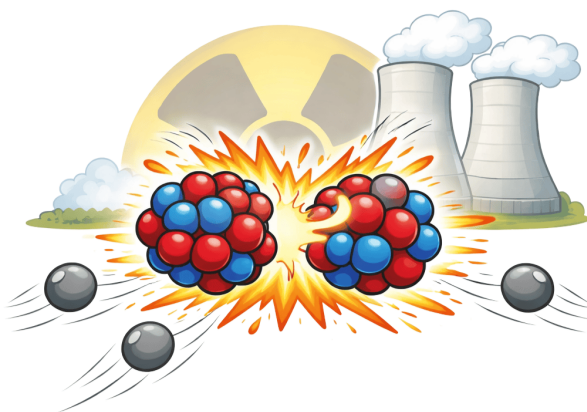
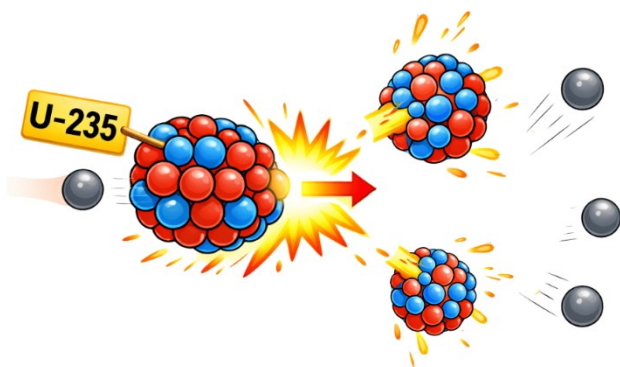


*Come funziona la fissione nucleare e perché viene usata per la produzione di energia elettrica.*



### ◆ 1. Che cos'è la fissione nucleare



La **fissione nucleare**, detta anche **scissione**, è un processo in cui il nucleo di un atomo molto pesante viene spezzato in due nuclei più piccoli. Non si tratta di un semplice urto meccanico, ma di una trasformazione profonda della materia, che libera una **grande quantità di energia**.

Il protagonista principale di questo processo è l'**uranio-235**, una particolare forma dell'uranio (un **isotopo fissile**, ossia con un nucleo facilmente soggetto a fissione). Quando il

nucleo di uranio-235 viene colpito da un **neutrone**, si divide in due nuclei più leggeri, di **massa intermedia** (ad esempio bario e kripton). Durante questa divisione:

- **si libera energia**, soprattutto sotto forma di **calore**;
- vengono emessi **altri neutroni**, che possono colpire nuovi nuclei di uranio.

In questo modo si innesca una **reazione a catena**: ogni fissione può provocarne altre. Se non fosse controllata, la reazione “crescerebbe” rapidamente, con conseguenze pericolose. Per questo motivo la fissione nucleare può essere utilizzata solo in **ambienti progettati appositamente**, come le centrali nucleari, dove il processo viene mantenuto sotto controllo.

## ◆ 2. Perché serve l'uranio "arricchito"

In natura l'uranio è composto **quasi interamente da uranio-238**, mentre l'**uranio-235**, l'isotopo fissile, è presente in quantità molto ridotte.

Per rendere il combustibile adatto all'uso nelle centrali nucleari, l'uranio deve quindi essere **arricchito**, cioè portato a una concentrazione di circa **3–5% di U-235**.

