

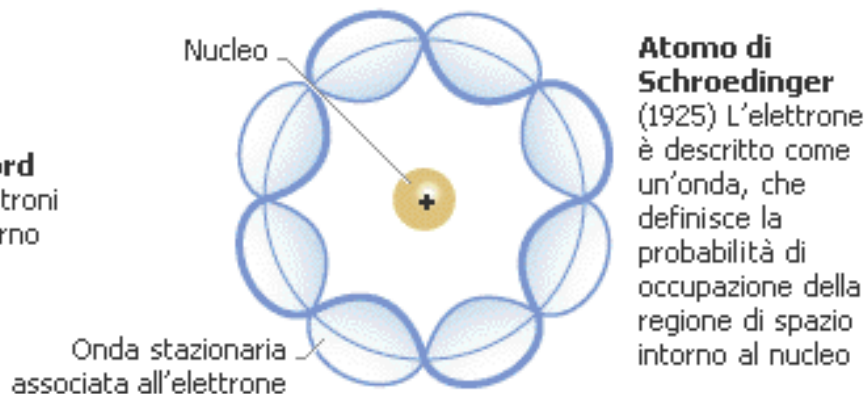
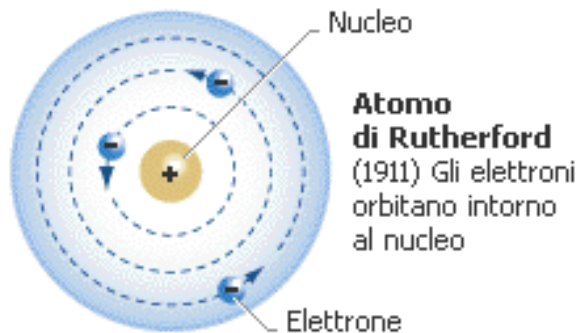
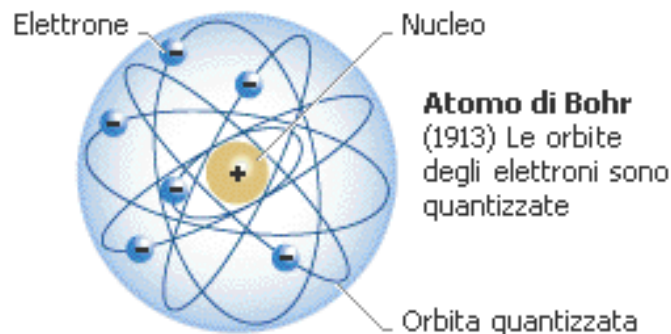
Applicazioni della Fisica Nucleare: la produzione di energia

