzazione di materiali e superfici nanostrutturati.

Presentazione del corso di formazione in fisica e ingegneria nucleare del Politecnico di Milano



POLITECNICO
MILANO 1863

FISICA & INGEGNERIA NUCLEARE

a cura del prof. Matteo Passoni – Fisica della Materia

Descrizione del modulo

Nello sviluppo delle competenze di fisica acquisite nelle scuole è facile imbattersi nello studio dell'atomo e della sua struttura, costituita dagli elettroni e dal nucleo. Tuttavia, quasi sempre si trascura la fisica dei nuclei atomici, i quali, a differenza degli elettroni (particelle elementari), presentano una struttura molto complessa e ricca di proprietà. Tali proprietà, del tutto inedite rispetto ad altri sistemi fisici, aprono all'esplorazione di fondamentali capitoli della fisica moderna e – se adeguatamente comprese e sfruttate – permettono lo sviluppo di applicazioni di grande rilevanza ingegneristica e sociale nei campi più disparati, come la medicina, l'archeologia, la cosmologia e la produzione di energia.

Il modulo affronterà le nozioni di base relative alla struttura e ai costituenti del nucleo atomico e alle dinamiche che ne regolano il comportamento nel tempo e l'interazione con altri nuclei e sistemi fisici. A questo scopo, si presenteranno i diversi modelli che ne descrivono le proprietà. Si studieranno poi i fenomeni radioattivi e i principali tipi di reazioni nucleari, evidenziando la loro presenza e rilevanza in natura, la loro realizzazione in laboratorio e il loro sfruttamento per lo sviluppo di importanti applicazioni ingegneristiche.

Organizzazione del modulo

Il modulo è suddiviso in **4 parti**. I partecipanti avranno accesso a diversi **materiali didattici online**, tra cui dispense e video. Durante l'erogazione, verrà chiesto ai partecipanti di svolgere riflessioni personali su quanto appreso e/o esercizi volti all'applicazione dei concetti sviluppati. I partecipanti saranno in contatto costante con docenti e tutor del Politecnico. Inoltre, grazie a un **forum online** potranno lavorare insieme agli altri iscritti all'interno di una classe virtuale. È prevista infine anche la partecipazione a dei **webinar**, tenuti dal docente e dai suoi collaboratori.

Struttura del modulo

Parte I: Forniremo alcune nozioni fisiche di base, imprescindibili per affrontare lo studio della fisica nucleare e i concetti più avanzati sviluppati nelle parti successive. Partiremo dall'introduzione di unità di misura, metodi sperimentali e nozioni fondamentali di relatività speciale, elettromagnetismo e meccanica quantistica, per poter investigare il comportamento dei nuclei nello spazio-tempo. Passeremo poi in rassegna le principali tipologie di nuclei e le loro caratteristiche osservabili sia in natura sia in laboratorio, con particolare riferimento all'esistenza di nuclei stabili e instabili e alle loro proprietà elettromagnetiche ed energetiche.

Tra gli esempi trattati:

- Misurare su scala nucleare.
- Nuclei stabili e instabili, sulla Terra e nell'Universo.
- Relatività speciale e fisica nucleare (difetti di massa, vita dei muoni cosmici).
- Positroni: l'antimateria del quotidiano.

- Dallo spin dei nuclei alla Risonanza Magnetica Nucleare.

Parte 2: In questa parte ci concentreremo sui costituenti del nucleo, o *nucleoni* (cioè protoni e neutroni) e sulla *forza nucleare forte*, responsabile dell'esistenza stessa dei nuclei. Verranno poi introdotti alcuni modelli utilizzati per descrivere la complessa struttura e il comportamento fisico dei nuclei: il *modello a goccia di liquido* – utile per spiegare le masse dei nuclei e la fissione nucleare – e il *modello a shell* (a guscio), in cui si prevede che i nucleoni si muovano occupando orbitali, in modo analogo agli elettroni in un atomo. Secondo questo modello, la particolare stabilità osservata sperimentalmente per alcuni nuclei si spiega tramite specifiche configurazioni nucleari, descritte dai cosiddetti *numeri magici*.

Tra gli esempi trattati:

- Nuclei di dimensioni astronomiche: le stelle di neutroni.
- I nuclei doppi magici: dalla particella alfa al Piombo-208.
- Predizione di isole di stabilità e ricerca di nuovi elementi super-pesanti.

Parte 3: La *radioattività* è presente da sempre sulla Terra. Esistono alcuni nuclei instabili in grandi quantità in natura, come il Potassio-40, il Torio-232 e l'Uranio-238, che emettono lentamente *radiazioni*, modificando la loro struttura e trasformandosi in nuclei più stabili, dando luogo alla formazione di elementi con proprietà fisico-chimiche completamente differenti. Tale processo si chiama *decadimento radioattivo*, responsabile non solo dell'energia geotermica, ma anche dell'esistenza di un *fondo di radioattività naturale*, nel quale siamo immersi. Durante questa parte, affronteremo lo studio dei processi di decadimento radioattivo ed esempi di radioattività in natura con la loro applicazione pratica in diversi campi.

Tra gli esempi trattati:

- La radioattività del cielo, della terra, del corpo umano.
- Radioisotopi per la medicina nucleare: Tecnezio-99m, Fluoro-18.
- Utilizzo della radioattività per la datazione: il Carbonio-14.
- Fisica fondamentale e radioattività: decadimento del Trizio e massa del neutrino, decadimento del neutrone e modello standard.

Parte 4: Nella quarta parte discuteremo le *reazioni nucleari*, processi – come la fissione e la fusione – che portano alla trasformazione del nucleo di un elemento in quello di un altro elemento. Processi di questo tipo avvengono in ogni istante nel Sole e nelle stelle, producendo calore, luce e altre particelle, ma anche sulla Terra. Studieremo le principali tipologie di reazioni nucleari, le condizioni e i metodi che portano alla loro realizzazione in natura e in laboratorio, insieme ad alcuni modelli per la loro descrizione. Concluderemo con esempi di reazioni nucleari, presenti in natura o prodotte dall'uomo per lo sviluppo di fondamentali applicazioni, dalla “medicina nucleare” alla produzione di energia.

