

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Note sulla storia della scoperta e delle applicazioni  
in ambito civile dell’energia nucleare

Relatore

Prof./Dr. Giulio Peruzzi

Laureando

Luca Meinardo

Anno Accademico 2023/2024

*A Stephanie, la mia compagna di vita,  
Per il suo amore e sostegno.*

# INDICE

|   |    |
|---|----|
| Introduzione.....   | 1  |
| 1. Fissione Nucleare.....   | 3  |
| 1.1. L'esordio .....  | 3  |
| 1.2. La scoperta .....  | 6  |
| 1.3. Pila CP-1: il controllo della reazione .....                   | 8  |
| 2. Applicazioni Civili.....   | 13 |
| 2.1. Il dopo guerra.....  | 13 |
| 2.2. I reattori nucleari per la produzione d'energia .....          | 14 |
| 2.2.1. Reattori ad acqua pressurizzata PWR.....                     | 14 |
| 2.2.2. Reattori ad acqua bollente BWR .....                         | 17 |
| 2.3. Medicina nucleare.....   | 20 |
| 2.3.1. Il padre della medicina nucleare .....                       | 20 |
| 2.3.2. Diagnostica per immagini: tipi di contrasto e tecniche ..... | 21 |
| 2.3.3. Radioterapia: trattamento del cancro con radiazioni.....     | 23 |
| 3. Elettronucleare in Italia .....                                  | 25 |
| 3.1. La corsa ai reattori .....                                     | 25 |
| 3.2. Il referendum.....   | 26 |
| Conclusioni.....  | 29 |
| Bibliografia.....   | 30 |



## Introduzione

La scoperta e l'evoluzione dell'energia nucleare rappresentano uno dei capitoli più significativi nella storia della scienza moderna. Dalla scoperta casuale della radioattività da parte di Antoine Henri Becquerel fino alla realizzazione della prima reazione nucleare controllata guidata da Enrico Fermi, l'energia nucleare ha rivoluzionato non solo il campo della fisica, ma anche molteplici settori della tecnologia, di vari settori della scienza e della medicina, avendo un impatto profondo e duraturo sulla società.

Alla base di questo studio vi è l'analisi della storia della scoperta della fissione nucleare e delle sue principali applicazioni civili. L'obiettivo della tesi è fornire un'analisi dettagliata e rigorosa del percorso storico e scientifico che ha portato a questa rivoluzione, esaminando le principali applicazioni tecnologiche in ambito civile e analizzando l'evoluzione del nucleare in Italia. Le motivazioni che mi hanno spinto a esplorare questo argomento sono molteplici: da un lato, l'importanza storica e scientifica della scoperta dell'energia nucleare e delle sue prime applicazioni; dall'altro, il ruolo cruciale che questa forma di energia ha assunto nel dibattito contemporaneo sulle fonti energetiche sostenibili e sicure. Il mio interesse è stato ulteriormente rafforzato dall'analisi delle dinamiche storiche e politiche che hanno influenzato lo sviluppo del nucleare in Italia, un percorso segnato da grandi ambizioni ma anche da importanti battute d'arresto.

La tesi è articolata in tre capitoli principali. Il primo capitolo offre una panoramica sulla scoperta della fissione nucleare, analizzando le tappe fondamentali che hanno portato a questa scoperta e il ruolo cruciale dei pionieri del settore. Il secondo capitolo si concentra sulle applicazioni tecnologiche dell'energia nucleare, con un'analisi approfondita delle due principali tipologie di reattori nucleari per la produzione di energia e delle innovazioni nel campo della medicina nucleare, evidenziandone i principi di funzionamento e le sfide operative. Infine, il terzo capitolo esamina l'evoluzione dell'elettronucleare in Italia, dalla costruzione delle prime centrali nucleari fino ai referendum che hanno segnato la fine dell'utilizzo di questa tecnologia nel paese.



# 1. Fissione Nucleare

## 1.1. L'esordio

Nel 1789 Martin Heinrich Klaproth, chimico tedesco, scoprì studiando la pechblenda<sup>1</sup> un nuovo elemento che decise di chiamare uranio. Alla fine del XIX secolo, in un contesto in cui la fisica e la chimica stavano rapidamente evolvendo, Antoine Henri Becquerel, erede di una famiglia di illustri fisici, si immergeva nei misteri della fluorescenza dei sali di uranio. Questa scienza, ancora in fase di definizione, stava cercando di comprendere come certi materiali, una volta esposti alla luce del sole o ai raggi X, potessero imprimere immagini sulle lastre fotografiche.

“Nel marzo del 1896, Becquerel si apprestava a eseguire un esperimento con i suoi sali di uranio, ma le condizioni atmosferiche di Parigi, quel giorno, non furono clementi. Il cielo era cupo e grigio, privo del sole necessario per attivare la fluorescenza. Con un gesto che sembrava di poca importanza, Becquerel avvolse i sali insieme alle lastre fotografiche e ripose tutto in un cassetto, in attesa di tempi migliori. Quando finalmente recuperò il materiale, si trovò di fronte a una scoperta sconcertante: le lastre fotografiche erano state impressionate nonostante l'assenza di luce solare. Becquerel, senza rendersene conto immediatamente, aveva svelato un fenomeno che avrebbe cambiato per sempre il corso della scienza. I sali di uranio, chiusi nel buio del cassetto, avevano rivelato l'esistenza di una nuova forma di energia: la radioattività naturale.” (Giancarlo Nebbia, 2007, p. 57)

La casualità dell'evento non sminuiva la sua portata rivoluzionaria. Come la tavola periodica di Mendeleev aveva ordinato gli elementi svelando relazioni insospettite, così la scoperta di Becquerel avrebbe avviato una nuova era di ricerche e intuizioni, ponendo le basi per lo sviluppo della fisica nucleare e delle sue applicazioni.

D'altra parte, Marie Sklodowska arrivò a Parigi nel 1891, a 24 anni. Dopo essersi brillantemente laureata in fisica e matematica, nel 1895 sposò Pierre Curie. Per la sua tesi di dottorato, Marie scelse di studiare quantitativamente l'emissione di raggi provenienti dai sali di uranio, confermando i risultati di Becquerel. Nell'aprile del 1898, mentre esaminava la pechblenda, si rese conto che questo minerale conteneva un elemento speciale. Chiese quindi al marito di aiutarla nelle ricerche per identificarlo. Pierre Curie, lasciando da parte i suoi studi sul magnetismo, si

---

<sup>1</sup> Nota anche come Uraninite. La sua composizione chimica è  $UO_2$ , quindi è chimicamente un diossido di uranio.

unì a lei. Nello stesso mese di aprile, inviarono una nota all'accademia delle scienze intitolata *Sur une substance nouvelle radioactive contenue dans la pechblende*. Chiamarono questa sostanza polonio, in onore della patria di Marie. Il 26 dicembre dello stesso anno, dopo una serie di ulteriori ricerche condotte insieme a Gustave Bémont, inviarono un altro rapporto all'accademia annunciando la scoperta, nella pechblenda, di un elemento molto simile al bario che decisero di chiamare radio. Nel 1903, Antoine Henri Becquerel e Pierre e Marie Curie ricevettero il premio Nobel per la fisica per questa scoperta. Con Becquerel era nata la radioattività, e i Curie ne avevano confermato l'esistenza con la scoperta del radio.

Nonostante tutto, l'origine della radiazione dell'uranio non era chiara, fu Ernest Rutherford che portò a una più precisa comprensione della radioattività e della struttura dell'atomo.

“La sua ipotesi era che ciascuna emissione di una particella di radiazione segnalasse l'istante in cui un nucleo atomico cambia la propria identità. Decise di chiamare questo fenomeno decadimento radioattivo, e i nuovi elementi formati prodotti di decadimento. Nel 1899 scoprì anche che due tipi distinti di radiazione venivano emessi dai minerali d'uranio: li chiamò raggi alfa<sup>2</sup> e raggi beta<sup>3</sup>. La terza forma di radiazione dei minerali di uranio, ovvero i raggi gamma<sup>4</sup>, furono scoperti nel 1900 dal fisico francese Paul Villard.” (Giancarlo Nebbia, 2007, pp. 58–59)

Nelle prime due decadi del XX secolo Rutherford continuò a esplorare arrivando a conclusioni sorprendenti che cambiarono radicalmente la comprensione della struttura atomica. Come riportato:

“Rutherford dedusse che l'energia associata al decadimento radioattivo era circa un milione di volte superiore a quella delle reazioni chimiche. Nel 1911 pubblicò il modello nucleare dell'atomo<sup>5</sup> basato sull'esperimento di scattering dei raggi alfa di Geiger e Marsden del 1909, e infine dimostrò che un elemento poteva essere trasmutato in un altro mediante bombardamento con raggi alfa.” (Krivit et al., 2010, p. 15)

Seguì una serie di eventi di notevole importanza. Nel 1913, Niels Bohr, basandosi sul modello atomico di Rutherford, sviluppò un modello quantizzato dell'atomo di idrogeno. Nel 1932, *l'Annus mirabilis*, James Chadwick in Inghilterra scoprì il

---

<sup>2</sup> Radiazioni corpuscolari costituite da particelle  $\alpha$  (nuclei di elio) ad alta velocità .

<sup>3</sup> Sono elettroni ( $\beta^-$ ) o positroni ( $\beta^+$ ) ad alta energia e alta velocità.

<sup>4</sup> È una forma penetrante di radiazione elettromagnetica.

<sup>5</sup> Il nucleo al centro è carico positivamente, mentre gli elettroni carichi negativamente ruotano intorno ad esso.

neutrone. Sempre nel 1932, furono scoperti il deuterio e il positrone. Molto importante fu anche il ruolo degli sposi Frédéric e Irène Joliot-Curie.