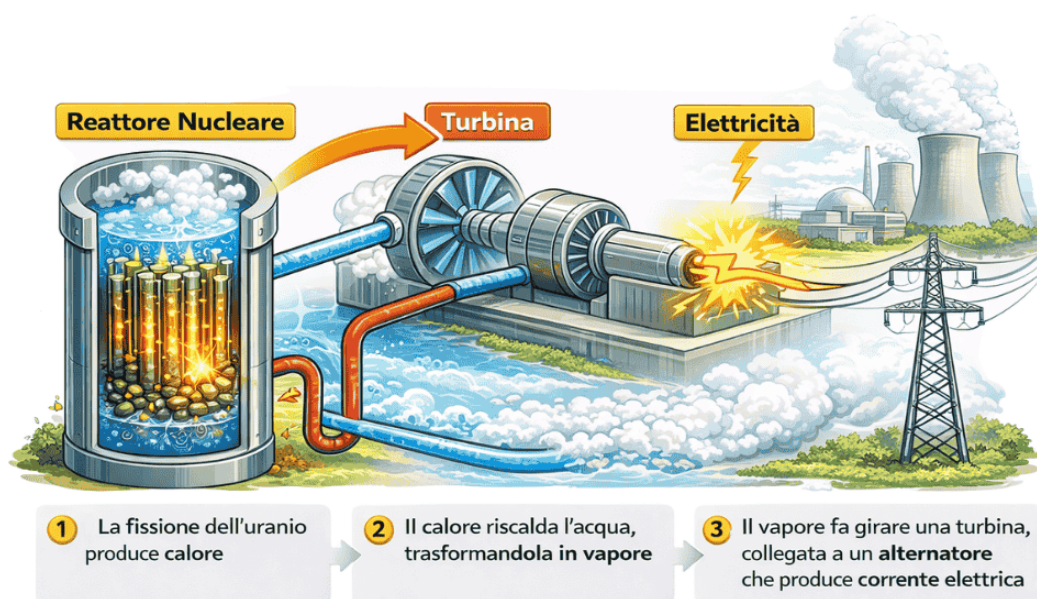


Questa percentuale è sufficiente per sostenere una reazione di fissione controllata e produrre energia elettrica, ma è **molto lontana** da quella necessaria per scopi militari.

L'uranio arricchito viene poi trasformato in **piccole pastiglie**, inserite in tubi metallici che formano le **barre di combustibile** del reattore, all'interno delle quali avvengono le reazioni nucleari.

## ◆ 3. Come funziona una centrale a fissione

Una centrale nucleare a fissione non è così diversa, nel risultato finale, da una centrale termoelettrica tradizionale: in entrambi i casi si produce elettricità a partire dal calore. La differenza sta nella fonte di quel calore.

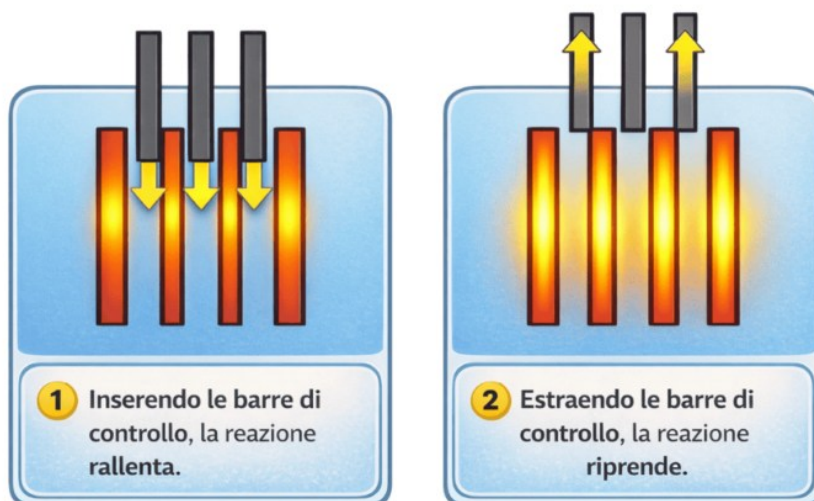


Poiché la fissione avviene grazie ai **neutroni**, che mantengono la reazione a catena, il funzionamento del reattore deve essere attentamente controllato.

Per questo vengono utilizzate le **barre di controllo**, spesso realizzate con materiali come il cadmio, capaci di **assorbire i neutroni**.

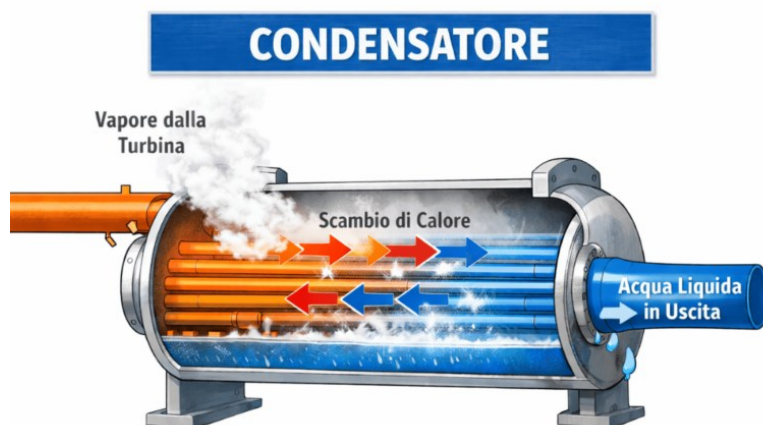
Inserendo le barre di controllo tra le barre di combustibile, una parte dei neutroni viene sottratta alla reazione: in questo modo la fissione **rallenta**.