Tra gli esempi trattati:

- Reazioni nucleari naturali in atmosfera.
- Il cuore a fusione nucleare delle stelle.
- Reazioni nucleari per lo studio dei beni culturali.
- Reattori nucleari a fissione come fonte di energia.
- Le ricerche sulla fusione termonucleare controllata.
- Macchine per realizzare reazioni nucleari: gli acceleratori di particelle.

Note biografiche

Matteo Passoni – È Professore ordinario di Fisica della Materia presso il Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano, dove insegna Fisica Nucleare e Fisica dei Plasmi ed è attualmente vice-preside della Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione, coordinatore del Corso di Studi in Ingegneria Nucleare e vice-coordinatore del programma di dottorato in Scienze e Tecnologie Energetiche e Nucleari. I suoi interessi di ricerca spaziano dalla fisica dei plasmi e fusione nucleare alle nanotecnologie, dalla scienza dei materiali alle applicazioni della fisica nucleare. È

responsabile scientifico dei progetti ENSURE (ERC Consolidator grant), INTER e PANTANI (ERC Proof of Concept grant), finanziati dallo European Research Council e dedicati allo sviluppo di tecniche innovative di accelerazione di particelle, e delle attività svolte al Politecnico sulla fusione termonucleare, anche nell'ambito del consorzio europeo EUROfusion. Collabora con prestigiosi istituti di ricerca come l'ENEA (Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile), il CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) e l'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare). Tra articoli su riviste scientifiche e capitoli di libri, ha all'attivo oltre 140 pubblicazioni. È stato invitato come conferenziere e relatore in numerosi istituti di ricerca nazionali e internazionali.

Calendario del corso di formazione per docenti della scuola secondaria, svolto al liceo “A. Banfi” di Vimercate



Liceo Scientifico Statale con Sezione - Classica Aggregata “A. BANFI”
Via Adda 6 – 20871 Vimercate (MB) – Tel: 039/6852263 – 039/6852264 – C.F. 87008180157
Sito web www.liceobanfi.edu.it – e – mail: mbps240002@istruzione.it - mbps240002@pec.istruzione.it

“Fisica nucleare con metodi e strumenti di didattica digitale integrata”

Percorso di formazione docenti in 5 incontri a cura del Dott. Paolo Teruzzi (UNIMI)

In presenza presso il Liceo Scientifico A. Banfi di Vimercate
oppure
in collegamento MEET

2 maggio, 15:00-17.00

Paolo Teruzzi (PhD school in Physics, Astrophysics and Applied Physics; Università degli Studi di Milano)
Fondamenti di fisica nucleare e strumenti di didattica digitale CAWI

15 maggio, 15:00-17.00

Paolo Teruzzi (PhD school in Physics, Astrophysics and Applied Physics; Università degli Studi di Milano)
Decadimenti nucleari, fissione e fusione nucleare. Digitalizzazione dei processi stocastici.

29 maggio, 15:00-17.00

Simone Bottoni (Ricercatore in Fisica Nucleare e Subnucleare; Università degli Studi di Milano)
Studio delle proprietà del nucleo con reazioni

19 settembre, 15:00-17.00

Silvia Leoni (Professore Ordinario di Fisica Nucleare e Subnucleare; Università degli Studi di Milano)
Applicazioni interdisciplinari della fisica nucleare: astrofisica e fisica medica

26 settembre 15:00-17.00

Nicola Gherardo Ludwig (Professore Associato di Fisica Applicata ai Beni Culturali; Università degli Studi di Milano)
Applicazioni della fisica nucleare allo studio dei Beni Culturali



Comunicazione del Tutor d'aula in merito alla figura del coordinatore scientifico



Liceo Scientifico Statale con Sezione - Classica Aggregata "A. BANFI"
Via Adda 6 - 20871 Vimercate (MB) - Tel: 039/6852263 - 039/6852264 - C.F. 87008180157
Sito web www.liceobanfi.edu.it - e - mail: mbps240002@istruzione.it - mbps240002@pec.istruzione.it

Vimercate, 16/4/2025

Gent.mo Prof. Nicola Ludwig,

in qualità di Tutor del percorso di formazione del personale scolastico in fisica nucleare, dichiaro che per la progettazione e la realizzazione dei due moduli il nostro Istituto si è avvalso del supporto al coordinamento scientifico del Dott. Paolo Teruzzi, della PhD School of Physics, Astrophysics and Applied Physics dell'Università degli Studi di Milano, coerentemente con gli obiettivi del suo progetto di ricerca.

Le dettaglio di seguito gli estremi del percorso formativo, disponibili sul sito di istituto alla pagina web <https://web.spaggiari.eu/sdg2/Trasparenza/mils0027?idCategoria=110301>:

Percorso per la formazione del personale scolastico per la transizione digitale previsto dal progetto "RinnovaMenti":
Fisica nucleare con metodi e strumenti di didattica digitale integrata

Protocollo: 1496/2024 del 28/03/2024;

Percorso per la formazione del personale scolastico per la transizione digitale previsto dal progetto "RinnovaMenti":
Fisica nucleare con metodi e strumenti di didattica digitale integrata – modulo 2

Protocollo: 3636/2024 del 21/10/2024.

Le comunico, inoltre, che il Dott. Paolo Teruzzi ha inoltre supportato il coordinamento scientifico dell'attività di Workshop didattico sperimentale "La fisica nucleare in classe", i cui estremi sono reperibili sul sito di istituto alla pagina web sopra riportata, Protocollo: 3901/2024 del 05/11/2024.