“Tra l'ottobre 1933 e il gennaio 1934, a Parigi, i Joliot-Curie scoprirono la radioattività indotta o artificiale mediante il bombardamento con particelle alfa di atomi di boro o alluminio, così ottenendo isotopi ancora sconosciuti del fosforo e dell'azoto che manifestano radioattività.”(Peruzzi Giulio, 2001, p. 89)

Una volta conosciuto il risultato dell'esperimento dei Joliot-Curie, altri fisici iniziarono a riprodurre ed estendere l'esperimento. A Roma, il gruppo dei "Ragazzi di Via Panisperna" formato da Enrico Fermi, Edoardo Amaldi, Franco Rasetti, Emilio Segrè, Bruno Pontecorvo e Oscar D'Agostino tentò di produrre radioattività artificiale bombardando tutti gli elementi della tavola periodica, utilizzando neutroni lenti<sup>6</sup> invece di particelle alfa. Essendo neutro, il neutrone non interagisce elettromagneticamente né con la nuvola di elettroni che circonda un atomo né con la carica positiva del nucleo. Pertanto, può essere utilizzato per bombardare i nuclei atomici, consentendo di studiare sia la struttura atomica sia l'effetto della velocità dei neutroni nei processi di scattering con i nuclei atomici, e infine, come questi possano far trasmutare i nuclei da un elemento o isotopo in un altro. Arrivati all'ultimo elemento conosciuto, l'uranio-92, si resero conto che non solo diventava radioattivo, ma produceva anche più di un elemento. Credettero di aver prodotto un elemento transuranico e pubblicarono questo lavoro il 16 giugno 1934 sulla rivista «Nature» con il titolo *Possible Production of Elements of Atomic Number Higher than 92*. Nel 1938, Fermi ricevette il premio Nobel. (Segrè & Hoerlin, 2017)

"For his demonstrations of the existence of new radioactive elements produced by neutron irradiation, and for his related discovery of nuclear reactions brought about by slow neutrons." <sup>7</sup>

Anche a causa delle leggi razziali fasciste promulgate in Italia, che discriminavano gli ebrei, dopo aver ricevuto il Nobel, Fermi partì con la sua famiglia per gli Stati Uniti, dove accettò una posizione all'Università di Columbia a New York.

---

<sup>6</sup> Cosiddetti i neutroni con energia inferiore a 1eV.

<sup>7</sup> The Nobel Prize in Physics 1938. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2024. Mon. 22 Jul 2024.

## 1.2. La scoperta

Nel 1938, a Berlino, Otto Hahn e Fritz Strassmann continuarono il lavoro di Fermi bombardando l'uranio con i neutroni lenti. Analizzando i prodotti della reazione, notarono qualcosa di sorprendente: tra i prodotti c'era un isotopo radioattivo del bario, il quale ha 56 protoni, ed è quindi un elemento molto più leggero dell'uranio che ne ha 92. Questo risultato era inatteso, poiché la teoria allora prevalente non prevedeva che un atomo così pesante potesse dividersi in frammenti così tanto leggeri. Hahn si chiese immediatamente in che modo l'assorbimento di un neutrone avrebbe potuto causare un cambiamento di 36 unità di carica elettrica in un nucleo di uranio? La risposta a questo quesito fu data dalla fisica austriaca Lise Meitner, insieme a suo nipote Otto Frisch in un articolo pubblicato l'11 febbraio del 1939 su «Nature» sotto il titolo: *Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction*.

Meitner, di origini ebraiche, costretta a lasciare la Germania a causa delle leggi razziali naziste, si rifugiò in Svezia, dove continuò a lavorare a distanza con Hahn e Strassmann. Durante le vacanze natalizie del 1938, Meitner e suo nipote, interpretarono i risultati ottenuti da Hahn e Strassmann e trovarono una soluzione. Frisch racconta:

“Gradually the idea took shape that this was no chipping or cracking of the nucleus but rather a process to be explained by Bohr's idea that the nucleus was like a liquid drop; such a drop might elongate and divide itself.”(Frisch & Wheeler, 1967, p. 47)

Frisch e Meitner avevano una certa familiarità con le recenti congetture di Bohr che fornivano una nuova immagine del nucleo. Lungi dal visualizzarla come una sfera solida compatta, nell'agosto del 1938 Bohr lo aveva descritto come “una goccia di fluido e gli stati di eccitazione possono essere paragonati alle oscillazioni del volume e della forma di una sfera sotto l'influenza della sua elasticità e della sua tensione superficiale”. (Segrè & Hoerlin, 2017, p. 140,141)

I due si chiesero quali potessero essere ulteriori conseguenze della visualizzazione del nucleo dell'uranio come una goccia. Colpita da un neutrone, la goccia avrebbe potuto dividersi in due gocce più piccole. Se ciò fosse accaduto, l'interazione elettrica tra di esse le avrebbe rapidamente allontanate l'una dall'altra, guadagnando un'energia cinetica totale di circa 200 Mev, una quantità immensa, più di venti volte l'energia necessaria per separare un neutrone da un

nucleo tipico, e più di 20 milioni di volte l'energia abituale di un legame chimico. L'immagine delle gocce che si separano poteva essere corretta solo se c'era una fonte per l'energia necessaria alla repulsione delle gocce. Qui si rivelò essenziale la trentennale esperienza di Meitner con i nuclei: si rese conto che la somma delle masse dei due frammenti era inferiore alla massa dell'uranio. Una rapida stima le mostrò che la differenza di massa era proprio pari all'energia necessaria al movimento. (Meitner & Frisch, 1939)

Tutto tornava, l'energia era conservata. Meitner e Frisch avevano compreso che un nucleo di uranio bombardato da neutroni lenti può scindersi in due nuclei più piccoli. Frisch avrebbe presto dato al processo un nome suggeritogli da un collega biologo: fissione nucleare<sup>8</sup>. Fermi, gli altri Ragazzi e diversi altri scienziati si erano tutti sbagliati nel vedere elementi transuranici. Quello che i Ragazzi avevano effettivamente prodotto era molto più significativo. Tuttavia, non erano riusciti a riconoscerlo.

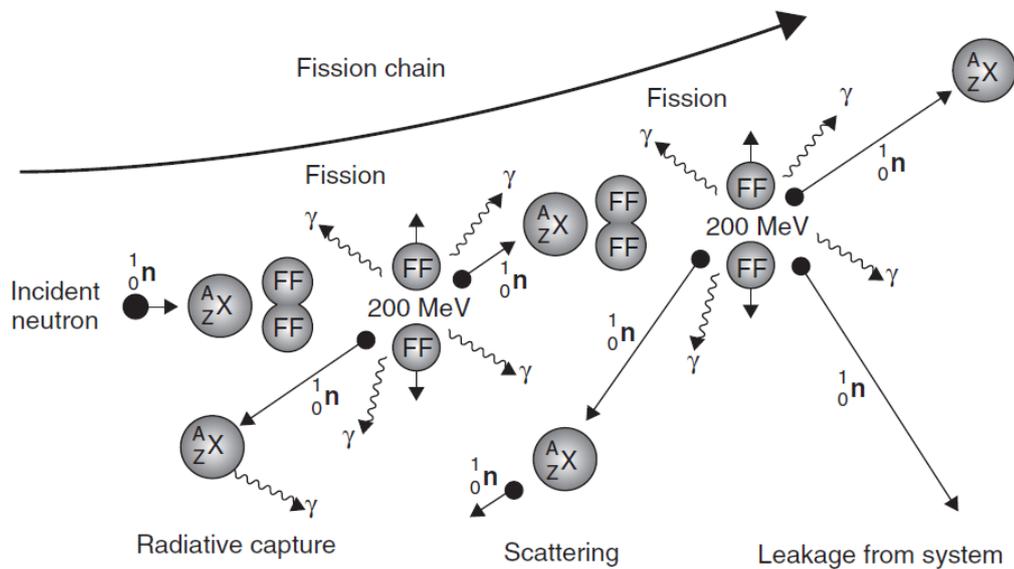


Figura 1 illustrazione del processo di fissione nucleare.

<sup>8</sup> La fissione dell' $U^{235}$  è causata da neutroni lenti (velocità di circa  $10^5 \frac{cm}{s}$  o energia di circa 0.02 eV) e invece la fissione dell' $U^{238}$  è causata da neutroni veloci (velocità di circa  $10^9 \frac{cm}{s}$  o energia al di sopra di 1 MeV).

### **1.3. Pila CP-1: il controllo della reazione**

Nel contesto della Seconda guerra mondiale, la ricerca scientifica si intensificò enormemente, spinta dalla necessità di nuove tecnologie per fini bellici. Uno dei progetti più significativi di questo periodo fu la realizzazione della reazione nucleare a catena autosostenuta, un passo cruciale nello sviluppo dell'energia nucleare. Gli scienziati, guidati da Enrico Fermi, tra cui Leo Szilard, Herbert L. Anderson, Walter Zinn, Leona Woods, George Weil e Samuel K. Allison, si trovarono di fronte a numerose sfide tecniche e teoriche per controllare la reazione nucleare. L'obiettivo era costruire una pila nucleare, denominata CP-1 (Chicago Pile-1), che sarebbe stata il primo reattore nucleare a raggiungere una reazione a catena autosostenuta.

