

# Centrali Nucleari

[www.fisicaxscuola.altervista.org](http://www.fisicaxscuola.altervista.org)

# Centrali Nucleari

---

- Fissione Nucleare
- Fusione Nucleare
- Centrali Nucleari
- Scorie Radioattive

# Fissione Nucleare

*Un po' di storia*

---

- 1921: Ernest Rutherford e William Harkins ipotizzano l'esistenza del neutrone.
- 1931: Frederic e Irene Joliot-Curie effettuano esperimenti che evidenziano l'esistenza di una radiazione misteriosa che provoca l'espulsione di protoni di alta energia.
- 1932: James Chadwick, partendo dagli esperimenti dei Joliot-Curie e ricordando l'ipotesi di Rutherford, **dimostra sperimentalmente l'esistenza del neutrone.**
- 1934: Enrico Fermi e il gruppo di via Panisperna scoprono i "neutroni lenti" (neutroni termici) e comprendono che questo tipo di neutrone può risultare un utile proiettile per bombardare il nucleo atomico.
- 1938: Otto Hahn e Fritz Strassman dimostrano sperimentalmente che un nucleo di uranio-235, qualora assorba un neutrone, può dividersi in due o più frammenti dando luogo così alla **fissione del nucleo.**
- 1938: Lise Meitner e Otto Frisch, partendo dagli studi di Fermi, Hahn e Strassman, realizzano che con i neutroni termici si possono **bombardare atomi pesanti, fissionarli (separarli) e produrre energia.**



**Nasce la Fissione Nucleare**

# Neutroni Termici

---

Neutroni Termici: neutroni che sono in equilibrio con la materia circostante a temperatura ambiente e hanno energia pari a  $kT$ , dove  $k$  è la costante di Boltzmann e  $T$  la temperatura assoluta dell'ambiente.

## Energia dei Neutroni Termici

$$\begin{cases} k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \\ T \cong 300\text{K} \end{cases} \Rightarrow E = k \cdot T = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \cdot 300\text{K} = 4.14 \cdot 10^{-21} \text{ J}$$

$$1\text{eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \Rightarrow E = \frac{4.14 \cdot 10^{-21} \text{ J}}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} = 0.026 \text{ eV} \cong 0.03 \text{ eV}$$

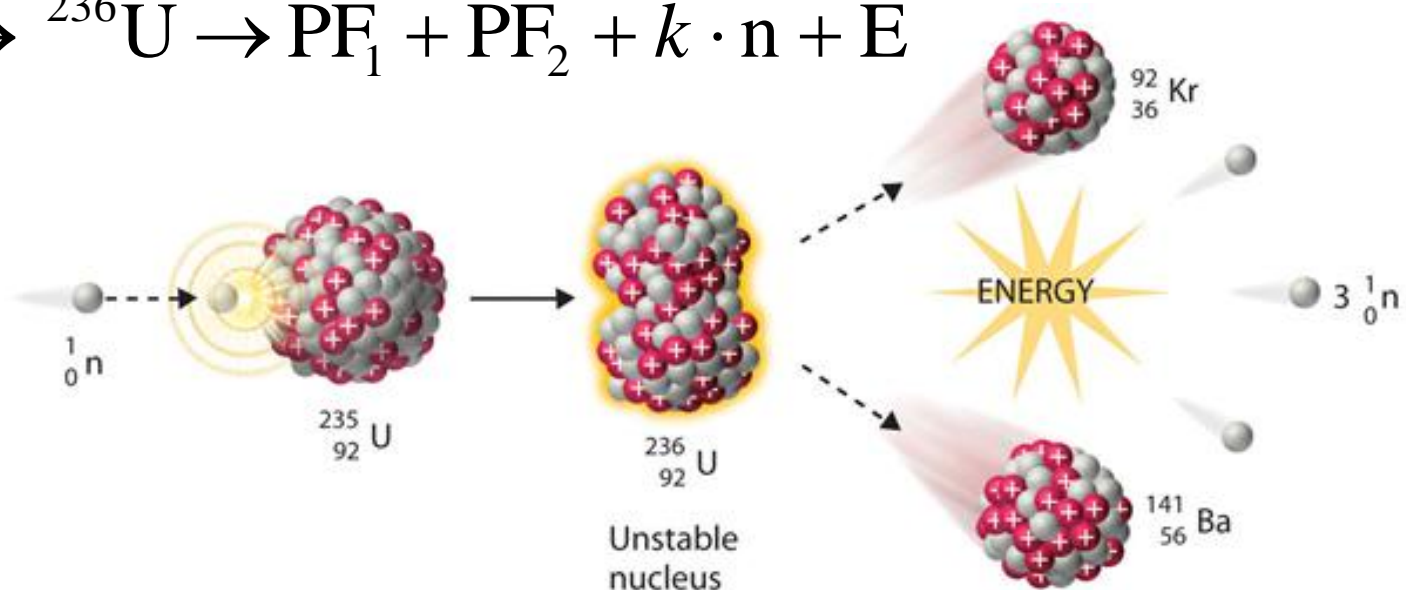
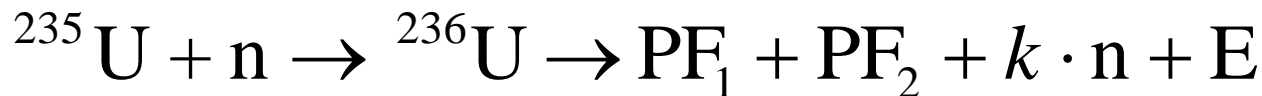
Quindi i neutroni termici sono dotati di poca energia e sono quindi in lento movimento (neutroni lenti).