Estraendole parzialmente, invece, aumenta il numero di neutroni disponibili e la reazione **riprende o si intensifica**. In caso di necessità, l'inserimento completo delle barre permette di **fermare rapidamente** il reattore.



#### ◆ 4. Il sistema di raffreddamento: perché è indispensabile

Il sistema di raffreddamento di una centrale nucleare ha il compito di **asportare il calore prodotto dalla fissione nucleare**, permettendo sia la produzione di energia elettrica sia il mantenimento della sicurezza dell'impianto.



L'acqua che circola nel reattore assorbe il calore prodotto dalla fissione e lo trasferisce al sistema che produce **vapore**, utilizzato per azionare la turbina collegata all'alternatore. Dopo aver fatto girare la turbina, il vapore viene **raffreddato e riportato allo stato liquido**, così da poter essere riutilizzato nel ciclo.

Il raffreddamento è fondamentale anche dal punto di vista della **sicurezza**. Anche quando la reazione di fissione viene fermata, il combustibile continua a produrre **calore residuo**, che deve essere smaltito. Se il raffreddamento viene interrotto, il calore continua ad accumularsi, aumentando i rischi per l'impianto.



Per questo motivo le centrali sono dotate anche di **piscine di raffreddamento**, dove il combustibile esausto viene immerso in acqua per raffreddarsi e per schermare le radiazioni.



Le grandi **torri di raffreddamento**, spesso rappresentate nei cartoni animati (come **The Simpsons**), servono a disperdere nell'ambiente il calore in eccesso. Il "fumo" visibile che esce dalla torre **non è fumo**, ma semplice **vapore acqueo**. Strutture simili sono presenti anche in molte centrali non nucleari e in grandi impianti industriali.

## ◆ 5. I vantaggi della fissione nucleare

L'uso della **fissione nucleare** per produrre energia elettrica presenta alcuni vantaggi importanti, legati soprattutto alla grande quantità di energia che può essere ottenuta da una quantità molto ridotta di combustibile.

In particolare:

- permette di produrre **enormi quantità di energia** utilizzando pochissimo uranio;
- durante la produzione di elettricità **non emette anidride carbonica (CO<sub>2</sub>)**, a differenza delle centrali che bruciano carbone, petrolio o gas;
- garantisce una **produzione continua e programmabile**, indipendente dalla presenza di sole, vento o da altre condizioni atmosferiche.

Per questi motivi, in molti Paesi il nucleare viene ancora utilizzato come **fonte energetica stabile**, capace di fornire energia in modo costante alla rete elettrica.

## ◆ 6. Limiti e problemi ancora aperti

La fissione nucleare, però, non è una soluzione perfetta. Il problema più importante riguarda le **scorie radioattive**: il combustibile usato continua a emettere radiazioni per tempi molto lunghi, anche **migliaia di anni**, e deve quindi essere conservato in depositi sicuri e controllati.



Esistono poi i **rischi legati alla sicurezza**. Sebbene gli incidenti siano rari, eventi gravi come quelli avvenuti a **Chernobyl e Fukushima** hanno mostrato che, se qualcosa va storto, le conseguenze possono essere molto serie e durature, sia per l'ambiente sia per la salute.



Infine, costruire e smantellare una centrale nucleare richiede **tempi molto lunghi e costi elevati**, dovuti alla complessità degli impianti e alle rigorose misure di sicurezza necessarie. A questo si aggiunge il problema dell'**accettazione sociale**: in molti Paesi, tra cui l'Italia, il nucleare è oggetto di forti dibattiti e di scelte politiche controverse.