Tra il 1939 e 1940 Fermi e Anderson all'università di Columbia, iniziarono degli esperimenti rivolti alla determinazione del miglior elemento per agire come "moderatore" negli esperimenti di reazione a catena. Un moderatore efficace doveva avere un peso atomico leggero e una bassa sezione trasversale per assorbire neutroni. L'acqua ordinaria, sebbene leggera, assorbe neutroni, mentre l'acqua pesante è un buon moderatore con una sezione trasversale molto bassa, ma la sua separazione è energeticamente costosa e, quindi, molto cara. La grafite, invece, è efficace nel rallentare i neutroni e non li assorbe, essendo relativamente economica; tuttavia, tende a contenere impurità come il boro, che assorbono neutroni.

L'avvio degli esperimenti era stato segnato dall'arrivo di mezza tonnellata di blocchi di grafite. Fermi e Anderson lavoravano fianco a fianco, assemblandoli in una colonna di circa due metri e mezzo con una base di poco meno di un metro quadrato. In quindici blocchi erano stati intagliati degli alloggiamenti strategicamente situati a diverse altezze e in essi erano stati collocati appositi fogli per registrare i conteggi dei neutroni. Gli scienziati, cautamente ottimisti sull'efficacia della grafite, introdussero l'uranio nella loro struttura a forma di gabbia. Tutti gli esperimenti che i due condussero nei successivi diciotto mesi miravano a ottenere una reazione a catena autosostenuta indotta dalla fissione. I problemi tecnici furono innumerevoli, ma Fermi riuscì a risolverli uno per uno. Fu

qui che venne in soccorso la straordinaria capacità di Fermi di coniugare fisica sperimentale e teorica. (Segrè & Hoerlin, 2017, p. 198)

Per descrivere in termini accessibili una reazione a catena autosostenuta, Fermi introdusse un coefficiente  $K$ , il suo celebre fattore di moltiplicazione efficace dei neutroni. Le probabilità che un neutrone sia rallentato, assorbito dall'uranio o dal carbonio e infine provochi la fissione, sono tutte prese in considerazione e moltiplicate fra loro per ottenere un singolo, comodo termine detto  $K$ .

$$K = \frac{\text{neutroni nella generazione } (n + 1) \text{ - esima}}{\text{neutroni nella generazione } n \text{ - esima}}$$

Se  $K > 1$ , la reazione a catena è supercritica e il numero di neutroni crescerà in modo esponenziale. Se  $K < 1$ , la reazione a catena è subcritica e il numero di neutroni decade esponenzialmente. Se  $K = 1$ , la reazione a catena è critica, ovvero si raggiunge quella concentrazione e disposizione di atomi con nuclei fissili per cui la reazione a catena si autoalimenta in maniera stabile ed il numero complessivo di neutroni presente nel sistema rimane costante. C'era ancora una considerazione. Come ha scritto Fermi in un articolo<sup>9</sup> alla fine della guerra:

“avere  $K$  superiore a uno significa che la reazione desiderata avverrà sempre se la perdita di neutroni è sufficientemente piccola. Questo, naturalmente, può essere sempre ottenuto se la dimensione della pila<sup>10</sup> è abbastanza grande.”

Più grande è la pila, più piccola è la perdita. Fermi e Anderson avevano capito che una reazione a catena autosostenuta avrebbe richiesto la costruzione di una pila molto più grande.

Nel 1942, diversi gruppi di ricerca provenienti dalla Columbia University, Princeton University e dall'Università di Berkeley si unirono al "Metallurgical Laboratory" (Met Lab) dell'Università di Chicago, sotto la direzione generale di Arthur Compton. Il loro obiettivo era sviluppare una reazione nucleare a catena controllata. A partire da metà ottobre, il gruppo del Met Lab iniziò la costruzione

---

<sup>9</sup> Fermi, E. (1965), *Collected Papers*, vol. 2, a cura di Emilio Segrè. University of Chicago Press, Chicago, p 560.

<sup>10</sup> Il termine "pila" è stato usato da Fermi perché l'assemblaggio di carbonio e uranio poteva assumere in linea di principio qualsiasi forma: un cubo, una sfera, una colonna o ciò che sarebbe stato più opportuno. Era solo un mucchio, un cumulo, una pila appunto.

della pila nucleare, chiamata Chicago Pile-1 (CP-1), e la progettazione degli strumenti necessari per monitorare la reazione.

Non avendo a disposizione dati precisi sulle costanti fisiche e sulla teoria delle pile, il gruppo di ricerca decise di costruire la pila all'interno di un grande sacco di tessuto, realizzato dalla "Goodyear Tire and Rubber Company". Questo sacco poteva essere sigillato e svuotato dall'aria, eliminando l'azoto che assorbe neutroni, qualora fosse stato necessario per facilitare il raggiungimento della criticità. Fortunatamente, tale azione non si rivelò necessaria. Per costruire la CP-1, furono trasportate e lavorate circa 400 tonnellate di grafite. Il lavoro coinvolse tutti i membri del gruppo, inclusi professori, studenti, fisici, artigiani e persone non idonee al servizio militare, che si ritrovarono a maneggiare le barre di grafite, forandole e assemblando la pila, spesso lavorando fino a 90 ore alla settimana. Le barre di grafite, lunghe circa 40 cm e con una sezione di 10 x 10 cm, venivano posizionate a strati alternati per garantire stabilità strutturale. Ogni barra aveva due fori di circa 8 cm di diametro per ospitare sfere di ossido di uranio pressato o cilindri di uranio metallico. Complessivamente, furono utilizzate 22.000 pseudo-sfere di ossido di uranio e un numero minore di cilindretti di metallo. I materiali

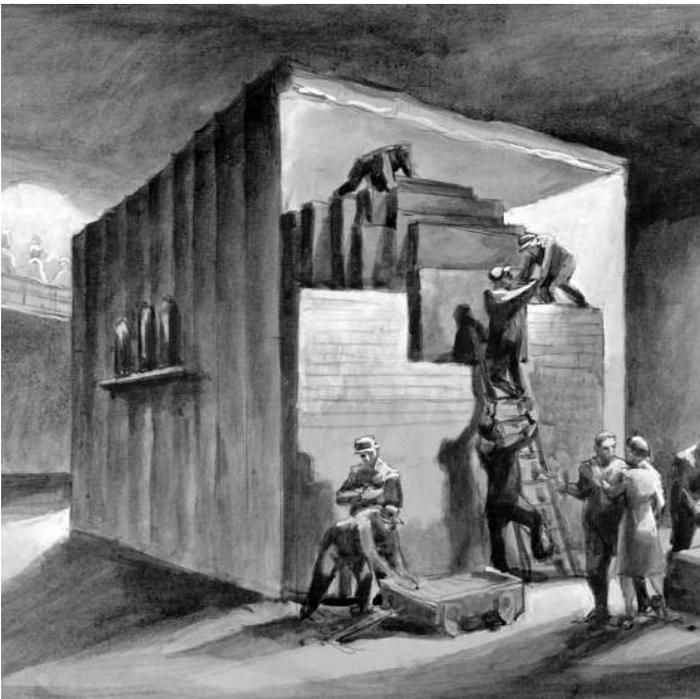


Figura 2. Costruzione della CP-1. (Krivit et al., 2010)

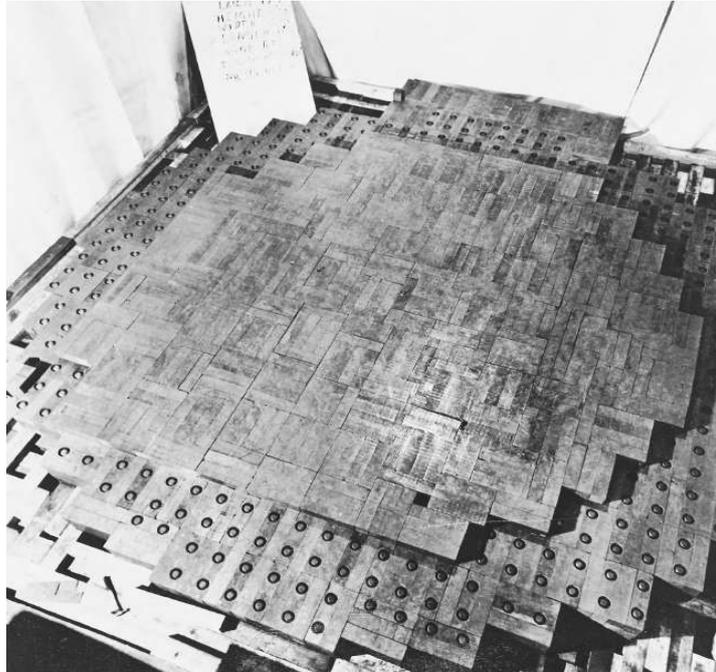
utilizzati variavano in purezza, con i materiali più puri posti più vicino al centro della pila per ottimizzare la reazione nucleare. Al raggiungimento del 52-esimo strato, Fermi prevede che il 56-esimo strato sarebbe stato sufficiente per raggiungere la criticità, ma aggiunse un 57-esimo strato come precauzione. (Krivit et al., 2010, pp. 36–39)

Durante la costruzione, Fermi diede una serie di lezioni per spiegare la teoria della pila e le aspettative per il test finale di criticità. In vista di ciò erano stati installati i meccanismi di sicurezza. Il più importante meccanismo erano le barre di controllo di quattro metri in cadmio, un forte assorbitore di neutroni, che erano tutte pronte per essere inserite a fondo o estratte dalla pila. Zinn ne aveva progettata una a gravità collocata sopra la pila, a cui aveva dato il nome di Zip. Questa era tenuta al suo posto da un elettromagnete collegato a un contatore di ionizzazione che misurava l'attività dei neutroni. Se il livello di attività avesse superato un certo valore di sicurezza preimpostato, lo Zip sarebbe stato automaticamente rilasciato, scendendo nella pila arrestando la reazione. Se poi tutte le altre misure di sicurezza fossero fallite, una squadra con tre secchi di solfato di cadmio aveva ordine di spruzzarlo sulla pila se questa fosse andata fuori controllo. Il solfato di cadmio avrebbe assorbito i neutroni, arrestando l'esperimento. E avrebbe anche potuto distruggere la pila. (Segrè & Hoerlin, 2017, pp. 226–232)

Il 2 dicembre 1942, a mezzogiorno, dopo aver controllato l'attrezzatura con altri membri della squadra, Fermi era pronto a dare inizio al test. I meccanismi di sicurezza furono messi in atto: tutte le barre di controllo, tranne quella controllata da Weil, furono rimosse. Fermi iniziò a dirigere il processo di rimozione della barra di controllo, in base alle letture degli strumenti. Ogni volta che una barra veniva spostata, il numero di conteggi nei rilevatori aumentava e la traccia del galvanometro si stabilizzava su un nuovo livello. Questo processo fu ripetuto fino a quando, inaspettatamente, la barra ZIP si inserì automaticamente, spegnendo efficacemente la pila, segnalando che era stata raggiunta una soglia predeterminata; infatti, gli scienziati erano stati troppo cauti nell'impostare il valore di conteggio delle radiazioni che avrebbe fatto cadere lo Zip che però era ancora lontana dalla criticità.