I neutroni termici sono proiettili più efficaci. Il neutrone, infatti, deve avere tempo per farsi catturare dal nucleo atomico, e lo distrugge non tanto per l'energia cinetica che possiede quanto per il fatto che destabilizza la struttura interna del nucleo.

# Fissione Nucleare

Nel processo di **fissione nucleare**, il nucleo di un elemento chimico pesante (ad esempio uranio-235 o plutonio-239) decade in frammenti di minori dimensioni, ovvero in nuclei di atomi a numero atomico inferiore, con emissione di una grande quantità di energia e radioattività.

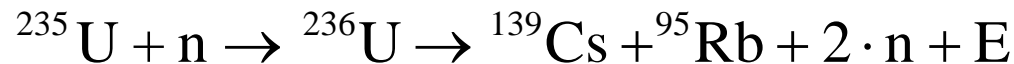
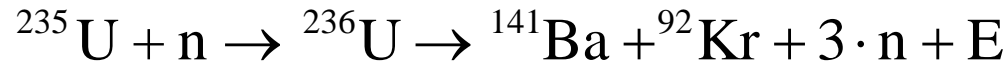
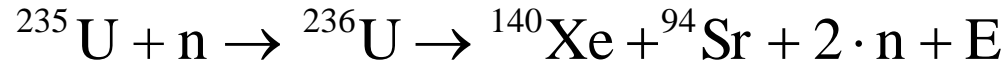
Ne è un esempio il **nucleo** di  $^{235}\text{U}$  che, bombardato da un neutrone termico, subisce il processo di fissione separandosi in due frammenti, detti **prodotti di fissione** (indicati con  $\text{PF}_1$  e  $\text{PF}_2$ ) e liberando **neutroni** (in media 2,5 neutroni per ogni reazione di fissione) e **energia**:



# Fissione Nucleare

---

I prodotti di fissione non sono univocamente determinati, ma variano in maniera casuale con una percentuale di produzione costante. Ad esempio:

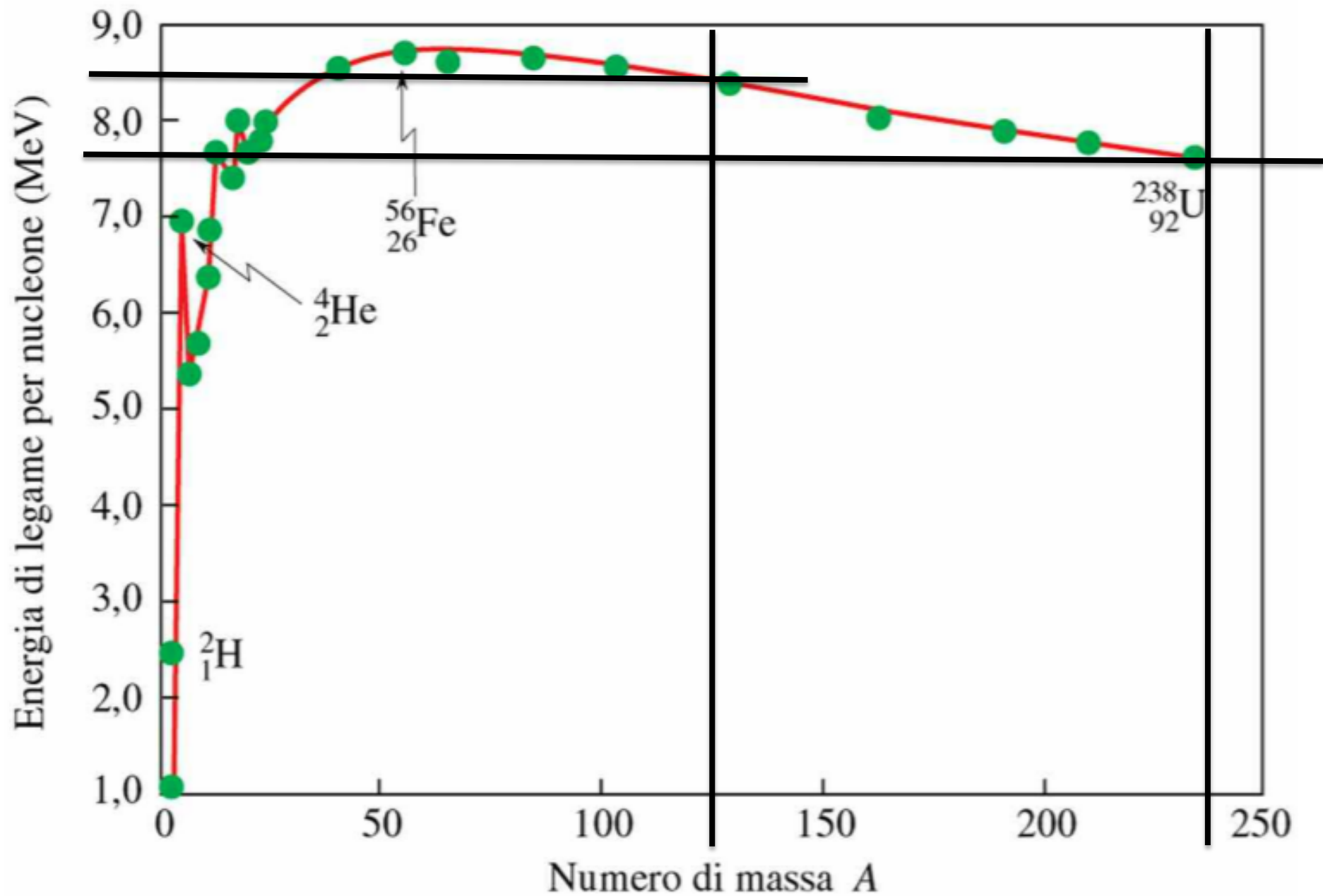


L'energia rilasciata durante il processo di fissione è la differenza tra l'energia di legame complessiva finale e quella iniziale:

$$E = E_f - E_i = 2N_f E_{n,f} - N_i E_{n,i}$$

Può essere calcolata approssimativamente ricavando dal grafico che riporta l'energia di legame per nucleone in funzione del numero di massa i valori di energia per atomi pesanti ( $A=240 \Rightarrow E= 7,6 \text{ MeV/nucleone}$ ) e per atomi medi ( $A=120 \Rightarrow E= 8,5 \text{ MeV/nucleone}$ ):

$$E = E_f - E_i = (2 \cdot 120 \cdot 8.5 - 1 \cdot 240 \cdot 7.6) \text{ MeV} \cong 200 \text{ MeV}$$



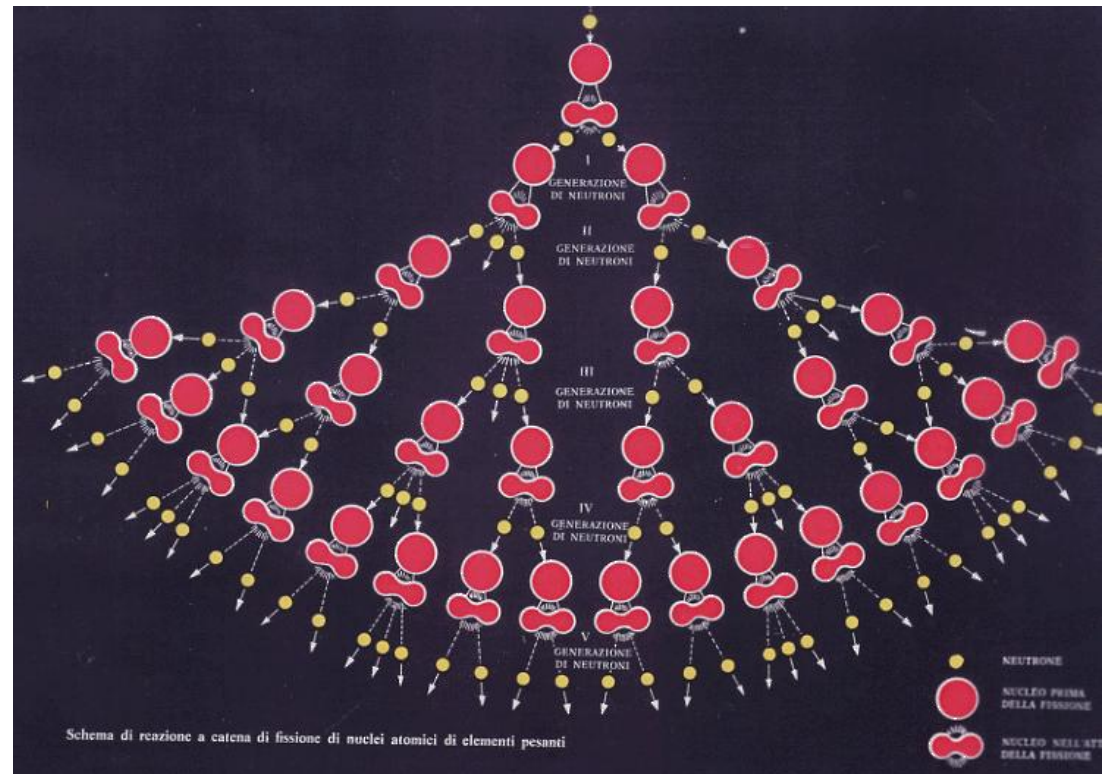
# Fissione Nucleare

Sin dall'inizio dello studio della fissione nucleare ci si è resi conto della possibilità di ottenere grandi quantità di energia.

In particolare, poiché una volta innescata la prima fissione vengono generati altri neutroni che a loro volta possono innescare ulteriori fissioni, si crea un processo detto **REAZIONE A CATENA**.

Questo processo può provocare il rilascio di enormi quantità di energia in brevissimo tempo ed è quello che accade con le bombe nucleari.

Se si riesce a controllare il fenomeno si può ottenere una **Reazione Controllata** che è alla base delle centrali nucleari.