## ◆ 7. Approfondimenti...

### Isotopi, uranio e combustibile nucleare

Gli isotopi sono atomi dello stesso elemento chimico che hanno lo **stesso numero di protoni**, ma un **numero diverso di neutroni** nel nucleo.



L'uranio è un elemento che in natura è presente soprattutto sotto forma di **uranio-238**, mentre l'**uranio-235** è molto più raro. Entrambi sono isotopi dell'uranio, ma hanno **comportamenti diversi** dal punto di vista nucleare.

- L'**uranio-235** è **fissile**, cioè può spezzarsi se colpito da un neutrone, liberando energia. Per questo viene utilizzato nelle centrali nucleari.
- L'**uranio-238**, invece, non è fissile, ma è detto **fertile**: durante il funzionamento del reattore può catturare neutroni e trasformarsi in **plutonio-239**, un altro isotopo fissile.

Per questo motivo le pastiglie di combustibile nucleare contengono sia uranio-235 sia uranio-238. Mentre l'uranio-235 permette di avviare la reazione di fissione, l'uranio-238 contribuisce indirettamente alla produzione di energia trasformandosi in plutonio.

Esistono anche reattori speciali progettati per sfruttare in modo più efficiente questo processo, ma sono tecnologie complesse e poco diffuse.

----- 0 -----

### Da dove viene l'energia della fissione?

Durante una reazione di fissione nucleare, la somma delle masse dei prodotti finali è leggermente minore della massa iniziale del nucleo di uranio-235.

Questa piccolissima **perdita di massa** non scompare: **si trasforma in energia**.

Questo fenomeno era stato previsto da **Albert Einstein**, che mostrò come massa ed energia siano due forme della stessa realtà, legate dalla famosa relazione:

$$E = m \cdot c^2$$

dove:

- **$E$  = energia,**
- **$m$  = massa,**
- **$c$  = velocità della luce.**

Poiché la velocità della luce ( $c$ ) è enormemente grande (300.000 km/s), anche una quantità di massa quasi impercettibile può trasformarsi in una grande quantità di energia.

In una singola fissione la massa trasformata è minuscola, ma in un reattore nucleare avvengono miliardi di miliardi di fissioni ogni secondo. Per questo motivo, anche **pochi grammi di combustibile** nucleare possono **produrre un'energia paragonabile** a quella ottenuta bruciando **tonnellate di combustibili fossili**.

L'energia liberata si manifesta soprattutto come calore, che nelle centrali nucleari viene utilizzato per produrre vapore e, attraverso turbine e alternatori, energia elettrica.

----- O -----

### Chernobyl e Fukushima: due incidenti diversi

Gli incidenti nucleari più noti, **Chernobyl** (1986) e **Fukushima** (2011), vengono spesso citati insieme, ma hanno avuto cause molto diverse.

- L'incidente di **Chernobyl** fu dovuto principalmente a **gravi errori umani**, a scelte sbagliate durante un test di sicurezza e a **difetti di progettazione del reattore**. La mancanza di adeguate strutture di contenimento rese l'incidente particolarmente grave.
- A **Fukushima**, invece, l'evento scatenante fu un **terremoto** seguito da uno **tsunami** di eccezionale intensità. L'onda anomala danneggiò i **sistemi di raffreddamento** della centrale, impedendo il controllo del calore prodotto dal reattore.

In entrambi i casi, gli incidenti hanno mostrato quanto sia fondamentale progettare centrali con sistemi di sicurezza ridondanti, capaci di affrontare sia errori umani sia eventi naturali estremi.

----- O -----

### I circuiti di una centrale nucleare

Per trasferire il calore prodotto dalla fissione senza diffondere la radioattività, una centrale nucleare utilizza più circuiti separati, ciascuno con una funzione precisa.

- **Circuito primario**

È il circuito che passa all'interno del reattore. L'acqua assorbe il calore prodotto dalla fissione ed è mantenuta ad altissima pressione, così non bolle. Poiché è a contatto diretto con il combustibile, questa acqua è radioattiva e rimane sempre confinata nel circuito.

- **Circuito secondario**

Riceve il calore dal circuito primario tramite uno scambiatore di calore. Qui l'acqua non è radioattiva e può trasformarsi in vapore, che aziona la turbina collegata all'alternatore per la produzione di energia elettrica.