Dopo una pausa pranzo, il gruppo riprese il lavoro. Le barre di cadmio furono nuovamente rimosse e la barra di controllo fu ritirata fino a una posizione predefinita. Con ulteriori ritiri incrementali, il ritmo dei conteggi aumentò notevolmente e Fermi annunciò che la pila era critica ovvero la reazione a catena sarebbe stata autosostenuta. La conferma definitiva avvenne quando Fermi notò un cambio nella curva della traccia del galvanometro, indicando che la reazione

era diventata esponenziale. A questo punto, la barra ZIP fu inserita, fermando la reazione, e la squadra brindò con del Chianti. L'esperimento fu un successo e rimane un momento storico cruciale poiché segnò la realizzazione della prima reazione nucleare a catena autosostenuta nella storia, ponendo le basi per lo sviluppo di reattori nucleari.



*Figura 3 Pila CP-1 in costruzione, dove si osservano i blocchi di grafite con e senza uranio. (Krivit et al., 2010)*

## 2. Applicazioni Civili

### 2.1. Il dopo guerra

Con il termine del secondo conflitto mondiale, la scoperta della fissione nucleare e il suo utilizzo per fini bellici avevano dimostrato il potenziale dell'energia nucleare. Tuttavia, fu il suo potenziale pacifico e civile ad attirare l'attenzione di molti governi e scienziati. Gli Stati Uniti istituirono nel 1946 la *Atomic Energy Commission* (AEC) che aveva il compito di sovrintendere alla ricerca e allo sviluppo nucleare, sia in campo militare che civile. Sempre negli Stati Uniti, il Presidente Dwight D. Eisenhower, nel suo famoso discorso "Atomi per la Pace" del 1953, espresse la visione di un mondo in cui l'energia nucleare sarebbe stata utilizzata per promuovere il benessere umano e lo sviluppo economico. Questo discorso segnò l'inizio di una serie di politiche internazionali volte a promuovere l'uso pacifico dell'energia nucleare, portando alla creazione di agenzie e trattati internazionali, come l'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (AIEA) nel 1957.

L'interesse per l'energia nucleare si estese rapidamente in tutto il mondo. In Europa, la Comunità Europea dell'Energia Atomica (EURATOM) fu istituita per coordinare gli sforzi dei paesi membri nello sviluppo di tecnologie nucleari. In Asia, il Giappone, nonostante l'esperienza traumatica con le bombe atomiche, iniziò a sviluppare un programma nucleare civile che, nel corso degli anni, è diventato uno dei più avanzati al mondo. Inoltre, altre nazioni come la Francia e il Regno Unito hanno investito massicciamente nelle tecnologie nucleari, vedendo in esse una soluzione per soddisfare le crescenti esigenze energetiche e ridurre le emissioni di gas serra. La Francia, in particolare, ha sviluppato un vasto programma nucleare, diventando uno dei principali produttori mondiali di energia nucleare, con una percentuale nel 2022 circa il 74% della propria energia elettrica proveniente da centrali nucleari. (*France - Countries & Regions*, s.d.)

Di seguito, esaminerò alcune delle applicazioni civili dell'energia nucleare che, a mio avviso, hanno avuto un impatto significativo sulla nostra civiltà. Non intendo fornire un elenco esaustivo giacché le applicazioni sono numerose e molte altre meriterebbero un'analisi approfondita, mi concentrerò dunque su quelle che ritengo più rilevanti nel contesto di questa tesi.

## **2.2. I reattori nucleari per la produzione d'energia**

Ad agosto 2024 ci sono 440 reattori nucleari operativi in 32 paesi in tutto il mondo. I sei tipi di impianti attualmente in funzione sono: reattori ad acqua pressurizzata (PWR), reattori ad acqua bollente (BWR), reattori ad acqua pesante<sup>11</sup> (HWR), reattori raffreddati a gas (GCR), reattori raffreddati ad acqua leggera<sup>12</sup> e moderati a grafite (LGR) e un singolo reattore veloce autofertilizzante raffreddato a metallo liquido in funzione in Russia. I due tipi principali di reattori sono i PWR e i BWR. Nel mondo ci sono 268 PWR e 88 BWR, che rappresentano rispettivamente il 61% e 20% del numero totale di reattori nel mondo e coprono il 9.1% del fabbisogno energetico mondiale. (*Nuclear Power in the World Today - World Nuclear Association*, s.d.)

### **2.2.1. Reattori ad acqua pressurizzata PWR**

Alla fine degli anni '40, negli Stati Uniti nacque l'idea di sviluppare un tipo di reattore nucleare che potesse fornire energia ai sottomarini, come risultato di un progetto congiunto tra il governo e l'industria. L'AEC affidò la progettazione del reattore all'Argonne National Laboratory (ANL), che portò allo sviluppo del *Submarine Thermal Reactor* (STR), il primo reattore ad acqua pressurizzata (PWR) destinato alla propulsione sottomarina. L'implementazione di questo reattore all'interno di un sottomarino fu assegnata nel 1947 alla società Westinghouse che nel gennaio 1954 completò con successo il suo lavoro, portando al varo del primo sottomarino a propulsione nucleare l'USS Nautilus. Dopo che il sistema PWR aveva dimostrato la propria affidabilità e sicurezza nei sottomarini, gli Stati Uniti videro un'opportunità strategica per utilizzare questa tecnologia a fini civili, così il prototipo fu successivamente adattato per la generazione di energia elettrica. Nel settembre 1954, Westinghouse, con il supporto dell'AEC, avviò quindi la costruzione della Shippingport Atomic Power Station in Pennsylvania, che divenne la prima centrale nucleare al mondo per la produzione di energia elettrica commerciale. La centrale entrò in funzione a pieno regime nel 1958. (Krivit et al., 2010, p. 42,176)

---

<sup>11</sup> Acqua in cui l'idrogeno nelle molecole è parzialmente o totalmente sostituito dall'isotopo deuterio, la sua formula chimica è D<sub>2</sub>O o <sup>2</sup>H<sub>2</sub>O.

<sup>12</sup> O più semplicemente acqua H<sub>2</sub>O.

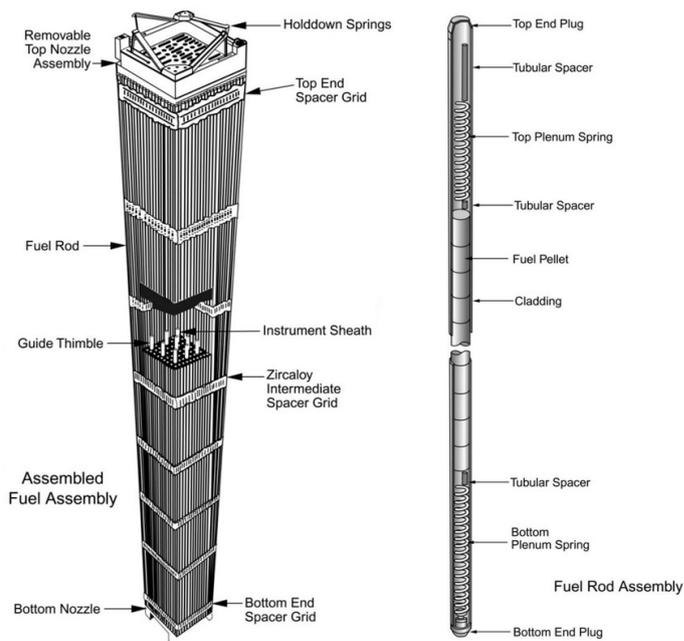


Figura 4 illustra una barra di combustibile, un "fascio" e i suoi costituenti

Il rivestimento del combustibile per la sua resistenza alla corrosione e la ridotta sezione d'urto per la cattura neutronica. Un "fascio" di combustibile per un PWR è generalmente un assemblaggio quadrato composto da 15×15 o 17×17 barre, che includono sia quelle di combustibile che di controllo<sup>13</sup>, con una lunghezza di circa 4 metri. Un tipico PWR contiene da 200 a 300 barre per gruppo, e un grande reattore ne utilizza circa 150-250 gruppi, contenendo complessivamente 80-100 tonnellate di uranio e producendo una potenza di circa 900-1.600 MWe.