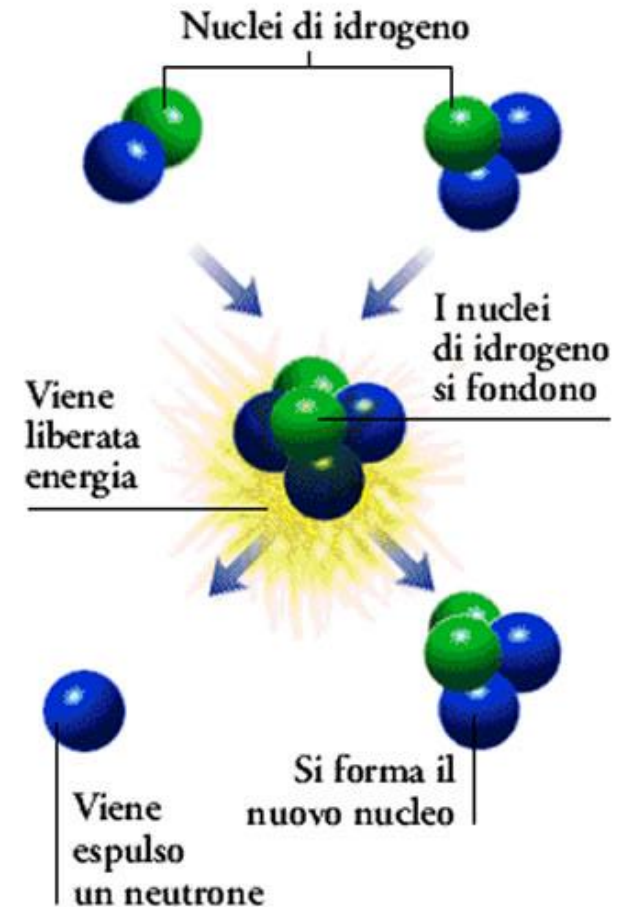
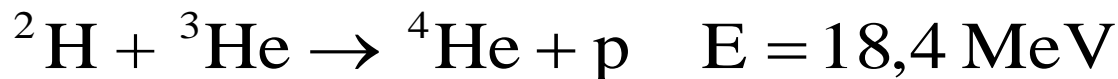
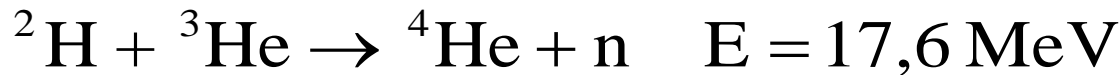
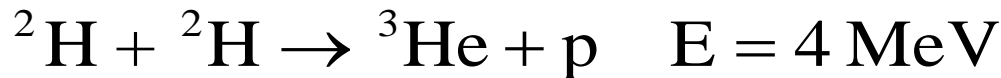
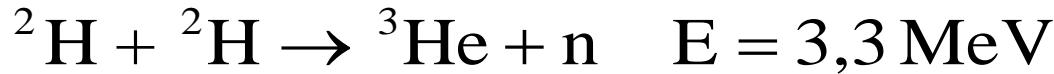
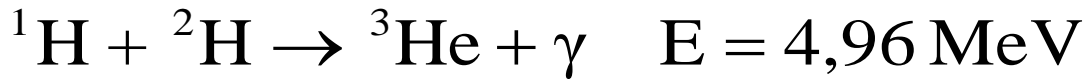


# Fusione Nucleare

Nel processo di **fusione nucleare**, i nuclei di due elementi chimici leggeri (ad esempio idrogeno, deuterio, trizio, litio, elio) si fondono.

Quando il nucleo prodotto ha numero di massa sufficientemente basso, la reazione è accompagnata da liberazione di energia.

Esempi di processi di fusione nucleare sono:



# Fusione Nucleare

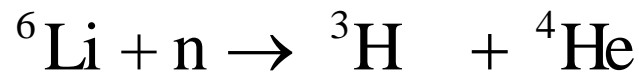
---

Facendo sempre riferimento alla curva rappresentativa dell'energia di legame per nucleone in funzione del numero di massa, si può osservare che il processo di fusione è conveniente solo se coinvolge nuclei molto leggeri (la curva sale molto rapidamente).

La reazione che si cerca di utilizzare per la produzione di energia è quella che coinvolge **deuterio e trizio**, con produzione di **elio e neutroni**, in quanto è una di quelle che prevedono una minore energia di attivazione.



Il deuterio è un isotopo naturale dell'idrogeno e può essere estratto direttamente dall'acqua; il trizio, invece, può essere ottenuto dal litio, un elemento relativamente abbondante in natura, tramite la reazione nucleare:



dove i neutroni provengono dalla reazione di fusione.

# Fusione Nucleare

---

Il grande vantaggio del processo di fusione è l'assenza di prodotti radioattivi, per tale motivo si parla di **reazione nucleare pulita**.

Il grosso svantaggio della fusione nucleare è l'enorme temperatura alla quale si devono trovare i nuclei perché la fusione possa verificarsi. Infatti, affinché i due nuclei possano arrivare a una distanza tale da poter fondere, è necessario vincere la forza di repulsione (di natura coulombiana) che si instaura tra i due nuclei stessi, in quanto dotati entrambi di carica positiva. Ne consegue che gli stessi devono avere una notevole quantità di energia, in genere dell'ordine di qualche decina di keV. Tale energia può essere raggiunta solamente se i due nuclei si trovano a una temperatura molto elevata, **dell'ordine di milioni di kelvin**.

Il problema quindi è, da un lato, quello di realizzare un contenitore che possa resistere a temperature così elevate, dall'altro come poter cedere ai nuclei così tanta energia da permettere loro di raggiungere le temperature necessarie e quindi fondere.

Si cerca di risolvere entrambi i problemi utilizzando campi magnetici a forma toroidale, cioè a forma di ciambella; tramite tale geometria, poiché i nuclei sono carichi elettricamente, è possibile ottenere il **confinamento magnetico**.

Tra i reattori per la fusione nucleare si annoverano: Tokamak (Russia), Joint European Torus (JET), International Tokamak Experimental Reactor (ITER).