- **Circuito di raffreddamento**

Serve a togliere calore al vapore dopo il passaggio nella turbina, facendolo condensare e tornare acqua liquida nel **condensatore**. Per questo utilizza acqua esterna (di fiume, di mare o raffreddata nelle torri di raffreddamento), che ha il solo compito di smaltire il calore e **non entra mai in contatto con il reattore**.

Oltre ai circuiti, le centrali sono dotate di piscine di raffreddamento, utilizzate per raffreddare e schermare il combustibile esausto.

----- 0 -----

### **Perché le scorie restano pericolose così a lungo: il tempo di dimezzamento**

Quando si dice che le scorie nucleari rimangono radioattive per migliaia di anni, non significa che restino sempre ugualmente pericolose.

Ogni materiale radioattivo è caratterizzato da un **tempo di dimezzamento**, cioè il tempo necessario affinché la sua radioattività si riduca della metà.

Dopo un tempo di dimezzamento la radioattività diminuisce, ma **non scompare**. Con più dimezzamenti si riduce sempre di più: dopo 10 tempi di dimezzamento, ad esempio, resta meno di un millesimo della radioattività iniziale.



- $N / N_0$ : indica quanta radioattività resta rispetto all'inizio.
- $T_{1/2}$ : è il tempo necessario perché la radioattività si dimezzi.

Per scendere sotto 0,1% servono ~10 dimezzamenti.  
Per U-235: ~7 miliardi di anni.

È importante però capire che il tempo di dimezzamento indica **quanto velocemente un isotopo decade**, non quanto "sia pericoloso" in senso assoluto. Un isotopo con un tempo di dimezzamento molto lungo decade molto lentamente e quindi emette meno radiazioni ogni secondo rispetto a uno con vita breve.

Servono comunque molti tempi di dimezzamento perché la radioattività si riduca in modo significativo. Per questo la gestione delle scorie è un problema che si estende su tempi molto più lunghi della durata di una civiltà umana.

Per capire l'ordine di grandezza, basta guardare alcuni isotopi legati al mondo nucleare:

- **l'uranio-235**, usato come combustibile nei reattori, ha un tempo di dimezzamento di circa **700 milioni di anni**;
- **l'uranio-238**, molto più abbondante in natura, ha un tempo di dimezzamento di circa **4,5 miliardi di anni**, paragonabile all'età della Terra;
- **il plutonio-239**, che può formarsi nei reattori, ha un tempo di dimezzamento di circa **24.000 anni**.

Questo non significa che le scorie siano fatte solo di questi elementi, né che restino sempre ugualmente intense per tutto quel tempo, ma mostra quanto alcuni materiali radioattivi possano rimanere presenti nell'ambiente per periodi enormemente lunghi.

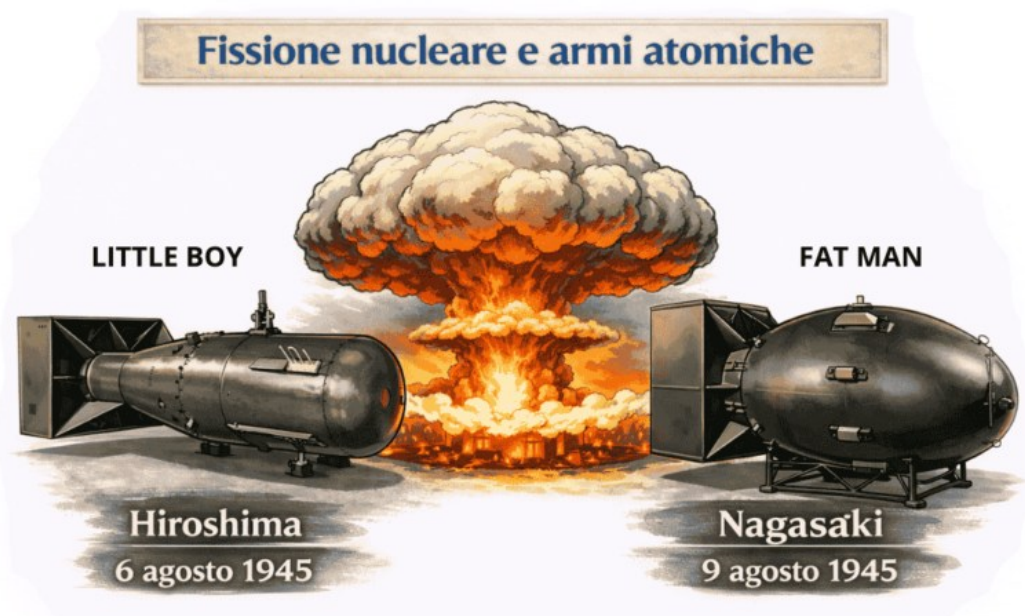
Per questo motivo le scorie devono essere isolate e controllate con grande attenzione, soprattutto nei periodi in cui la loro radioattività è ancora significativa, anche se già inferiore a quella iniziale.