Cordiali saluti,

Prof.ssa Fanny Camapana

Docente tutor del percorso formativo

Fanny Camapana

Bibliografia

Bibliografia

- [1] Arun Agarwal. *Nobel Prize Winners in Physics*. New Delhi: APH Publishing, 2008.
- [2] Agostino. *De magistro*. Brescia: Morcelliana, Scholé, 2023.
- [3] N. Alamanos. "An introduction to the school "Rewriting Nuclear Physics Textbooks: one step forward" and future perspectives". In: *The European Physical Journal Plus* 135.5 (2020), p. 417.
- [4] A. H. Ali e S. N. K. Rubani. *Student-centred Learning: An Approach in Physics Learning Style using PBL Method*. Available online: http://eprints.uthm.edu.my/294/1/ahmad_hadi_ali._ICTLHE.pdf, accessed on 2010/08/16. 2009.
- [5] Ugo Amaldi. *New Amaldi for Science High Schools. Blue*. Zanichelli Editore, 2020.
- [6] Günther Anders. *L'Uomo sul Ponte*. Sesto San Giovanni: Mimesis, 2024.
- [7] Tom M. Apostol. *Calculus*. Vol. 1. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [8] S. Arh. "A lecture on nuclear physics in primary school". In: *Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe 2004*. A cura di I. Jencic e M. Tkavc. Nuclear Society of Slovenia, 2004.
- [9] F. W. Aston. *Isotopes*. Edward Arnold, 1922.
- [10] H. S. Ayvaci e H. Bakirci. "Determining the opinions of students from different grades about nuclear energy". In: *Energy Education Science and Technology Part B: Social and Educational Studies* 4.3 (2012), pp. 1253–1268.
- [11] Gaston Bachelard. *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*. Vol. 1161. Paris: Presses Universitaires de France, 1951.
- [12] Frank B. Baker. *The Basics of Item Response Theory*. Washington: ERIC Clearinghouse on Assessment e Evaluation, 2001.
- [13] R. D. C. Barabas e G. Sabundjian. "Nuclear energy education scenario around the world". In: *International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2013*. ISBN: 978-85-99141-05-2. Associação Brasileira de Energia Nuclear. Recife, PE, Brazil, 2013.

- [14] S. Baroni. *La fusione nucleare. Mito o realtà?* Milano: Ulrico Hoepli Editore, 2023.
- [15] R. O. Bastos, Boff C. A. e F. L. Melquiades. "Nuclear physics experiments with low cost instrumentation". In: *Physics Education*. 2016, 51(6).
- [16] R. O. Bastos, C. A. Boff e F. L. Melquiades. "Nuclear physics experiments with low cost instrumentation". In: *Physics Education* 51.6 (2016), p. 065013.
- [17] G. Baumont et al. "Review of the Content Analysis of Physics School Books Coming From Different European Countries on Radioactivity and Nuclear Energy". In: *International Conference on Nuclear Engineering*. Vol. 57861. American Society of Mechanical Engineers, 2017, V008T12A001.
- [18] Henri Becquerel. *Recherches sur une propriété nouvelle de la matière: activité radiante spontanée ou radioactivité de la matière*. L'Institut de France, 1903.
- [19] Henri Becquerel. "Sur les radiations émises par phosphorescence". In: *C.R. Acad. Sci.* 122 (1896), pp. 420–421.
- [20] H. Bergson. *Le due fonti della morale e della religione*. Milano: SE, 2006.
- [21] Henri Bergson. *Les Deux Sources de la Morale et de la Religion*. Paris: PUF, 1932.
- [22] Henri Bergson. *Mélanges*. Paris: PUF, 1972.
- [23] Carlo Bernardini e Luisa Bonolis, cur. *Conoscere Fermi: Nel Centenario della Nascita, 29 Settembre 1901–2001*. In particolare: Gandini, A., Dalla Chicago Pile 1 ai Reattori della Prossima Generazione, pp. 205–222. Bologna: SIF Edizioni Scientifiche, 2002.
- [24] B. Blandin. "Learning Physics: a Competency-based Curriculum using Modelling Techniques and PBL Approach". In: *Oral presentation at the GI-REP–ICPE–MPTL International Conference, Reims, 22-27 August 2010* ((2010, August)).
- [25] J. M. Blatt e V. F. Weisskopf. *Theoretical Nuclear Physics*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [26] Luc Boltanski e Ève Chiapello. *Le Nouvel Esprit du Capitalisme*. Paris: Gallimard, 1999.
- [27] L. Borghi, A. De Ambrosis e P. Mascheretti. "Reform in Science Teacher Education in Italy". In: *Science Teacher Education*. A cura di S. K. Abell. Vol. 10. Science & Technology Education Library. Dordrecht: Springer, 2000. DOI: 10.1007/0-306-47222-8_3.
- [28] Pierre Bourdieu. "Contre les divisions scolastiques". In: *L'Université au défi de la culture*. Actes des Assises culturelles de l'Université de Toulouse-le-Mirail, ADDOCC. 1991, p. 37.
- [29] Thomas Breda et al. *Do Female Role Models Reduce the Gender Gap in Science? Evidence from French High Schools*. IZA Discussion Paper 13163. IZA – Institute of Labor Economics, 2020. URL: <https://docs.iza.org/dp13163.pdf>.
- [30] W. E. Burcham e P. B. Moon. "The Teaching of Atomic and Nuclear Physics". In: *Physics Bulletin* 7.7 (1956), p. 175.