# Centrali Nucleari

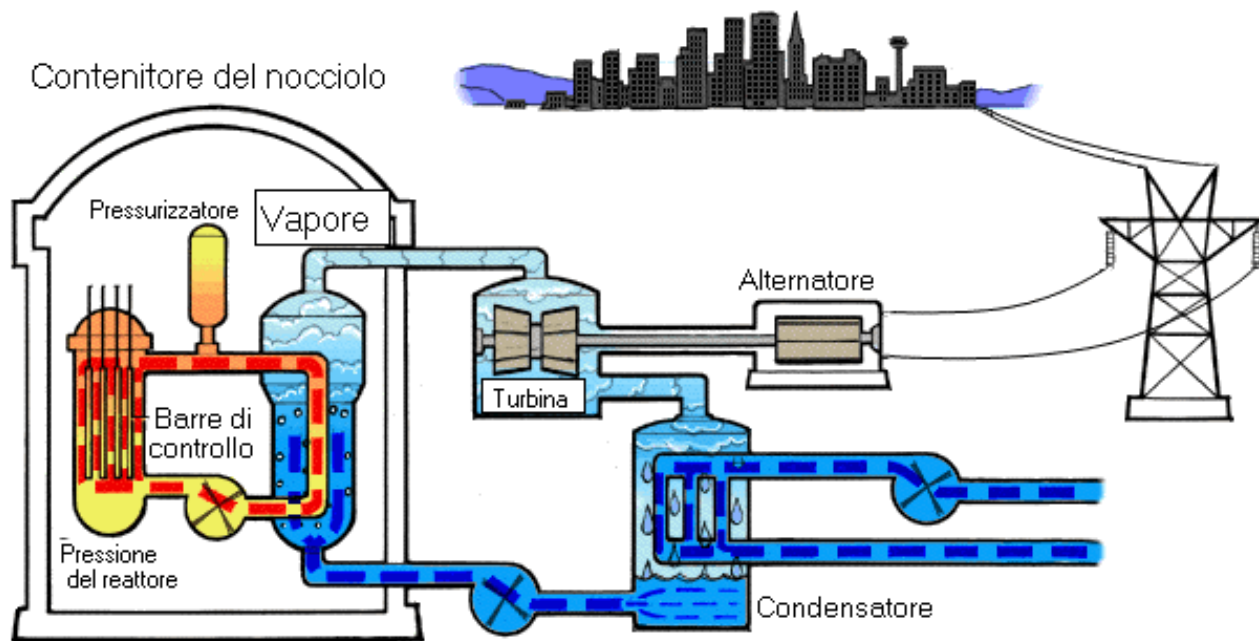
Una **centrale nucleare** è un particolare tipo di **centrale termica** nella quale il calore prodotto tramite **uno o più reattori nucleari** viene utilizzato per generare vapore e alimentare delle turbine che, a loro volta, sono connesse ad alternatori per la produzione di energia elettrica.

**NUCLEARE** → **TERMICA** → **MECCANICA** → **ELETTRICA**

Quindi una centrale nucleare differisce dalle altre centrali termiche solo per il generatore di calore, che in questo caso si basa sul processo di fissione nucleare.

Schema di funzionamento di una centrale nucleare a fissione di tipo PWR.

Il calore sviluppato dalla reazione di fissione all'interno del reattore viene trasferito tramite un fluido refrigerante a un flusso di acqua che genera vapore saturo. Il vapore alimenta una turbina che tramite un generatore produce la corrente che alimenterà la rete elettrica.



# Centrali Nucleari

## Parti Componenti

---

**Combustibile**: è costituito dal materiale fissile utilizzato; in generale si tratta di uranio con percentuali di arricchimento di  $^{235}\text{U}$  variabili tra l'1% e il 4%.

**Moderatore**: sostanza che ha lo scopo di termalizzare i neutroni, cioè di ridurre la loro energia da oltre 1 MeV con la quale vengono prodotti, fino all'energia cosiddetta termica, inferiore a 0,1 eV. Il procedimento fu messo a punto da Enrico Fermi, il quale comprese che per ridurre l'energia dei neutroni era necessario farli passare attraverso un materiale composto di atomi leggeri, in modo che, nell'urto con una massa simile, i neutroni perdessero buona parte della loro energia. Come moderatore viene generalmente usata **acqua**, **acqua pesante** (nella quale l'idrogeno è sostituito dal suo isotopo stabile deuterio) o **grafite**.

**Barre di controllo**: sono costituite da materiali, come il cadmio o il boro, che assorbono i neutroni, regolando la reazione a catena. Regolando la posizione delle barre di controllo è possibile fare in modo che la reazione proceda alla velocità desiderata, determinando il ritmo con cui si libera l'energia, cioè la potenza sviluppata dal reattore.

**Fluido diatermico**: liquido, in genere acqua, che serve a prelevare il calore prodotto dalla fissione nucleare.

Si classificano in base a:

- ❑ **Tipo di Neutroni** usati per produrre la reazione di fissione
  - Lenti (termici)
  - Veloci
- ❑ **Moderatore**
  - Reattori a Grafite - Magnox, AGR HTGR RBMK
  - LWR (Light Water Reactor) - PWR, BWR, VVER
  - HWR (Heavy Water Reactor Water Reactor) - CANDU, PHWR
- ❑ **Liquido refrigerante**
  - Reattori Raffreddati a Gas
  - Reattori Raffreddati ad Acqua (leggera/pesante)

# Centrali Nucleari

## Regimi di funzionamento

---

Per poter produrre energia elettrica a ritmo costante è necessario che solo un neutrone, prodotto dalla fissione nucleare, inneschi la reazione successiva.