----- 0 -----

### Fissione nucleare e armi atomiche

La fissione nucleare non è stata utilizzata solo per produrre energia elettrica, ma anche per realizzare **armi nucleari**. Durante la **Seconda guerra mondiale**, gli Stati Uniti svilupparono le prime bombe atomiche basate sulla **fissione**.

Nel 1945 vennero sganciate due bombe sul Giappone: **Little Boy**, basata sull'uranio-235, e **Fat Man**, basata sul plutonio-239. In entrambi i casi, la reazione a catena avvenne in modo rapidissimo e incontrollato, liberando in pochi istanti un'enorme quantità di energia.



A differenza delle centrali nucleari, nelle bombe non esistono sistemi di controllo: non ci sono barre di controllo né sistemi di raffreddamento. Anzi, l'obiettivo è proprio evitare qualsiasi rallentamento della reazione, affinché l'energia venga liberata tutta insieme sotto forma di esplosione.

Questo confronto mostra come la stessa conoscenza scientifica possa essere utilizzata in modi molto diversi. La fisica nucleare, di per sé, non è né “buona” né “cattiva”: sono le scelte umane a determinarne l’uso.

----- O -----

### Lise Meitner: la fissione, il Nobel mancato e una scelta morale

**Lise Meitner** è stata una fisica austriaca di origine ebraica, tra le figure fondamentali nella scoperta della **fissione nucleare**. Per molti anni lavorò a Berlino con il chimico **Otto Hahn**, contribuendo in modo decisivo allo studio dei nuclei atomici.

Nel 1938, a causa delle **persecuzioni razziali del regime nazista**, Meitner fu costretta a fuggire dalla Germania e a rifugiarsi in Svezia. Nonostante l’esilio, continuò a interpretare i risultati sperimentali ottenuti da Hahn e dai suoi collaboratori. Proprio durante una passeggiata nei boschi svedesi, discutendo con il nipote **Otto Frisch**, comprese che il nucleo di uranio poteva **spezzarsi in due nuclei più leggeri**, liberando una grande quantità di energia. Applicando la relazione di Einstein  $E = mc^2$ , calcolò per la prima volta l’energia liberata da una fissione nucleare.



Nonostante questo contributo teorico fondamentale, **Lise Meitner non ricevette il premio Nobel**. Nel 1944 il Nobel per la scoperta della fissione fu assegnato **solo a Otto Hahn**, escludendo Meitner. Oggi molti storici della scienza ritengono che questa esclusione sia stata dovuta a una combinazione di fattori: il suo essere donna, il suo essere ebrea, l’esilio forzato e la separazione artificiale tra lavoro sperimentale e interpretazione teorica.

Durante la Seconda guerra mondiale, Lise Meitner si **rifiutò** di partecipare alla realizzazione della bomba atomica e non prese parte al **Manhattan Project**. Pur avendo contribuito in modo decisivo alla comprensione della fissione nucleare, scelse consapevolmente di non applicare le sue conoscenze a scopi bellici. Tant’è che **visse con grande dolore le conseguenze militari di quella scoperta**, soprattutto dopo le esplosioni di Hiroshima e Nagasaki.

La storia di Lise Meitner mostra in modo chiaro che la scienza non è solo una questione di formule e scoperte, ma anche di **riconoscimento, responsabilità e scelte personali**. Il suo esempio aiuta a capire che conoscere una legge fisica non significa essere obbligati a usarla in qualsiasi modo.