- [31] Marius R. Busemeyer. "Determinants of Public Education Spending in 21 OECD Democracies, 1980–2001". In: *Journal of European Public Policy* 14.4 (2007), pp. 582–610. DOI: 10.1080/13501760701314417.
- [32] R. W. Bybee et al. *The BSCS 5E Instructional Model: Origins and Effectiveness*. Rapp. tecn. Colorado Springs, CO: BSCS, 2006, pp. 88–98.
- [33] Peirce C.S. "Storia e abduzione". In: *Le leggi dell'ipotesi* (a cura di M. Bonfantini, R. Grazia, G. Proni) (1984).
- [34] Antonio Caforio. *Physics*. Le Monnier, 2024.
- [35] A. Campo. "La tecnica è vita e 'il buonuomo è tutto': Freud vs Derrida". In: *L'esperienza della tecnica*. A cura di R. Ronchi. L'Aquila: Quaderni di Praxis, 2019.
- [36] Michela Carlana. "Implicit Stereotypes: Evidence from Teachers' Gender Bias". In: *The Quarterly Journal of Economics* 134.3 (2019), pp. 1163–1224. DOI: 10.1093/qje/qjz008.
- [37] Fabio Cecchinato. *Oltre il Neomanagement*. Milano: Guerini, 2019.
- [38] P. Celik, F. Onder e I. Silay. "The effects of problem-based learning on the students' success in physics course". In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 28 (2011), pp. 656–660.
- [39] Sapna Cheryan et al. "Why Are Some STEM Fields More Gender Balanced than Others?" In: *Psychological Bulletin* 143.1 (2017), pp. 1–35. DOI: 10.1037/bul0000052.
- [40] W. Cheung e K. Hew. "A review of research methodologies used in studies on mobile handheld devices in K-12 and higher education settings". In: *Australasian Journal of Educational Technology* 25.2 (2009), pp. 153–183.
- [41] M. Colucci et al. "ISOradioLAB: An educational project on environmental radioactivity for Italian minor islands—the case study of Lampedusa and Linosa". In: *The European Physical Journal Plus* 138.8 (2023), p. 691.
- [42] Commissione tecnico-scientifica coordinata da Maragliano, R. *Le conoscenze fondamentali su cui si baserà l'apprendimento dei giovani nella scuola italiana dei prossimi decenni*. Sintesi dei lavori della commissione, Studi e documenti degli Annali della Pubblica Istruzione n. 78. Roma, 1997.
- [43] E. U. Condon e R. W. Gurney. "Wave mechanics and radioactive disintegration". In: *Nature* 33 (1928), p. 127.
- [44] E. U. Condon e R. W. Gurney. "Wave mechanics and radioactive disintegration". In: *Nature* 122 (1928), p. 439.
- [45] M. J. A. N. de Condorcet. *Rapport sur l'organisation générale de l'instruction publique*. Paris: Assemblée Nationale, 1792.
- [46] K. M. Cooper, V. R. Downing e S. E. Brownell. "The influence of active learning practices on student anxiety in large-enrollment college science classrooms". In: *International Journal of STEM Education* 5 (2018), pp. 1–18.
- [47] *Corso Online di Fisica Moderna*. MIUR e Università Roma Tre. 2021. URL: <https://ls-edu.uniroma3.it/mod/page/view.php?id=2916>.
- [48] Marie Curie. "Rayons émis par les composés de l'uranium et du thorium". In: *C.R. Acad. Sci.* 126 (1898), pp. 1101–1103.

- [49] John Cutnell. *Cutnell and Johnson Physics*. Zanichelli Editore, 2024.
- [50] *Dati A.I.F. (Associazione per l’Insegnamento della Fisica); comunicazione privata.*
- [51] *Dati Openpolis, reperibili all’URL: <https://www.openpolis.it/il-ruolo-centrale-degli-insegnanti-nella-comunita-educante/>.*
- [52] Alberto F. De Toni e Gabriele De Zan. *Il Dilemma della Complessità*. Venezia: Marsilio Editori, 2015.
- [53] *Decreto del Presidente della Repubblica n. 89/2010*. 2010.
- [54] *Decreto Ministeriale 211 del 7 ottobre 2010, Allegato F*. 2010.
- [55] L. Deslauriers, E. Schelew e C. Wieman. “Improved learning in a large-enrollment physics class”. In: *Science* 332.6031 (2011), pp. 862–864.
- [56] *Documento di classe reperibile in: <https://www.liceoenriques.edu.it/wp-content/uploads/2024/05/timbro5D.pdf>*. Documento di classe, Liceo Enriques. 2024.
- [57] William Duane. “Note on the Atomic Nuclei”. In: *Physical Review* 5 (1915), p. 335.
- [58] S. Elbanowska-Ciemuchowska e M. A. Giembicka. “How to Stimulate Students’ Interest in Nuclear Physics?” In: *Online Submission* (2011).
- [59] Eurostat. *Gender gap in STEM*. Available at: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/edn-20220211-2>. 2022.
- [60] R. Fabbrihesi Leo. *Sulle tracce del segno. Semiotica, faneroscopia e cosmologia nel pensiero di Charles Sanders Peirce*. Firenze: La Nuova Italia, 1986.
- [61] C. Fazio. “Active learning methods and strategies to improve student conceptual understanding: Some considerations from physics education research”. In: *Research and Innovation in Physics Education: Two Sides of the Same Coin*. 2020, pp. 15–35.
- [62] Enrico Fermi. *Nuclear Physics: A Course Given by Enrico Fermi at the University of Chicago*. University of Chicago Press, 1950.
- [63] Enrico Fermi. “Possible Production of Elements of Atomic Number Higher than 92”. In: *Nature* 133 (1934), pp. 898–899. DOI: 10.1038/133898a0.
- [64] Paolo Foradori e Giampiero Giacomello. “Fighting Nuclear Proliferation through Education: The Remarkable Story of ISODARCO”. In: *Modern Italy* 23.3 (2018), pp. 331–344. DOI: 10.1017/mit.2018.22.
- [65] S. Freeman et al. “Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics”. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111.23 (2014), pp. 8410–8415.
- [66] Sigmund Freud. *Al di là del Principio di Piacere*. Vol. 9. Opere. Torino: Bollati Boringhieri, 1986.
- [67] Sigmund Freud. *Al di là del Principio di Piacere*. Vol. 9. Opere. Torino: Bollati Boringhieri, 1986.
- [68] Sigmund Freud. *Considerazioni Attuali sulla Guerra e sulla Morte*. Vol. 8. Opere. Torino: Bollati Boringhieri, 1976.
- [69] Sigmund Freud e Lou Andreas-Salomé. *Eros e Conoscenza: Lettere 1912–1936*. Torino: Bollati Boringhieri, 1983.