**Fattore di moltiplicazione:** rapporto tra il numero di neutroni prodotti in un processo e quelli prodotti dal processo precedente

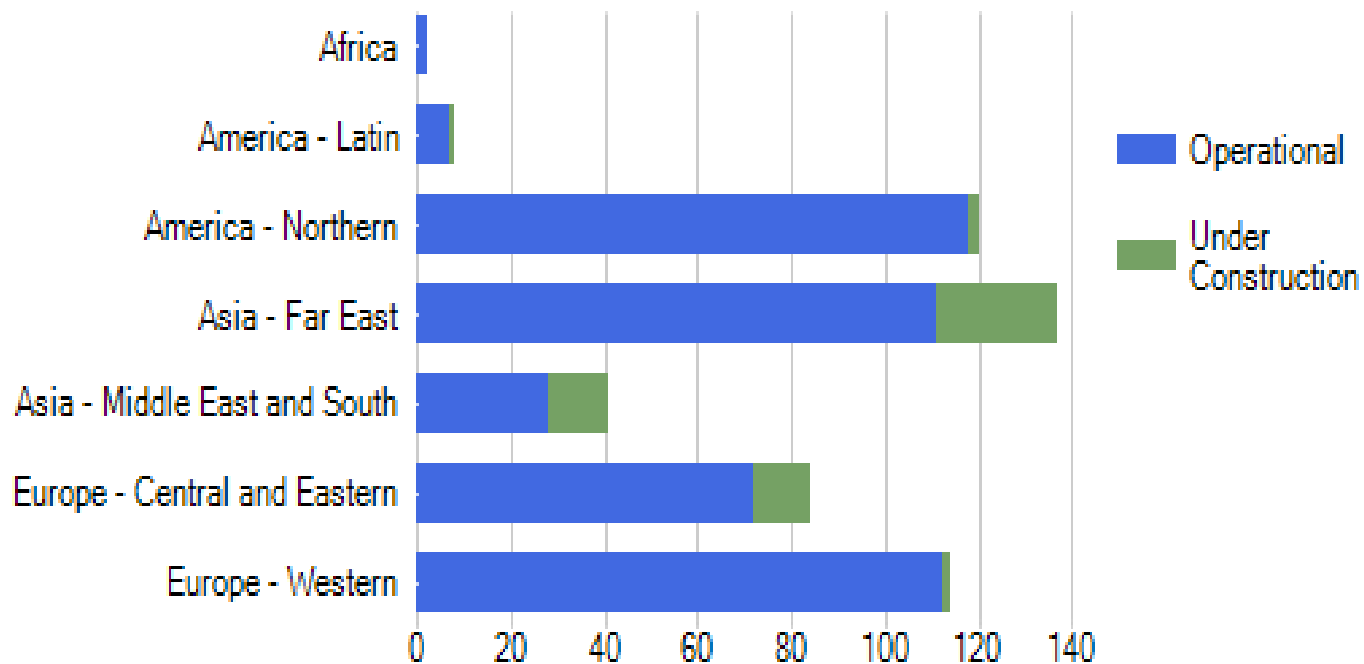
$$k = \frac{N_{F+1}}{N_F}$$

In base al valore di  $k$  si possono avere i seguenti regimi:

- $k = 1$  Regime Critico** (condizione di funzionamento ottimale);
- $k > 1$  Regime Supercritico** (il reattore aumenta la produzione di energia, e quindi cresce la potenza sviluppata);
- $k < 1$  Regime Subcritico** (la potenza prodotta diminuisce).

Il passaggio tra i diversi regimi si ottiene agendo sulle barre di controllo.

# Distribuzione delle Centrali



Lo sfruttamento dell'energia nucleare in Italia ha avuto luogo tra il 1963 e il 1990. Le quattro centrali nucleari italiane sono state chiuse per raggiunti limiti d'età, o a seguito dei referendum del 1987. Il dibattito sull'eventuale reintroduzione dell'energia nucleare, che si era aperto fra il 2005 ed il 2008, si è chiuso con il referendum abrogativo del 2011, con cui sono state abrogate alcune disposizioni concepite per agevolare l'insediamento delle centrali nucleari.

Dal 1999 tutti i siti di queste centrali sono in fase di smantellamento e programmati per essere rilasciati all'ambiente senza alcun vincolo radiologico entro il 2025.



# Scorie Radioattive

## *Definizione*

Secondo la IAEA (International Atomic Energy Agency) si definiscono **scorie radioattive** ogni materiale che contiene, o è contaminato da, radionuclidi a concentrazione, o livelli di radioattività, superiori a certi limiti definiti dall'Agenzia stessa per ogni radionuclide. (Rientrano quindi tra i rifiuti di un reattore nucleare anche, ad esempio, gli indumenti usa e getta utilizzati dal personale.)

**In particolare rientrano tra le scorie radioattive gli scarti di combustibile nucleare esausto derivante dalla fissione nucleare nel nocciolo o nucleo del reattore nucleare a fissione.**

Tra gli scarti di combustibile nucleare esausto rientrano:

- ❑ prodotti di fissione generati da uranio-235 (come Rn, Kr, Ba, Sr...);
- ❑ plutonio-239 ( $\tau \approx 24000$ anni) e plutonio-240 ( $\tau \approx 6500$ anni) , generati dall'uranio-238;
- ❑ uranio-235 e uranio-238 residui.