L'acqua a 275°C entra dalla parte bassa del nucleo e fluisce verso l'alto attraversando il nucleo del reattore e riscaldandosi fino a 315°C. È importante comprendere che l'acqua all'interno del nucleo del reattore è pressurizzata tipicamente a 2000–2400 psi (136-163 atm), questa elevata pressione ne impedisce l'ebollizione, garantendo una maggiore densità e richiedendo un arricchimento inferiore dell'uranio rispetto a un reattore nucleare ad acqua bollente (BWR). Successivamente l'acqua ad alta pressione e 315°C scorre verso un generatore di vapore, dove passa attraverso un fascio di tubi immersi in acqua riscaldata ma a temperatura e pressione inferiore (180-220°C e 1000 psi), detta acqua di alimentazione. Quando il calore viene trasferito all'acqua di alimentazione, si crea vapore che viene inviato alla turbina, convertendo l'energia

<sup>13</sup> Sono una lega di argento-indio-cadmio.

termica in energia meccanica. Le turbine sono collegate a un generatore elettrico che converte l'energia meccanica in energia elettrica. Dopo aver passato le turbine, il vapore ha bisogno di essere convertito nuovamente in acqua d'alimentazione (cioè condensato) per poter essere riutilizzato nel ciclo. Il condensatore è un dispositivo che raffredda questo vapore esausto e lo condensa trasformandolo in acqua liquida. Questo processo avviene quando il vapore entra in contatto con superfici di scambio termico all'interno del condensatore, che sono raffreddate dal fluido refrigerante terziario (come l'acqua prelevata da un fiume, mare o torri di raffreddamento). È presente anche un pressurizzatore collegato a uno dei tubi caldi primari tra il recipiente del reattore e uno dei generatori di vapore. Il pressurizzatore è un serbatoio ad alta pressione, parzialmente riempito d'acqua sotto uno strato di vapore, con un complesso di spruzzatori di raffreddamento e riscaldatori per mantenere la pressione del vapore entro un intervallo prestabilito. (Krivit et al., 2010, pp. 167–169)

In conclusione, l'acqua che circola tra il nucleo del reattore, il pressurizzatore e il generatore di vapore è chiamata fluido refrigerante primario. L'acqua che scorre tra il generatore di vapore, la turbina e il condensatore è chiamata fluido refrigerante secondario o d'alimentazione, e infine, l'acqua a temperatura ambiente prelevata da una fonte esterna come un fiume, il mare, o dalle torri di raffreddamento è il fluido refrigerante terziario utilizzato per raffreddare il vapore dopo che ha attraversato la turbina, permettendone la condensazione.

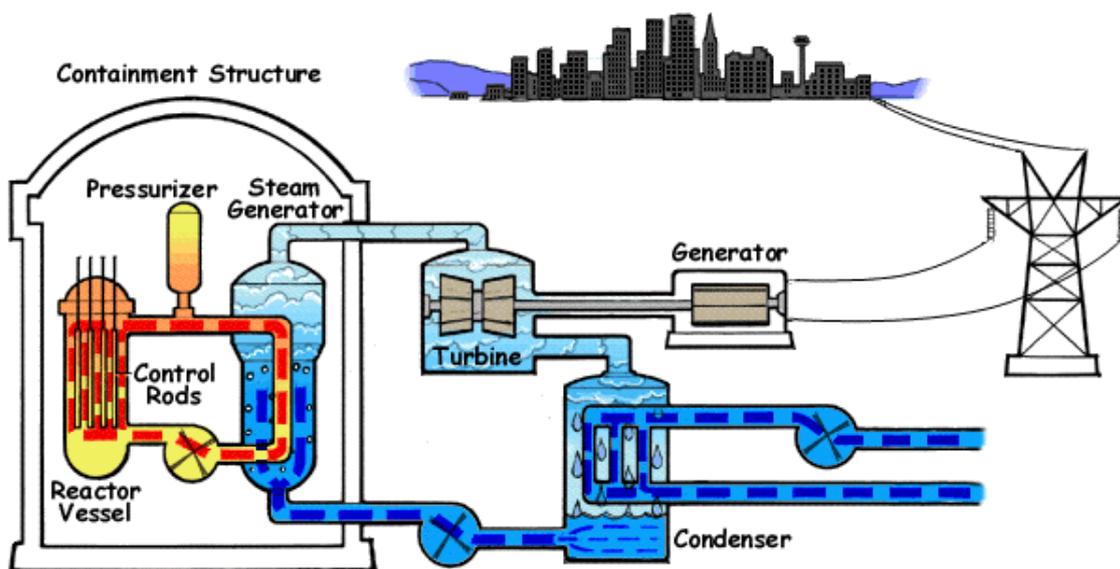


Figura 5 Diagramma di una centrale con reattore ad acqua pressurizzata PWR. fonte U.S.NRC. (<http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/animated-pwr.html>)

### 2.2.2. Reattori ad acqua bollente BWR

La storia del Reattore ad Acqua Bollente (BWR) iniziò all'ANL, dove gli scienziati analizzarono l'effetto delle bolle di vapore nel nucleo sulla stabilità del reattore. Per studiare questi effetti, venne costruita e messa in funzione la serie sperimentale di reattori BORAX (Boiling Reactor Experiment) presso il National Reactor Testing Station (NRTS) in Idaho. Il primo esperimento, BORAX-I, iniziò nel 1953 con una potenza di 1,4 MWt e prevedeva una progressiva ebollizione dell'acqua all'interno del nucleo per valutare il comportamento del reattore. Questo reattore rimase stabile e dimostrò la capacità di mantenere il controllo anche durante improvvisi aumenti della reattività<sup>14</sup>, superando con successo una serie di test di sicurezza fino alla sua distruzione, causata da un'espansione termo-idraulica. Uno dei principali vantaggi del design BWR era l'assenza di generatori di vapore, caratteristica che riduceva i costi di costruzione rispetto ai reattori PWR. Questa configurazione fu ulteriormente sviluppata con BORAX-II nel 1954, una versione più grande e ad alta pressione che permetteva una gamma di arricchimenti di  $U^{235}$  nelle placche di combustibile. BORAX-II fu presto trasformato in BORAX-III grazie all'aggiunta di un generatore a turbina, che il 17 luglio 1955 alimentò la città di Arco, Idaho, segnando la prima volta che una comunità ricevette elettricità completamente prodotta da fonte nucleare. (Krivit et al., 2010, p. 43)

Il BWR è un tipo di centrale nucleare termica che utilizza acqua leggera come refrigerante e moderatore per la generazione di energia. Una caratteristica distintiva del BWR, rispetto ad altri reattori ad acqua leggera, è la generazione di vapore direttamente nel nucleo del reattore. La centrale BWR produce elettricità convertendo l'energia termica in energia meccanica e, tramite turbine e generatori, in energia elettrica. Il combustibile nucleare nel nucleo subisce una reazione di fissione esotermica, che rilascia calore. Il calore rilasciato dalla fissione viene trasferito all'acqua che scorre attraverso il nucleo del reattore. Come progettato, le condizioni di temperatura e pressione all'interno del nucleo fanno sì che l'acqua subisca un cambiamento di fase e diventi vapore. La forza del vapore che entra nella turbina la fa ruotare. La turbina è collegata a un

---

<sup>14</sup> Indica la misura di quanto un reattore nucleare si discosta dal suo stato critico. I cambiamenti di reattività possono quindi causare variazioni nella potenza del reattore e nella temperatura del nucleo.

generatore elettrico contenente magneti. L'elettricità è prodotta nel generatore per induzione elettromagnetica, causata dalla rotazione dei magneti. Dopo aver lasciato il sistema turbina/generatore, il vapore si condensa, subisce un cambiamento di fase e ritorna allo stato liquido. L'acqua viene quindi riscaldata e riportata nel nucleo del reattore per ripetere il processo. L'uranio nel combustibile nucleare è responsabile della reazione di fissione esotermica che fornisce l'energia termica nel BWR. Come per il PWR le pastiglie di combustibile sono fatte di diossido di uranio  $UO_2$ , ma nel caso del BWR, arricchite dal 2%-4% con  $U^{235}$ .

Il BWR è moderato e raffreddato da normale acqua leggera, che viene anche utilizzata come fluido di trasporto del calore. L'acqua entra nel vertice inferiore del reattore situato sotto l'area del nucleo. L'acqua migra nel nucleo che contiene gli assemblaggi di combustibile, dove l'energia rilasciata dalle reazioni di fissione nel combustibile viene assorbita dall'acqua. L'energia assorbita dall'acqua include il calore latente, che vaporizza l'acqua e crea vapore. La miscela multifase sale nel vertice superiore e poi nei separatori di vapore. Il separatore di vapore divide la maggior parte della miscela in vapore e acqua; con l'acqua che fluisce nel *downcomer*<sup>15</sup> e il vapore che sale al di sopra del livello dell'acqua negli essiccatori<sup>16</sup>. Il vapore esce dal contenitore del reattore tramite la linea di vapore che porta ai sistemi di turbina/generatore e condensatore.

La creazione di vapore nel nucleo, con una temperatura di circa 290°C, rende il fluido di trasferimento del calore radioattivo dopo il passaggio attraverso il nucleo. Questo porta alla necessità di schermare dalle radiazioni i sistemi che utilizzano il fluido nella linea di vapore. La pressione in un BWR, circa 1000 psi, è approssimativamente la metà della pressione di un PWR. I sistemi di scambio di calore e pressurizzazione sono due principali sistemi non necessari nel design del BWR.

---

<sup>15</sup> È una tubazione o un canale verticale attraverso cui l'acqua, che non si è trasformata in vapore, scende dalla parte superiore del reattore verso la parte inferiore ed è essenziale per garantire una circolazione continua dell'acqua attraverso il nucleo del reattore, permettendo all'acqua raffreddata di tornare verso il nucleo per assorbire nuovamente il calore generato dalle reazioni di fissione.