- [70] Sigmund Freud e Albert Einstein. *Perché la Guerra?* Torino: Bollati Boringhieri, 1997.
- [71] Sigmund Freud e Albert Einstein. *Riflessioni a Due sulle Sorti del Mondo*. Torino: Bollati Boringhieri, 1989.
- [72] F. W. A. Fröbel, G. F. d'Arcais e M. Brivio. *L'educazione dell'uomo*. Padova: Cedam, 1948.
- [73] George Gamow. *Constitution of Atomic Nuclei and Radioactivity*. Clarendon Press, 1931.
- [74] George Gamow. "Zur quantentheorie des atomkernes". In: *Zeitschrift für Physik* 51.3 (1928), pp. 204–212.
- [75] H. E. Gardner. *Frames of Mind: The Theory of Multiple Intelligences*. Basic Books, 2011.
- [76] H. E. Gardner. *Intelligence Reframed: Multiple Intelligences for the 21st Century*. Hachette UK, 2000.
- [77] H. E. Gardner. *Intelligence reframed: Multiple intelligences for the 21st century*. Hachette UK, 2000.
- [78] Ludovico Geymonat. *Riflessioni critiche su Kuhn e Popper*. Vol. 1. Edizioni Dedalo, 1983.
- [79] A. Gherghelaş, A. M. Blebea-Apostu e A. Jipa. "Learning Nuclear Physics in High School Through Student-Created Videos. The Impact of a Visit to a Research Institute". In: *EDULEARN24 Proceedings*. IATED. 2024, pp. 3452–3458.
- [80] Davide Giovedì. "Risonanze pragmaticistiche in T. Kuhn: Per una rilettura peirceana di "La struttura della rivoluzioni scientifiche"". In: *Nóema* 13 (2022), pp. 68–97.
- [81] Otto Glasser. "WC Roentgen and the discovery of the Roentgen rays". In: *AJR. American Journal of Roentgenology* 165.5 (1995), pp. 1033–1040.
- [82] F. Groppi et al. "Educational activities on environmental radioactivity and medical applications of radiations at University of Milano and INFN in Italy". In: *Abstracts: Oral Presentations*. RSC Interest Group. 2024, pp. 34–35.
- [83] F. Groppi et al. "Particle Therapy International Masterclass: the first Italian experience". In: *MARCXII: Book of Abstract*. MarcXII Conference Board. 2022, pp. 149–149.
- [84] F. Groppi et al. "Radon Laboratory: A Proposal for Scientific Culture Dissemination Among Young Students in Italy". In: *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1164. 1. American Institute of Physics, 2009, pp. 93–99.
- [85] Leslie Groves. *Now It Can Be Told: The Story of the Manhattan Project*. New York: Da Capo Press, 1962.
- [86] Francesco Guerra e Nadia Robotti. *The Lost Notebook of Enrico Fermi*. Cham: Springer, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-69654-6.
- [87] G. Hagen et al. "Coupled-Cluster Calculations of Nucleonic Matter". In: *Physical Review C* 89.1 (2014), p. 014319. DOI: 10.1103/PhysRevC.89.014319. URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.89.014319>.

- [88] Otto Hahn. "From radiothorium to uranium fission". In: *Collected Essays*. Boringhieri, 1968, p. 61.
- [89] Otto Hahn e Fritz Strassmann. "Nachweis der Entstehung aktiver Bariumisotope aus Uran und Thorium durch Neutronenbestrahlung; Nachweis weiter aktiver Bruchstücke bei der Uranspaltung". In: *Naturwissenschaften* 27 (1939), pp. 89–95. DOI: 10.1007/BF01488988.
- [90] R. R. Hake. "Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses." In: *American journal of Physics* 66(1) (1988), pp. 64–74.
- [91] Laura Harkness-Brennan. *An Introduction to the Physics of Nuclear Medicine*. Bristol: IOP Publishing, 2023. DOI: 10.1088/978-0-7503-2070-2.
- [92] C. Hartshorne e P. Weiss. *Collected Papers of Charles Sanders Peirce. Vol. I, Principles of Philosophy*. 1935.
- [93] Patrick A. Heelan. *Space-perception and the Philosophy of Science*. University of California Press, 2023.
- [94] Werner Heisenberg. *Nuclear Physics*. Open Road Media, 2019.
- [95] James Hillman. *Un Terribile Amore per la Guerra*. Milano: Adelphi, 2024.
- [96] D. F. Iezzi. *Statistica per le scienze sociali. Dalla progettazione dell'indagine all'analisi dei dati*. Roma: Carrocci, 2009.
- [97] ISTAT. *Manuale di tecniche di indagine – 2 – Il questionario: progettazione, redazione e verifica*. Rapp. tecn. Roma, 1989.
- [98] ISTAT. *Nota stampa BesT Lombardia*. Available at: [urlhttps://www.istat.it/it/files/2023/11/Nota-stampa-BesT-Lombardia.pdf](https://www.istat.it/it/files/2023/11/Nota-stampa-BesT-Lombardia.pdf). 2023.
- [99] William James. *Le pragmatisme*. Paris: Flammarion, 2007.
- [100] D. H. Jonassen e W. Hung. "All Problems are not Equal: Implications for Problem-Based Learning". In: *The Interdisciplinary Journal of Problem-based Learning* 2.2 (2008), pp. 6–28.
- [101] Ernest Jones. *Vita e Opere di Freud*. Milano: Il Saggiatore, 1962.
- [102] Irving Kaplan. *Nuclear Physics*. Addison-Wesley Publishing Company, 1963.
- [103] Sam Kean. *La Brigata dei Bastardi*. Milano: Adelphi, 2022.
- [104] Morris Kline. *Mathematical Thought From Ancient to Modern Times*. Vol. 2. New York: Oxford University Press, 1990.
- [105] A. Kohnle, S. Mclean e M. Aliotta. "Towards a conceptual diagnostic survey in nuclear physics". In: *European Journal of Physics* 32.1 (2010), p. 55.
- [106] Marco Kools e Louise Stoll. *What Makes a School a Learning Organisation?* OECD Education Working Papers 137. OECD, 2016. DOI: 10.1787/5j1wm62b3bvh-en.
- [107] Kenneth S. Krane. *Introductory Nuclear Physics*. John Wiley & Sons, 1991.
- [108] Kenneth S. Krane. *Introductory Nuclear Physics*. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [109] Thomas S. Kuhn. *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*. Torino: Einaudi, 1979.