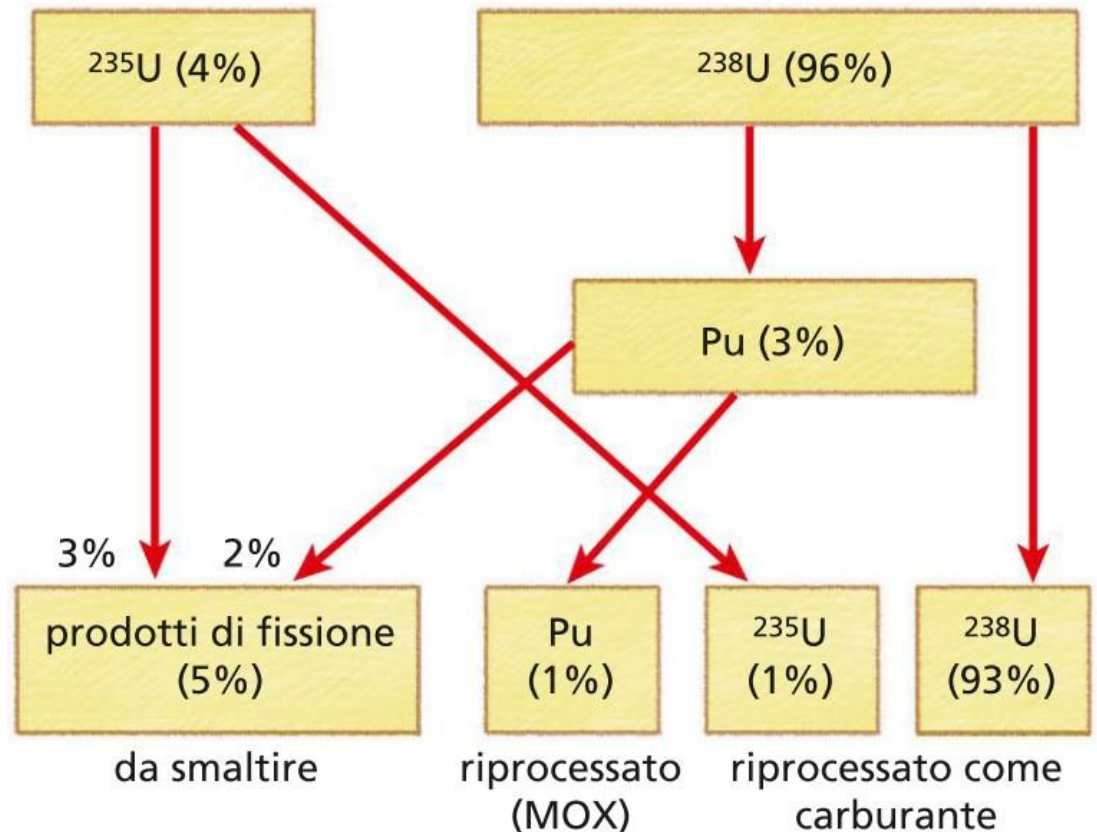
Tali sostanze, essendo radioattive, decadono con tempi di dimezzamento variabili e, attraverso catene di decadimento, si trasformano in altri elementi anche'essi radioattivi che a loro volta decadono emettendo radiazioni ionizzanti ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) nocive.

# Scorie Radioattive

## Riprocessamento e Smaltimento

Il carburante esausto può essere processato e, almeno in parte, "riciclato". La parte che non può subire ulteriori modificazioni dovrà essere smaltita.

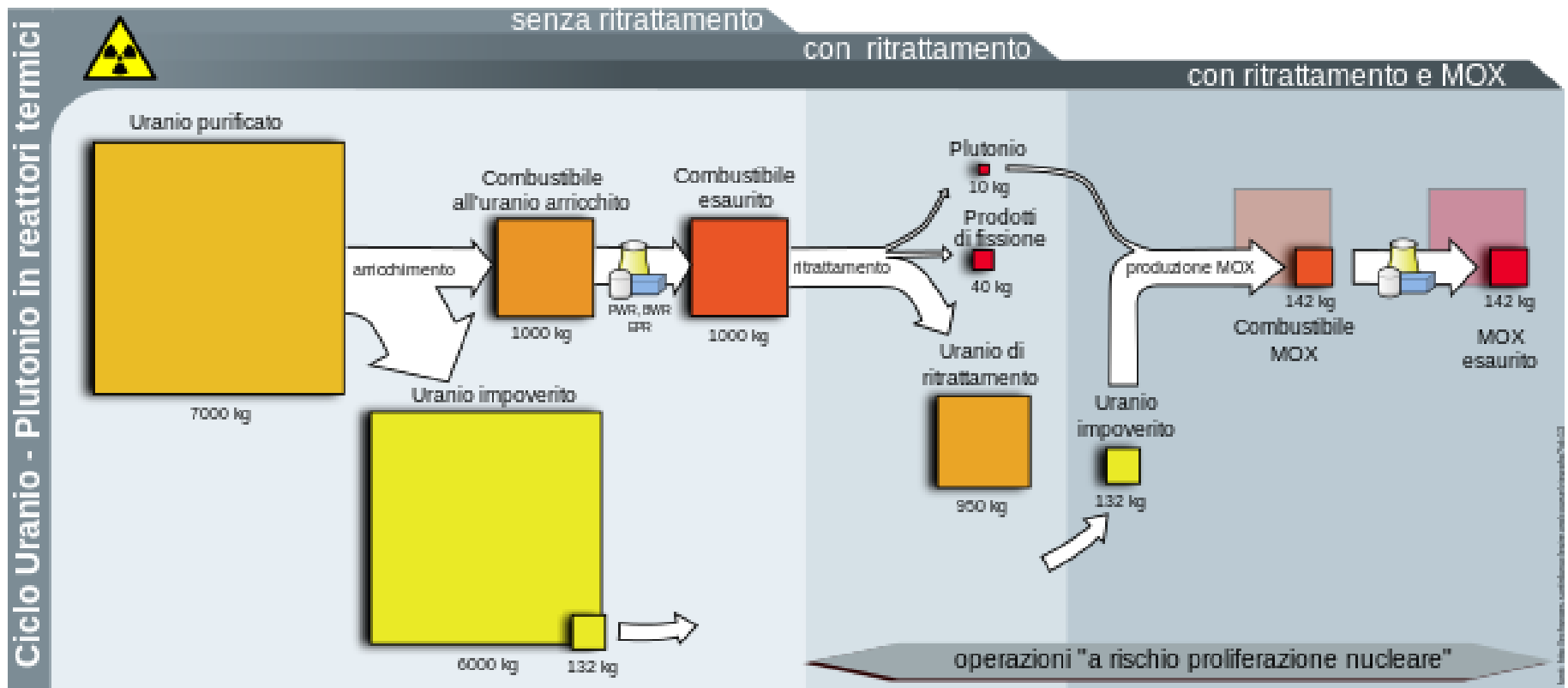
Uranio e Plutonio sono trasformati nei rispettivi ossidi, quindi mescolati assieme a formare un nuovo carburante, detto **MOX** (7% di plutonio mescolato a uranio impoverito, che è equivalente a un combustibile con uranio arricchito al 4,5%)