<sup>16</sup> Questi componenti hanno il compito di rimuovere l'umidità residua dal vapore generato nel nucleo del reattore, garantendo che solo vapore secco venga inviato alle turbine. Questo è importante per prevenire danni alle turbine e per migliorare l'efficienza del sistema di generazione dell'energia.

I disegni del PWR e del BWR differiscono in un aspetto fondamentale. Un BWR genera vapore all'interno del nucleo, mentre il PWR produce vapore tramite un sistema di raffreddamento secondario. Questa differenza porta a un nucleo più grande per il BWR per ospitare attrezzature come i separatori di vapore e gli essiccatori in alto e le barre di controllo in basso. Per il BWR è necessario un combustibile con un arricchimento di uranio leggermente più alto a causa degli effetti del vapore/acqua. Il vapore generato nel nucleo del BWR che fluisce verso la turbina contiene tracce di radionuclidi che richiedono schermature dalle radiazioni in tutto il sistema del nucleo e delle turbine. Il contenitore del nucleo è più piccolo per un PWR; tuttavia, la pressione operativa più alta richiede materiali più resistenti nel sistema di raffreddamento primario. Il PWR richiede anche sistemi aggiuntivi per la generazione di vapore e la pressurizzazione. L'uso del sistema di raffreddamento secondario nel PWR riduce leggermente l'efficienza termica della centrale, ma questo è compensato dalle pressioni più elevate rispetto al BWR. (Krivit et al., 2010)

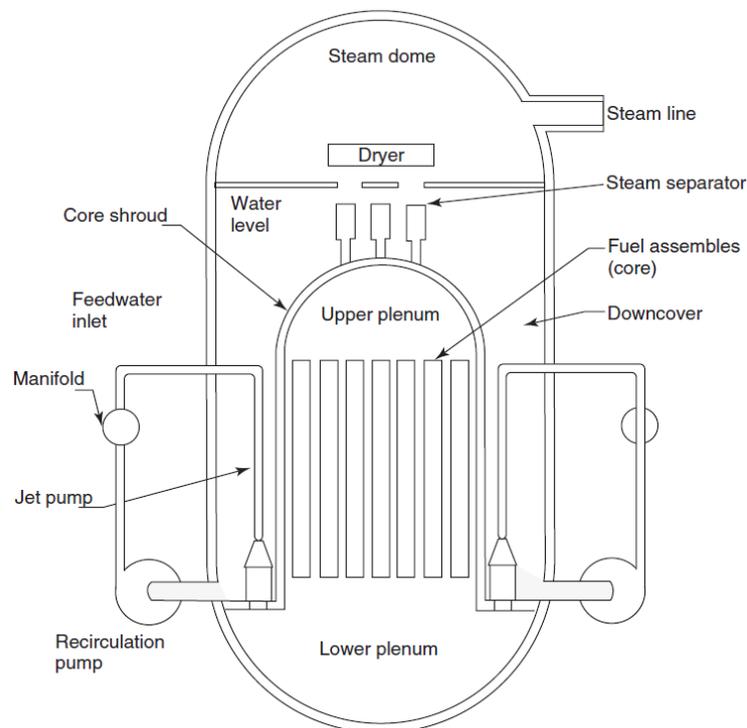


Figura 6 Diagramma di reattore ad acqua bollente BWR

## **2.3. Medicina nucleare**

La medicina nucleare è una branca della medicina che utilizza radiazioni per scopi diagnostici e terapeutici, principalmente in oncologia. Queste radiazioni possono essere applicate sia esternamente che internamente attraverso l'uso di radionuclidi, ossia isotopi radioattivi che seguono i processi metabolici del corpo. La capacità di combinare tecniche diagnostiche avanzate con trattamenti mirati permette di localizzare e trattare con precisione tumori e altre malattie.

### **2.3.1. Il padre della medicina nucleare**

George de Hevesy, considerato il "padre della medicina nucleare", è stato uno scienziato di origini ungheresi la cui ricerca pionieristica ha posto le basi per questa disciplina medica. Nato a Budapest nel 1885 in una famiglia nobile, Hevesy si formò in chimica fisica presso varie università europee, ottenendo il dottorato a soli 23 anni nel 1908. La sua carriera decollò quando entrò in contatto con il noto fisico Ernest Rutherford all'Università di Manchester nel 1912, dove lavorò al fianco del collega e amico Niels Bohr. Durante il periodo a Manchester, Rutherford gli affidò una sfida apparentemente impossibile: separare il Radium D dal piombo. Né Rutherford né Hevesy sapevano all'epoca che questo compito fosse impraticabile, poiché il Radium D (in realtà un isotopo radioattivo del piombo, il Pb-210) non può essere isolato dal piombo stabile tramite tecniche chimiche convenzionali. L'incarico non era pensato come un test senza speranza, ma era frutto della sincera curiosità scientifica di Rutherford, che riteneva la sfida teoricamente risolvibile attraverso la chimica analitica. Dopo due anni di tentativi falliti, Hevesy si rese conto che la separazione era impossibile, così ebbe un'intuizione straordinaria: poiché il Radium D non poteva essere separato, poteva comunque essere utilizzato come "indicatore" per studiare le proprietà del piombo stesso. Così, nel 1913, pubblicò il suo primo lavoro sul "principio del tracciante" o "principio dell'indicatore", introducendo il concetto di usare elementi radioattivi come traccianti per monitorare il comportamento di sostanze chimiche nei processi biologici. Questa scoperta divenne la base della medicina nucleare, consentendo di tracciare elementi specifici all'interno del corpo umano per studiarne la fisiologia. (University of Copenhagen, 2022)

Un episodio curioso avvenne proprio durante i suoi anni a Manchester: sospettando che la padrona della pensione in cui alloggiava servisse avanzi riciclati, Hevesy aggiunse una piccola quantità di materiale radioattivo ai resti di un pasto. Il giorno successivo, verificò la radioattività del cibo, dimostrando che si trattava effettivamente di avanzi. Sebbene questo esperimento non fosse scientifico in senso stretto, fu una delle prime applicazioni pratiche del principio del tracciante. Nel 1920, su invito di Niels Bohr, Hevesy si trasferì all'Istituto di Fisica Teorica di Copenaghen. Qui affinò ulteriormente il principio del tracciante, estendendone l'applicazione alla biologia e alla medicina. Condusse studi pionieristici sul metabolismo e sull'assorbimento del fosforo nelle ossa, dimostrando che il tessuto osseo non era statico ma in costante rinnovo, un'idea rivoluzionaria che contribuì a ridefinire la comprensione della fisiologia ossea.(Obaldo & Hertz, 2021)

Nel 1944, Hevesy ricevette il Premio Nobel per la Chimica, conferitogli per il suo lavoro sull'uso degli isotopi come traccianti nello studio dei processi chimici, con cui pose le fondamenta della medicina nucleare moderna, trasformando così un "fallimento" sperimentale in una scoperta rivoluzionaria (*The Nobel Prize in Chemistry 1943*, s.d.).

### **2.3.2. Diagnostica per immagini: tipi di contrasto e tecniche**

La diagnostica per immagini è fondamentale per analizzare con precisione i problemi di un paziente e pianificare un trattamento efficace. Essa si avvale di due principali tipi di contrasto: morfologico/anatomico e funzionale, che differiscono sia nel modo in cui creano le immagini sia nelle informazioni che forniscono.

Contrasto morfologico/anatomico: Questo tipo di contrasto è usato nelle tecniche basate sui raggi X, come la radiografia e la tomografia computerizzata (TC), per produrre immagini della struttura fisica degli organi, delle ossa e dei tessuti molli. I raggi X attraversano il corpo e vengono assorbiti in maniera differente dai vari tessuti, evidenziando così dettagli anatomici come fratture, calcificazioni e altre alterazioni strutturali. La radiografia produce immagini bidimensionali (2D), mentre la tomografia computerizzata, combinando diverse immagini 2D prese da varie angolazioni, crea una rappresentazione tridimensionale (3D) del corpo. Sebbene

la TC comporti una dose di radiazioni maggiore rispetto alla radiografia tradizionale, i suoi vantaggi diagnostici giustificano questo rischio aggiuntivo.

Contrasto funzionale: Caratteristico delle tecniche di medicina nucleare, come la tomografia a emissione SPECT e PET, il contrasto funzionale si ottiene mediante la somministrazione di radiofarmaci. A differenza dei raggi X, qui è il radiofarmaco stesso a emettere radiazioni (spesso raggi gamma), che vengono rilevate da una gamma camera. Questa tecnologia fornisce informazioni sull'attività metabolica degli organi, concentrandosi nelle aree biologicamente attive, e quindi è particolarmente utile per diagnosticare anomalie come tumori o infezioni.

I principali metodi della tomografia a emissione sono:

-SPECT (Tomografia a Emissione di Singolo Fotone): Utilizza collimatori<sup>17</sup> per filtrare i fotoni in arrivo da direzioni specifiche.

-PET (Tomografia a Emissione di Positroni): Sfrutta l'annichilazione tra positroni ed elettroni per produrre coppie di fotoni<sup>18</sup> che viaggiano in direzioni opposte, eliminando la necessità di collimatori.