- [110] Thomas S. Kuhn. "Logic of Discovery or Psychology of Research?" In: *Criticism and the Growth of Knowledge*. A cura di I. Lakatos e A. Musgrave. Cambridge: Cambridge University Press, 1970.
- [111] Gustave Le Bon. "La lumière noire". In: *C.R. Acad. Sci.* 122 (1896), p. 189.
- [112] E. D. de Leeuw. "To Mix or Not to Mix Data Collection Modes in Surveys". In: *Journal of Official Statistics* 21.2 (2005), pp. 233–255.
- [113] S. Leoni. "Comunicazione privata". Dipartimento di Fisica "A. Pontremoli", Università degli Studi di Milano.
- [114] O. Levrini et al. "Developing future-scaffolding skills through science education". In: *International Journal of Science Education* 41.18 (2019), pp. 2647–2674.
- [115] W. F. Libby e F. Johnson. *Radiocarbon dating* (Vol. 2). Chicago: University of Chicago Press, 1995.
- [116] D. Lombardi et al. "The curious construct of active learning". In: *Psychological Science in the Public Interest* 22.1 (2021), pp. 8–43.
- [117] Bruno Losito. "Educazione Civica e alla Cittadinanza: Approcci Curricolari e Didattici e Ambienti di Apprendimento". In: *Scuola Democratica* 12.speciale (2021), pp. 189–201. DOI: 10.12828/101913.
- [118] N. Ludwig e P. Teruzzi. "Investigating STEM course choices through physics knowledge surveys". In: *Giornale Italiano della Ricerca Educativa* 17.32 (2024), pp. 47–59.
- [119] Mauro Magatti, cur. *Social Generativity: A Relational Paradigm for Social Change*. London: Routledge, 2017.
- [120] Ettore Majorana. *On Nuclear Theory*. Scientific Papers of Ettore Majorana: A New Expanded Edition, 2020, pp. 101–112.
- [121] Serge Marguet. *A Brief History of Nuclear Reactor Accidents: From Leipzig to Fukushima*. Cham: Springer Nature, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-22561-1.
- [122] Cristiano Martinelli. "Rivoluzioni Silenti: La Riforma degli Organi Collegiali nella Storia della Scuola". In: *Rivista di Storia dell'Educazione* 8.2 (2021), pp. 55–66. DOI: 10.36253/rse-12345.
- [123] Elton Mayo. *The Human Problems of an Industrial Civilisation*. New York: Macmillan, 1933.
- [124] L. C. McDermott, P. S. Shaffer e C. P. Constantinou. "Preparing teachers to teach physics and physical science by inquiry". In: *Physics Education* 35.6 (2000), p. 411.
- [125] M. Merleau-Ponty. *Fenomenologia della percezione*. Milano: Bompiani, 2009.
- [126] M. Michelini, L. G. Santi e A. Stefanel. "Teaching modern physics in secondary school". In: *Proceedings of Science*. 2014.
- [127] M. Michelini, L. G. Santi e A. Stefanel. "Teaching modern physics in secondary school." In: *Proceedings of Science* (2014).
- [128] A. Migliardi. *Il questionario, Centro Regionale di Documentazione per la Promozione della Salute*. 2019.