# Scorie Radioattive

## Riprocessamento e Smaltimento

In generale è possibile riprocessare il 96% circa del carburante esausto; il restante 4% circa è costituito dal 3% circa di scorie radioattive e l'1% circa di plutonio-239, che non può essere riprocessato.



# Scorie Radioattive

## *Riprocessamento e Smaltimento*

Le scorie non più processabili e inutilizzabili per il reattore, vengono inizialmente mantenute in vasche interne alla struttura del reattore (in maniera da eliminare i prodotti di reazione a tempo di dimezzamento più breve), quindi sottoposte a trattamenti (in genere di vetrificazione e seguente percolazione all'interno di contenitori cilindrici di acciaio).

Queste scorie dovranno essere smaltite ma, al momento, oltre allo stoccaggio delle stesse in appositi contenitori depositati anche per migliaia di anni in depositi geologici o ingegneristici, non è possibile fare molto.

Una soluzione alternativa consiste nel sottoporre gli elementi residui a vita lunga a processi di trasmutazione nucleare, sfruttando le particelle prodotte dagli acceleratori o direttamente con neutroni su appositi reattori, per trasformarli in isotopi stabili o comunque a vita breve.



# Scorie Radioattive

## *Riprocessamento e Smaltimento*

---

Un impianto da 1 GW produce annualmente circa 3 m<sup>3</sup> di scorie radioattive vetrificate e considerando che esistono 450 centrali nucleari nel mondo (+ 56 in costruzione)...

Inoltre lo smantellamento delle centrali nucleari è un processo lungo e molto costoso; le stime correnti fatte dalla "Nuclear Decommissioning Authority" del Regno Unito sono che costerà almeno **70 miliardi di dollari** smantellare i siti nucleari dismessi esistenti nella Gran Bretagna; questo calcolo non considera qualsiasi incidente o cambiamento delle normative che possa avvenire in futuro. Inoltre, a causa della radioattività latente nei "core" dei reattori, lo smantellamento totale del reattore diventa un processo lento che deve eseguirsi in varie fasi (spesso intervallate da decenni): i piani correnti della Nuclear Decommissioning Authority per lo smantellamento totale prevedono un arco di tempo dai **50 ad oltre 330 anni**, con esclusione di siti incidentati per cui ogni previsione è difficile se non impossibile

Esempi di processi di smantellamento e di stoccaggio complessi sono:  
Smantellamento centrale di Lubmin (ancora in corso dal

# Bibliografia & Sitografia

---

- Mirri L- Parente M., Fisica ambientale - Energie alternative e rinnovabili, Zanichelli
- <http://w3.lnf.infn.it/breve-etimologia-della-fisica-delle-particelle/>
- <http://scienzapertutti.lnf.infn.it/2-la-scoperta-del-neutrone>
- [https://it.wikipedia.org/wiki/Fissione\\_nucleare](https://it.wikipedia.org/wiki/Fissione_nucleare)
- <http://www.fisicamente.net/DIDATTICA/index-437.htm>
- <https://www.terna.it/it-it/sistemaelettrico/statisticheeprevisionsi/datistatistici.aspx>
- <https://www.iaea.org/PRIS/home.aspx>
- [https://it.wikipedia.org/wiki/Centrale\\_elettronucleare](https://it.wikipedia.org/wiki/Centrale_elettronucleare)
- [https://it.wikipedia.org/wiki/Energia\\_nucleare\\_in\\_Italia](https://it.wikipedia.org/wiki/Energia_nucleare_in_Italia)
- <http://www2.pv.infn.it/~altieri/webmail/DISPENSA-05-06/reattori-II-III-IV.pdf>
- Stoccaggio: il problema della miniera di sale di Asse
- <https://www.greenme.it/informarsi/ambiente/20314-scorie-nucleari-miniera-asse-germania>
- [http://www.nationalgeographic.it/ambiente/notizie/2010/07/11/foto/leaking\\_nuclear\\_waste\\_fills\\_former\\_salt\\_mine-67146/1/](http://www.nationalgeographic.it/ambiente/notizie/2010/07/11/foto/leaking_nuclear_waste_fills_former_salt_mine-67146/1/)
- <https://youtu.be/JTEdJX6rlrs>
- Smantellamento centrale di Lubmin: <https://www.focus.it/scienza/energia/ultima-parte-radioattiva-rimossa-dal-lubmin-power-plant-28022013>
- Ragni con mutazioni genetiche
- <https://youtu.be/TG-nwQBBfmc>
- <https://youtu.be/YT5xqdSlw2U> (ragno normale)

# Crediti Immagini

---

- Mirri L- Parente M., Fisica ambientale - Energie alternative e rinnovabili, Zanichelli
- <https://steemkr.com/kr-science/@chosungyun/7>
- <http://www.fisicamente.net/DIDATTICA/nucleo18.gif>
- <http://www.rosarioberardi.it/sitoberardi/centralielettricheneu/IMMAGINI/fusione.jpg>
- By DaniDF1995 - Own work, Public Domain,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5953003>