La PET è particolarmente utile per diagnosticare il cancro, poiché rileva le cellule

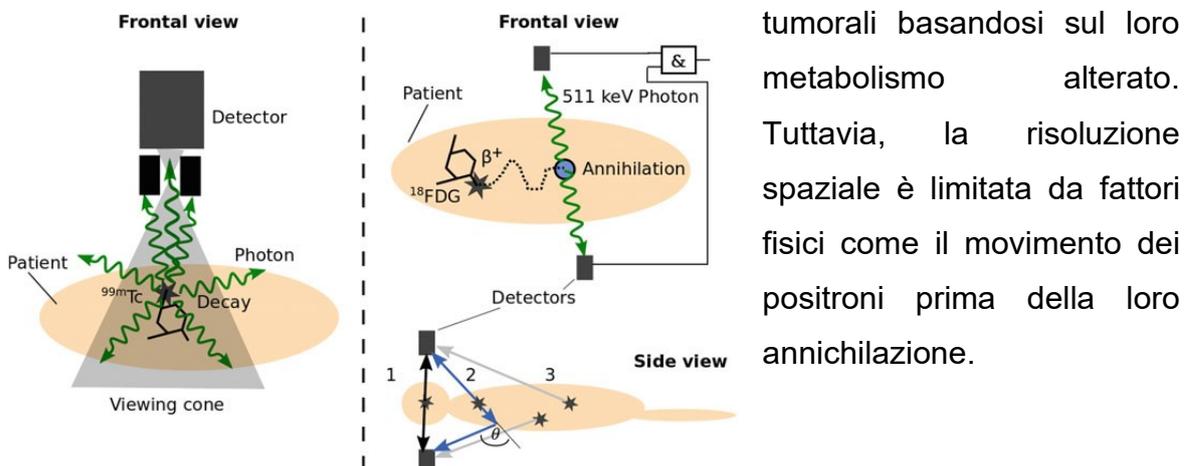


Figura 7 A sinistra: geometria di rilevamento SPECT con il suo cono di visualizzazione definito dal collimatore. A destra: PET che richiede il rilevamento coincidente di due fotoni da 511 keV dall'annichilazione del positrone. Sotto: imaging 2D. (Sören Möller, 2020, p. 251)

<sup>17</sup> Un collimatore è un dispositivo in grado di raddrizzare un fascio di raggi provenienti da una sorgente, in campo medico viene utilizzato nella pianificazione del trattamento radioterapico per indirizzare il fascio nella zona giusta colpita da tumore.

<sup>18</sup> Nel caso più comune, vengono creati due fotoni aventi ciascuno un'energia pari all'energia a riposo dell'elettrone o del positrone (511 keV).

### 2.3.3. Radioterapia: trattamento del cancro con radiazioni

La radioterapia è una delle principali modalità terapeutiche per il trattamento del cancro. L'obiettivo è distruggere le cellule tumorali minimizzando i danni ai tessuti sani circostanti. Questa terapia si basa sulla somministrazione controllata di radiazioni, che causano danni al DNA delle cellule cancerose, portando alla loro morte. Troviamo principalmente due tipi di terapie la Terapia a Fasci Esterni (TFE) e la Terapia Metabolica Radionuclide Interna (TMRI).

La TFE utilizza sorgenti di radiazioni esterne, come acceleratori lineari, per colpire il tumore dall'esterno del corpo. A seconda della posizione e della profondità del tumore, vengono utilizzate diverse particelle:

- Fotoni: Efficaci per i tumori superficiali, poiché depositano la maggior parte della loro energia vicino alla superficie del corpo.
- Elettroni: Utilizzati per trattare tumori più superficiali, con un miglior controllo sulla profondità di penetrazione rispetto ai fotoni.
- Protoni e ioni pesanti<sup>19</sup>: Grazie al picco di Bragg, queste particelle concentrano la loro energia in un punto preciso, il che le rende ideali per trattare tumori profondi senza danneggiare i tessuti sani.

La TMRI utilizza vettori che trasportano isotopi radioattivi direttamente alle cellule tumorali. Questi vettori possono essere molecole semplici o più complesse, come anticorpi o virus che si legano specificamente alle cellule malate, è particolarmente utile per colpire metastasi o tumori difficili da raggiungere con altre modalità. Tuttavia, presenta sfide significative nella produzione di vettori altamente specifici per ogni tipo di cancro. Gli isotopi radioattivi utilizzati, come gli emettitori di particelle alfa, sono molto efficaci poiché hanno una penetrazione limitata, riducendo al minimo i danni ai tessuti sani circostanti. Alcuni esempi classici sono l'uso di iodio-131 (I-131) per trattare il cancro alla tiroide, sfruttando l'affinità della tiroide per lo iodio, Lutezio-177 (Lu-177) utilizzato per trattare i tumori neuroendocrini e alcuni tipi di cancro alla prostata, Ittrio-90 (Y-90) utilizzato nel trattamento dei linfomi e di alcuni tumori del fegato, Attinio-225 (Ac-225) utilizzato nelle terapie più recenti. (Sören Möller, 2020, pp. 237–268)

---

<sup>19</sup> Nota anche come Adroterapia.



## 3. Elettronucleare in Italia

### 3.1. La corsa ai reattori

Negli anni '50, l'Italia conobbe una rapida crescita economica e industriale, aumentando la domanda di energia. Le centrali idroelettriche esistenti non riuscivano a soddisfare il fabbisogno, portando l'Italia a importare energia dall'estero, soprattutto dalla Francia. Inoltre, la crisi di Suez del 1956<sup>20</sup> porta a una impennata dei prezzi del petrolio e dunque pone l'accento sull'importanza della diversificazione degli approvvigionamenti energetici. Tutto questo fece capire al ceto dirigente italiano e agli industriali che c'era bisogno che l'Italia si dotasse di un apparato di produzione energetica degna di un paese avanzato, di un paese industriale, e dunque si inizia a pensare al nucleare, e proprio in questo periodo furono stipulati accordi, sia tra società private che con enti statali, che portarono alla costruzione delle quattro centrali nucleari in Italia.

Nel 1956 i due colossi statali Ente nazionale idrocarburi (ENI) guidata da Enrico Mattei e l'Istituto per la Ricostruzione Industriale (IRI) annunciano che verrà costruita una centrale di tecnologia britannica GCR Magnox<sup>21</sup> da 200 MWe a Borgo Sabotino nei pressi di Latina. La centrale fu costruita tra il 1958 e il 1962, nel 1963 è stata la prima centrale nucleare a entrare in funzione in Italia e rimase attiva fino al 1986, fu chiusa definitivamente nel 1990. La centrale dall'inizio dell'esercizio fino al giorno del definitivo arresto ha prodotto circa 25.49 TWh di energia elettrica con un *load factor*<sup>22</sup> del 70.3%. Nel 1957, la Società Elettronucleare Nazionale (SENN) che è sempre un'emanazione dell'IRI-Finelettrica, lancia inoltre un bando di gara per la centrale che vuole costruire a Sessa Aurunca in provincia di Caserta. Bando che viene vinto dall'americana General Electric per la fornitura di un reattore ad acqua bollente BWR a uranio arricchito di 160 MWe. La centrale fu costruita tra il 1959 e il 1963, entrò in funzione nel 1964 e rimase attiva fino al 1978, anno in cui è stato fermato per manutenzione. Dopo aver valutato come antieconomici i costi della sua

---

<sup>20</sup> Nel 1956 avviene l'occupazione militare del canale di Suez da parte di Francia e Regno Unito, con la partecipazione strategica di Israele, a cui si oppone l'Egitto. La crisi si conclude l'anno successivo su pressioni di URSS e USA in sostegno dell'Egitto.

<sup>21</sup> Tipologia di reattori a uranio non arricchito, moderati a grafite e refrigerati a gas.

<sup>22</sup> È la percentuale di energia effettivamente prodotta in un determinato periodo di tempo rispetto all'energia che l'impianto avrebbe teoricamente fornito funzionando costantemente a piena potenza, gli impianti attuali hanno un *load factor* tra il 70% e il 90%.

riparazione vista la poca vita residua dell'impianto, è stata disattivata definitivamente nel 1982. Nella sua vita utile ha prodotto 12.25 TWh con un *load factor* del 39%. La terza centrale sorge a Trino Vercellese in Piemonte da un accordo tra due aziende private, la milanese Edison e l'americana Westinghouse, l'idea è quella di una centrale con tecnologia americana con reattore PWR a uranio arricchito, con una potenza di 270 MWe, la sua costruzione inizia nel 1961 e viene conclusa nel 1964, resta operativa tra il 1965 e il 1987, producendone 24.31 TWh e un *load factor* del 45.3%. La quarta e ultima fu la centrale di Caorso, costruita sulla sponda destra del Po tra Piacenza e Cremona, era frutto di una collaborazione fra la ditta italiana Ansaldo e l'americana General Electric ed era anche la più potente in Italia con un reattore di tipo BWR a uranio arricchito i suoi 860 MWe. Costruita tra il 1970 e 1977, entrò in funzione nel 1978 ma la sua vita durò poco, venne infatti spenta nel 1986 per la normale operazione di ricambio del combustibile, ma non fu mai fatta ripartire. Fornì 27.73 TWh ed ebbe un *load factor* di solo 36.7%. (Flavio Parozzi, 2021, pp. 30, 70).