- [129] A. Migliardi. *Il questionario*. Rapp. tecn. Centro Regionale di Documentazione per la Promozione della Salute, 2019.
- [130] M. Misbah et al. "The effectiveness of introduction to nuclear physics e-module as a teaching material during covid-19 pandemic". In: *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1760. 1. IOP Publishing, 2021, p. 012052.
- [131] Maria Pia Negri, Annamaria Caspani e Franco Arpini, cur. *Formazione Iniziale degli Insegnanti e Tirocinio: Prospettive per il Tutor*. Vol. 35. Milano: FrancoAngeli, 2004.
- [132] Ida Noddack. "On Element 93". In: *Zeitschrift für Angewandte Chemie* 47 (set. 1934), p. 653.
- [133] Joseph D. Novak. *L'apprendimento Significativo*. Trento: Erickson, 2001.
- [134] NuPECC Long Range Plan 2024 For European Nuclear Physics. Available at: https://indico.ph.tum.de/event/7629/contributions/8953/attachments/6020/8072/Full_LRP2024_Report_03042024_clean.pdf, p. 355. 2024.
- [135] Kenzaburō Ōe. *Note su Hiroshima*. Milano: Garzanti, 2021.
- [136] Freeman Y. On. *The Russell-Einstein Manifesto*. 2012.
- [137] Openpolis. *Il divario di genere nelle materie STEM*. Disponibile su: <https://www.openpolis.it/esercizi/il-divario-di-genere-nelle-materie-stem/>. 2024.
- [138] Abraham Pais. *Il Danese Tranquillo: Niels Bohr, un Fisico e il suo Tempo: 1885–1962*. Torino: Bollati Boringhieri, 1993.
- [139] S. T. Park et al. "Web-based nuclear physics laboratory". In: *Recent Research Developments in Learning Technologies*. 2005, pp. 1165–1169.
- [140] C. S. Peirce. "Pragmatismo inteso come logica dell'abduzione". In: *Scritti scelti*. A cura di M. Bonfantini, R. Grazia e G. Proni. Milano: Bompiani, 1984, p. 566.
- [141] M. Pellerey. "Competenze di base, competenze chiave e standard formative". In: *Osservatorio sulle riforme*. 2006, pp. 67–89.
- [142] Jean Perrin. *Rayons cathodiques et rayons de Roentgen*. Gauthier-Villars, 1897.
- [143] Karl Popper. *Congetture e confutazioni. Lo sviluppo della conoscenza scientifica*. Bologna: Il Mulino, 2009.
- [144] Karl Popper. *Logica della scoperta scientifica*. Torino: Einaudi, 1970.
- [145] Catherine Porter e Danila Serra. "Gender Differences in the Choice of Major: The Importance of Female Role Models". In: *American Economic Journal: Applied Economics* 12.3 (2020), pp. 226–254. DOI: 10.1257/app.20180426.
- [146] P. B. Preciado. *Manifesto controsessuale*. Roma: Fandango Libri, 2011.
- [147] PRISMAP: The European Medical Isotope Programme. 2023. URL: <https://www.prismap.eu/>.
- [148] Frank P. Ramsey. *On Truth: Original Manuscript Materials (1927–1929) from the Ramsey Collection at the University of Pittsburgh*. Vol. 16. Springer Science & Business Media, 2012.
- [149] L. Romano. *L'avvocato dell'atomo*. Roma: Fazi Editore, 2022.

- [150] Ernest Rutherford. "Excited radioactivity and the method of its transmission". In: *Philosophical Magazine*. 5^a ser. 25 (1903), p. 95.
- [151] Ernest Rutherford. "The magnetic and electric deviation of the easily absorbed rays from radium". In: *Philosophical Magazine*. 5^a ser. 25 (1903), p. 177.
- [152] R. Ruyer. *Éléments de Psycho-Biologie*. Paris: PUF, 1946.
- [153] M. Sahin. "Effects of problem-based learning on university students' epistemological beliefs about physics and physics learning and conceptual understanding of Newtonian mechanics". In: *Journal of Science Education and Technology* 19 (2010), pp. 266–275.
- [154] M. Sahin e N. Yorek. "A comparison of problem-based learning and traditional lecture students' expectations and course grades in an introductory physics classroom". In: *Scientific Research and Essay* 4.8 (2009), pp. 753–762.
- [155] M. Savin-Baden e G. Tombs. "Threshold concepts and problem-based learning". In: *Threshold Concepts in Problem-based Learning*. Brill, 2018, pp. 1–17.
- [156] T. Sawano et al. "The Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident and school bullying of affected children and adolescents: the need for continuous radiation education". In: *Journal of Radiation Research* 59.3 (2018), pp. 381–384.
- [157] Emilio Segrè. *From X-rays to Quarks: Modern Physicists and Their Discoveries*. Courier Corporation, 2012.
- [158] T. C. SERIES. *Postgraduate medical physics academic Programmes*. 2013.
- [159] M. H. Shamos. *The Myth of Scientific Literacy*. New Brunswick, NJ: Rutgers University Press, 1995.
- [160] Carlo Sini. *Il pragmatismo americano*. Bari: Laterza, 1972.
- [161] M. K. Smith et al. "Combining peer discussion with instructor explanation increases student learning from in-class concept questions". In: *CBE—Life Sciences Education* 10.1 (2011), pp. 55–63.
- [162] Frederick Soddy. *Le radium: interprétation et enseignements de la radioactivité*. F. Alcan, 1921.
- [163] R. J. Strutt. "On the conductivity of gases under the becquerel rays". In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A* 196.274–286 (1901), pp. 507–527.
- [164] Frederick W. Taylor. *The Principles of Scientific Management*. New York: Harper & Brothers, 1911.
- [165] W. L. Taylor. "'Cloze procedure': A new tool for measuring readability". In: *Journalism Quarterly* 30.4 (1953), pp. 415–433.
- [166] Paolo Teruzzi. "A Brief History of the Nuclear Weapon". In: *Giornale di Fisica della Società Italiana di Fisica* 66.1 (2025), pp. 43–80.
- [167] Paolo Teruzzi. "Caccia al Radioisotopo Mancante: La Sfida dell'Astrofisica Nucleare per lo Studio delle Novæ". In: *Coelum Astronomia* 6.271 (2024), pp. 26–29.

- [168] Paolo Teruzzi. "Progresso Scientifico e Responsabilità Etica: Il Cammino verso il Disarmo". In: *Coelum Astronomia* (2025), pp. 26–31.
- [169] Paolo Teruzzi, Marina Carpineti e Nicola Ludwig. "An experience of innovative learning with multimodal teaching techniques in nuclear physics education in Italy". In: *Physics Education* 60.3 (2025), p. 035012. DOI: 10.1088/1361-6552/adba31. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/adba31>.
- [170] J. J. Thomson e S. A. E. Johansson. "Catode Rays". In: *Philosophical Magazine Series* 5 44.269 (1897).
- [171] Mary Tiles. *Bachelard: Science and Objectivity*. Cambridge University Press, 1984.
- [172] G. Tsaparlis, S. Hartzavalos e C. Nakiboğlu. "Students' knowledge of nuclear science and its connection with civic scientific literacy in two European contexts: The case of newspaper articles". In: *Science & Education* 22 (2013), pp. 1963–1991.
- [173] G. Tsaparlis, S. Hartzavalos e C. Nakiboğlu. "Students' knowledge of nuclear science and its connection with civic scientific literacy in two European contexts: The case of newspaper articles". In: *Science & Education* 22 (2013), pp. 1963–1991.
- [174] J. G. Tullis e R. L. Goldstone. "Why does peer instruction benefit student learning?" In: *Cognitive research: principles and implications* 5 (2020), pp. 1–12.
- [175] Paul Valéry. *Cahier I*. Paris: Gallimard, 1973.
- [176] S. Viaggio. "Cognitive Clozing To Teach Them To Think". In: *Unpublished Manuscript* (1991).
- [177] Pierre Vidal-Naquet. "Dreyfus nell'Affare e nella Storia". In: *Cinque Anni della Mia Vita*. A cura di Alfred Dreyfus. Genova: Il Melangolo, 2005.
- [178] C. Wagemans. *The Nuclear Fission Process*. CRC Press, 1991.
- [179] Karl E. Weick. *Educational Organizations as Loosely Coupled Systems*. New York: Sage Publications, 1976.
- [180] J. J. Wellington. "Teaching the unteachable-physics education and nuclear weapons". In: *Physics Education* 17.3 (1982), p. 106.
- [181] Brent G. Wilson. *Constructivist Learning Environments: Case Studies in Instructional Design*. Englewood Cliffs, NJ: Educational Technology Publications, 1996.
- [182] H. T. Wolff. "Atomkern und -Strahlung". In: *Annalen der Physik* 365.24 (1919), pp. 685–700.
- [183] M. Zani e M. Bozzi. "La fisica tra la scuola secondaria e l'università. Riflessioni e orientamenti". In: *Nuova Secondaria* XXXVI (2018), pp. 84–88.
- [184] D. L. Zeidler. "STEM education: A deficit framework for the twenty first century? A sociocultural socioscientific response". In: *Cultural Studies of Science Education* 11 (2016), pp. 11–26.
- [185] D. L. Zeidler et al. "Beyond STS: A research-based framework for socio scientific issues education". In: *Science Education* 89.3 (2005), pp. 357–377.

Ringraziamenti

Ringraziamenti

Il lavoro di ricerca esposto in questa tesi è stato possibile grazie al contributo che molti, a diverso titolo, hanno fornito e a cui va la mia gratitudine. In particolare ringrazio:

- il Prof. Nicola Ludwig, equilibrato supervisor di dottorato, che mi ha consentito di lavorare in autonomia e che al tempo stesso ha mantenuto un serrato confronto su tutti i temi del progetto di ricerca;
- il Prof. Marco Giliberti, vice tutor di progetto, per le indicazioni e i suggerimenti necessari all'impostazione delle attività di ricerca e per il vivace scambio di opinioni durante l'intera durata del dottorato;
- la Prof.ssa Marina Carpineti, che ha supportato e partecipato a un'ampia attività del progetto, a cui sono debitore per l'attenzione e la meticolosità dimostrati, nonché per l'entusiasmo esemplare per l'intero gruppo di lavoro.

Al di fuori dei ruoli istituzionali e dei referenti della didattica della fisica, rivolgo un ringraziamento particolare ai professori:

- Paolo Cotta Ramusino, per aver sposato l'obiettivo di continuare a valorizzare il corso "Armi nucleari, disarmo e proliferazione nucleare", per averne condiviso le fonti e i materiali e per aver contribuito con la sua disponibilità a favorirne la consultazione a un ampio pubblico;
- Silvia Leoni, per aver creduto fin dall'inizio nella validità del progetto, di cui ha seguito l'iter, dandone ampio sostegno e visibilità anche al di fuori del dipartimento di fisica dell'Università degli Studi di Milano;
- Riccardo De Salvo, per aver sostenuto questo progetto in tanti e diversi ambiti sottolineando l'importanza della formazione in fisica nucleare del personale docente e per avermi introdotto in organi istituzionali dove parte del lavoro di ricerca si è svolto attivamente;

- Rossella Fabbrichesi del dipartimento di filosofia dell'Università degli Studi di Milano per avermi introdotto allo studio del pragmatismo americano e alla figura di Charles S. Peirce.

Ai relatori del corso di formazione Rinnovamenti (PNRR) va un particolare ringraziamento non solo per la disponibilità dimostrata e non dovuta, ma per l'impegno e la cura con cui hanno affrontato la presa di incarico, che ha determinato la massima parte del successo del corso. Grazie quindi a: Simone Bottoni, Silvia Leoni, Nicola Ludwig, Alessandra Guglielmetti, Roberta Vecchi, Ivan Lonati, Annafrancesca Mariani.

I dirigenti scolastici e i docenti dei licei che hanno collaborato nelle diverse attività sono stati una risorsa necessaria per la realizzazione del progetto e per questo a tutti loro va un profondo ringraziamento, in particolare ai Proff. Daniela Canavero, Roberto Crippa, Fanny Campana, Silvia Castoldi e Cristina Erba.

Ringrazio il dott. Nicola Ippolito del MASE per aver valorizzato il contributo fornito da questo progetto alla piattaforma PNNS e per aver agevolato momenti di confronto tra le istituzioni, le aziende, il mondo della ricerca e l'accademia.

Per aver favorito i contatti con le diverse istituzioni e personalità giapponesi che si occupano di disarmo e cultura della pace ringrazio il sig. Shinji Yasuda della prefettura di Hiroshima, il personale della Maruki Gallery di Higashimatsuyama, nonché Maria Gottardo e Tomohiko Morozumi.

Al M° Luca Buratto, a Giacomo Manca di Villahermosa e a Giacomo Rossi va un particolare ringraziamento per i contributi alla realizzazione del sito a disposizione sulla pagina web di dipartimento, disnuc.fisica.unimi.it, contributi che considero un segno di autentica amicizia.