### **3.2. Il referendum**

Nel gennaio del 1963 avviene la nazionalizzazione del sistema elettrico nazionale tramite l'istituzione dell'Ente nazionale per l'energia di lavoro (ENEL) e dunque la gestione di tutte le centrali nucleari italiane passano nelle mani dell'ENEL. Agli inizi degli anni '70 sia negli Stati Uniti che in Europa nacquero per la prima volta dei movimenti ambientalisti, tra essi anche il movimento antinuclearista, un movimento d'opinione animato dalla preoccupazione che la tecnologia elettronucleare presentasse una serie di controindicazioni che ne sconsigliavano fortemente la diffusione. La stragrande maggioranza degli argomenti sollevati contro il nucleare civile sono stati tradizionalmente appannaggio dei gruppi ambientalisti più radicali che l'hanno sempre accusata di essere una tecnologia ingiustificatamente pericolosa per le persone e per l'ambiente. La discussione sulla quinta centrale italiana a Montalto di Castro nell'Altro Lazio iniziò nei primi anni '70 nel mezzo delle campagne antinucleariste. Il piano energetico nazionale aveva subito una pesante battuta d'arresto a causa dell'ostracismo di amministrazioni locali e movimenti ecologisti animati da controversi convincimenti. Il risultato fu che l'Italia, che negli anni '60 deteneva il terzo posto nel mondo per produzione di energia elettronucleare, dietro solo a Stati Uniti e Gran Bretagna,

scese al quattordicesimo posto nel 1973. La crisi petrolifera causata dalla guerra del Kippur del 1973 ridiede vigore alla pianificazione energetica nazionale, orientandola nuovamente verso l'opzione nucleare. Fu così che furono accelerati i processi decisionali ed autorizzativi per l'apertura della centrale di Montalto di Castro e di un'altra simile nel Lazio per un totale di 2 GWe di potenza. A seguire si sarebbero dovute realizzare altre due centrali di ugual potenza in Abruzzo, ma i progetti furono immediatamente contestati da associazioni ambientaliste e di cittadini locali e quindi bloccati dalle autorità regionali. Le avversioni, le proteste ed in qualche misura i ritardi dovuti alle mancate decisioni politiche fecero sì che i lavori per la centrale di Montalto iniziarono di fatto solo nel 1981, dieci anni dopo che la decisione politica era stata presa. Nel frattempo, nel marzo del 1979, un incidente alla centrale di Three Mile Island negli Stati Uniti, diede nuovo vigore ai movimenti antinucleari che utilizzarono l'evento come ulteriore spauracchio. Nonostante questo, i lavori proseguivano speditamente, ma nel 1986 avviene il disastro di Chernobyl, che fu di dimensioni tali da indurre quasi tutta la classe politica italiana a retrocedere rispetto agli impegni nucleari e la fine del nucleare italiano è di fatto ormai segnata. (Giancarlo Nebbia, 2007, p. 201,202)

Nel novembre del 1987 si tiene il referendum abrogativo<sup>23</sup>, si vota quindi per cinque referendum, di cui tre riguardanti l'energia nucleare. I quesiti furono posti come segue:

-Referendum nucleare 1: *“L’abrogazione delle norme che consentono al CIPE di decidere sulla localizzazione delle centrali nel caso non lo facessero nei tempi indicati dalla legge 3939 le Regioni”*

-Referendum nucleare 2: *“L’abrogazione dei compensi ai Comuni che ospitano centrali nucleari o a carbone”*

-Referendum nucleare 3: *“L’abrogazione delle norme che consentono all’ENEL di partecipare ad accordi internazionali per la costruzione e la gestione di centrali nucleari”*

---

<sup>23</sup> Referendum popolare per deliberare la abrogazione, totale o parziale, di una legge o di un atto avente valore di legge.

Trattandosi di abolizione di leggi in vigore, nessuno dei tre quesiti implica esplicitamente la chiusura delle centrali, ma la vittoria dei “SI” viene logicamente interpretata come una scelta presa dagli italiani contro le centrali nucleari e infatti la costruzione della centrale di Montalto di Castro viene completamente bloccata e nel 1990 vengono chiuse definitivamente le centrali di Latina, Trino V. e Caorso centrali che nel 1986 l’ENEL aveva deciso prudentemente di mettere in *stand-by* senza attendere il risultato del referendum il cui risultato era dato per scontato. La seguente tabella riepiloga i principali dati storici dei quattro reattori nucleare usati in Italia per la produzione di energia elettrica. (Flavio Parozzi, 2021)

| Centrale   | Tipo Reattore    | Potenza Di Progetto | Inizio Costruzione | Prima Criticità | Primo Parallelo | Ultimo Parallelo | Chiusura Definitiva | Energia Fornita (Twh) | Load Factor (%) |
|------------|------------------|---------------------|--------------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|
| Latina     | GCR U naturale   | 200*                | 1958               | 1962            | 1963            | 1986             | 1990                | 25.49                 | 70.3            |
| Garigliano | BWR U arricchito | 160                 | 1959               | 1963            | 1964            | 1978             | 1982                | 12.25                 | 39.0            |
| Trino V.   | PWR U arricchito | 270                 | 1961               | 1964            | 1965            | 1987             | 1990                | 24.31                 | 45.3            |
| Caorso     | BWR U arricchito | 880                 | 1970               | 1977            | 1978            | 1986             | 1990                | 27.73                 | 36.7            |

\*abbassata a 160 MWe nel 1969

Nei primi anni del nuovo secolo l’ipotesi di rimettere mano alla produzione energetica nucleare riprende corpo, un rilancio auspicato anche dagli USA. Le ultime occasioni per riprendere il percorso e salvare le competenze ancora presenti, tuttavia, si perdono per strada un po’ alla volta a causa di giochi politici, di interessi personali e per via dell’incapacità dei governi di sostenere in modo chiaro il settore. L’incidente nel 2011 alla centrale di Fukushima in Giappone, seppure con conseguenze radiologiche contenute, apre la strada a un nuovo referendum tenutosi nel 2011 che chiude ancora una volta la strada al nucleare italiano.

## Conclusioni

L'energia nucleare, dalla sua scoperta fino alle sue applicazioni più avanzate, ha dimostrato di essere una forza rivoluzionaria sia in ambito scientifico che tecnologico. Questo lavoro ha esplorato i principali sviluppi nella scoperta della fissione nucleare, ha analizzato le applicazioni civili con un focus sulle tecnologie dei reattori nucleari e sui progressi in medicina nucleare, e ha esaminato l'evoluzione del settore elettronucleare in Italia.

Le applicazioni civili dell'energia nucleare, in particolare i reattori nucleari per la produzione di energia e le tecniche di radioterapia, hanno avuto un impatto significativo sulla società moderna. I reattori nucleari hanno permesso di produrre energia elettrica in modo efficiente e con basse emissioni di carbonio, mentre le tecniche di radioterapia hanno rivoluzionato il trattamento del cancro, offrendo nuove speranze a milioni di pazienti.

In Italia, la storia dell'energia nucleare è stata caratterizzata da un iniziale entusiasmo seguito da una serie di battute d'arresto politiche e sociali. Nonostante l'Italia fosse uno dei pionieri nell'utilizzo dell'energia nucleare, i referendum del 1987 e del 2011 hanno portato alla chiusura delle centrali nucleari e all'abbandono di questa tecnologia nel paese. La vicenda italiana dimostra come le decisioni politiche, legate anche a una classe dirigente che non ha una sufficiente cultura scientifica e tecnica, insieme alle preoccupazioni sociali, possano influenzare profondamente il destino di una tecnologia.

In conclusione, mentre il potenziale dell'energia nucleare come fonte energetica e strumento medico è indiscutibile, la sua adozione richiede un equilibrio tra innovazione tecnologica, sicurezza e accettazione sociale. Il futuro dell'energia nucleare in Italia e nel mondo dipenderà dalla capacità di affrontare queste sfide, garantendo al contempo che i benefici di questa potente tecnologia siano sfruttati in modo responsabile e sostenibile.

## Bibliografia

- Flavio Parozzi. (2021). *Gli anni dell'atomo. Storia dell'industria elettronucleare in Italia*. Biblion Edizioni.
- France—Countries & Regions. (s.d.). IEA. Recuperato 7 agosto 2024, da <https://www.iea.org/countries/france>
- Frisch, O. R., & Wheeler, J. A. (1967). The discovery of fission. *Physics Today*, 20(11), 43–52. <https://doi.org/10.1063/1.3034021>
- Giancarlo Nebbia. (2007). *Nucleare: Il frutto proibito*. Saggi Tascabili Bompiani.
- Krivit, S. B., Lehr, J. H., & Kingery, T. B. (2010). *Nuclear energy encyclopedia: Science, technology, and applications*. Wiley.
- Meitner, L., & Frisch, O. R. (1939). Disintegration of Uranium by Neutrons: A New Type of Nuclear Reaction. *Nature*, 143(3615), 239–240. <https://doi.org/10.1038/143239a0>
- Nuclear Power in the World Today—World Nuclear Association*. (s.d.). Recuperato 12 agosto 2024, da <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today>
- Obaldo, J. M., & Hertz, B. E. (2021). The early years of nuclear medicine: A Retelling. *Asia Oceania Journal of Nuclear Medicine and Biology*, 9(2), 207. <https://doi.org/10.22038/aojnmb.2021.55514.1385>
- Peruzzi Giulio. (2001). *Niels Bohr: Dall'alba della fisica atomica alla big science*. Le scienze.
- Segrè, G., & Hoerlin, B. (2017). *Il Papa della fisica: Enrico Fermi e la nascita dell'era atomica*. R. Cortina.
- Sören Möller. (2020). *Accelerator technology: Applications in science, medicine, and industry* (1st ed. 2020.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62308-1>
- The Nobel Prize in Chemistry 1943*. (s.d.). NobelPrize.Org. Recuperato 3 novembre 2024, da <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1943/summary/>
- University of Copenhagen. (2022, maggio 2). *The origin of nuclear medicine*. University of Copenhagen. [https://nbi.ku.dk/english/www/george\\_/de\\_hevesy/del1/](https://nbi.ku.dk/english/www/george_/de_hevesy/del1/)