Associazione
**UNIVERSITA'
DEL TEMPO LIBERO
DI CARAVAGGIO** *aps*

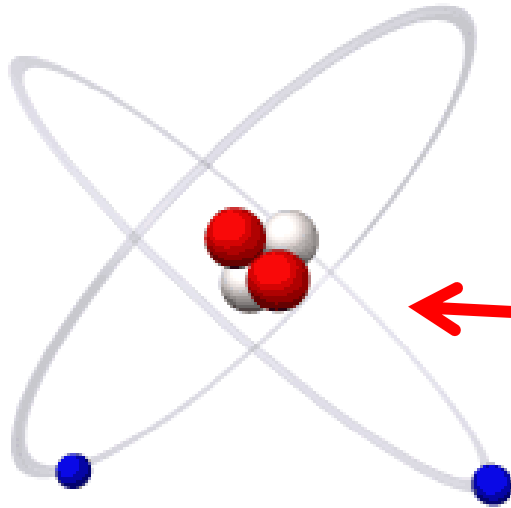


G. Battistoni
INFN Milano

L'evoluzione della comprensione dell'atomo



Cosa tiene legati insieme elettroni e nucleo



Elettroni: particelle leggere con carica elettrica negativa, nella parte esterna

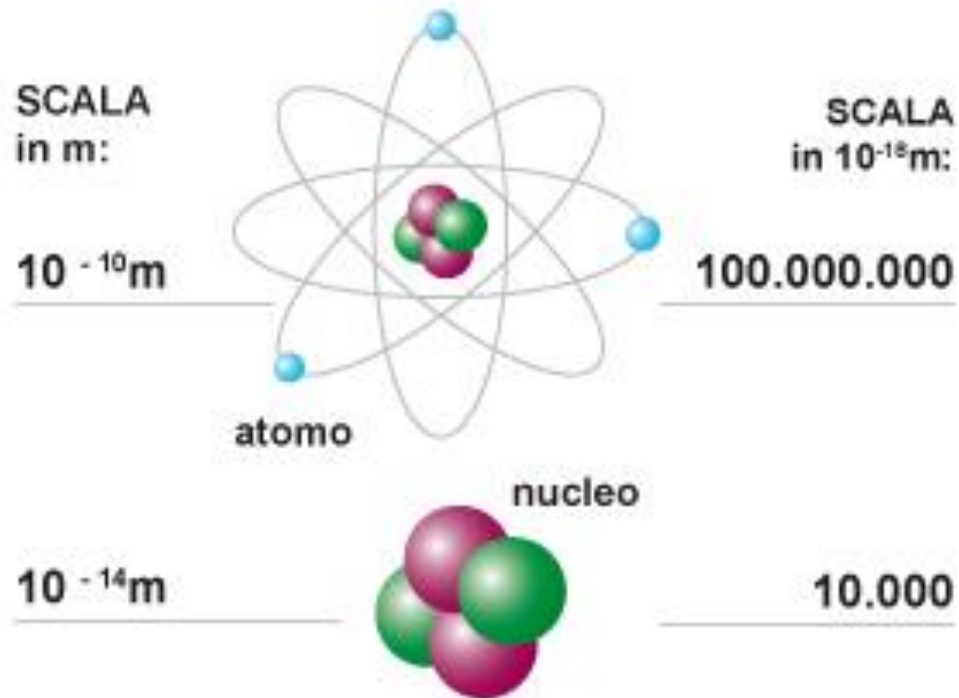
Nucleo: particelle pesanti con carica elettrica positiva (**protoni**) e particelle pesanti neutre (**neutroni**) nella parte centrale

1932

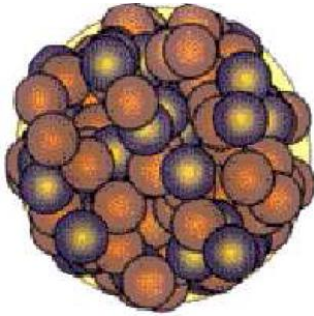
elettroni e **nucleo** sono legati fra loro dalla “**Forza ElettroMagnetica**”

Questa **Forza ElettroMagnetica** è ciò che in ultima analisi determina la **chimica** e svariate forme di energia “convenzionale” di cui facciamo uso

Le dimensioni del nucleo rispetto all'atomo



Il Nucleo Atomico e cosa lo tiene insieme



Protoni e Neutroni sono tenuti insieme nel nucleo in modo da formare una regione quasi sferica, grazie ad un altro tipo di “interazione” (=forza): **la Forza Nucleare**

Oggi la chiamiamo “**Forza Nucleare Forte(*)**”
o “**Interazione Adronica**”

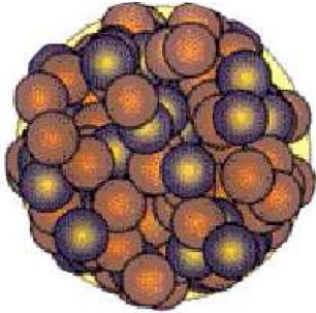
Forza a raggio d’azione cortissimo! $\sim 10^{-15}$ m, mentre la forza elettromagnetica ha virtualmente un raggio d’azione infinito

ma: **Intensità della Forza Nucleare ~ 100 x Intensità Forza Elettromagnetica**

La Forza Nucleare governa il comportamento del nucleo e delle Reazioni Nucleari
(**Fisica Nucleare**)

() Esiste anche una “Forza Nucleare Debole” ma per il momento non ne discutiamo*

Classificazione dei nuclei



Z : numero di protoni (numero di carica)

N : numero di neutroni

$A = Z + N$: numero di massa

Esempio:

^{16}O (Ossigeno 16) $\rightarrow A=16, Z=8, N=8$

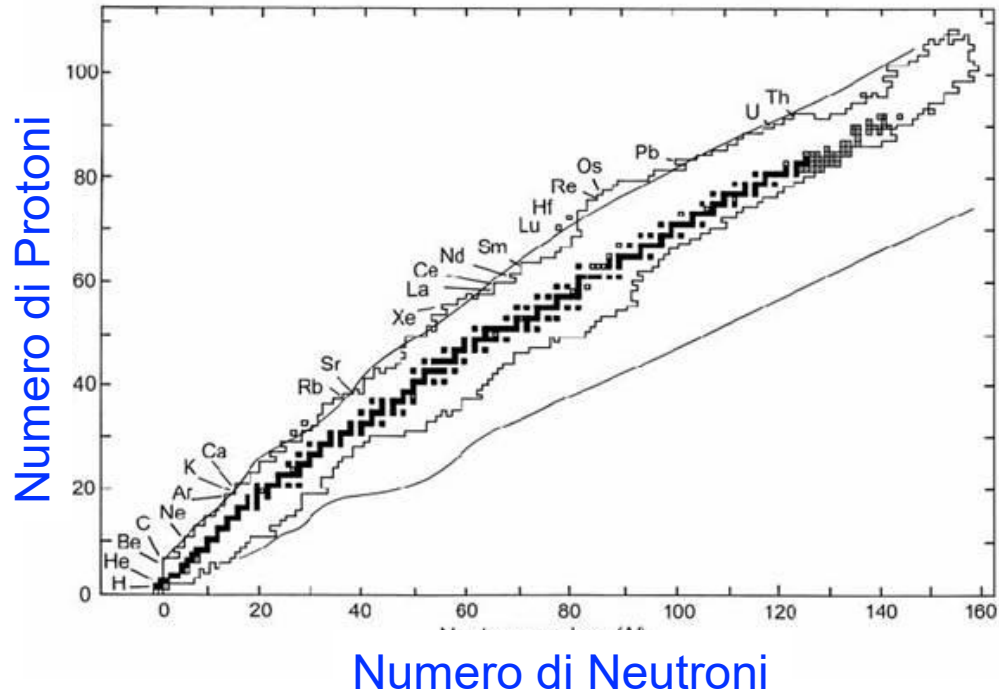
I nuclei con lo stesso Z (stessa carica elettrica) ma con A diverso, si chiamano “**isotopi**”: hanno un diverso numero di neutroni

Per esempio:

Esiste ^{18}O (Ossigeno 18) $\rightarrow A=18, Z=8, N=10$

La forza nucleare

Il numero di protoni e neutroni che possono dare luogo a nuclei non è arbitrario. I punti neri in figura indicano i nuclei «stabili».



Unità di misure “comode” per l’energia di nuclei e particelle subatomiche

Nel Sistema Internazionale di Unità di Misura l’energia si misura in **Joule (J)**

1 Kw ora = 3.6 milioni di Joule

Nel modo microscopico usiamo gli **elettron-Volt (eV)**: energia acquistata da 1 elettrone sotto l’azione del potenziale elettrico di 1 V

1 keV = 1000 eV (kilo elettron volt)

1 MeV = 1000 000 eV (mega elettron volt)

1 GeV = 1 miliardo di eV (giga elettron volt)

ecc.

1 eV = 1.6 10⁻¹⁹ Joule

Tipicamente, l’energia degli elettroni in un atomo è di qualche eV

*Per capirsi: una pallina da tennis a 100 km/h ha un’energia di ~23 Joule
cioè ~3200 miliardi di miliardi di eV*

Massa, movimento ed Energia nella Relatività di Einstein

massa nel sistema di riferimento in cui una particella è ferma (“massa a riposo”)

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

Equivalenza di massa e energia

Il significato profondo sta nel fatto che:

la massa può essere convertita in energia (e viceversa)

Anche le masse in fisica nucleare le misuriamo in unità di energia, (non in grammi!)

Esempio: la massa di 1 protone è $938 \text{ MeV}/c^2$ (in grammi equivale a $1.672 \cdot 10^{-24} \text{ g}$)

Energia di legame: cominciamo con la chimica

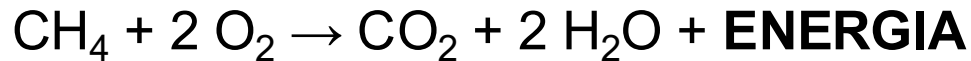
Il concetto di energia di legame: gli atomi si uniscono l'uno all'altro per formare molecole.

La formazione di un legame chimico **coinvolge gli elettroni** che possono essere trasferiti da un atomo ad un altro, oppure condivisi fra due o più atomi.

L'energia di legame degli elettroni si colloca tipicamente nell'intervallo 0.1 – 10 eV

Rompendo/formando questi legami liberiamo energia

Esempio: la combustione del Metano [CH₄]



fornendo una piccola energia iniziale per rompere i legami di CH₄ se ne formano altri (CO₂, H₂O) liberando più energia di quella fornita inizialmente

→ reazione «esotermica»

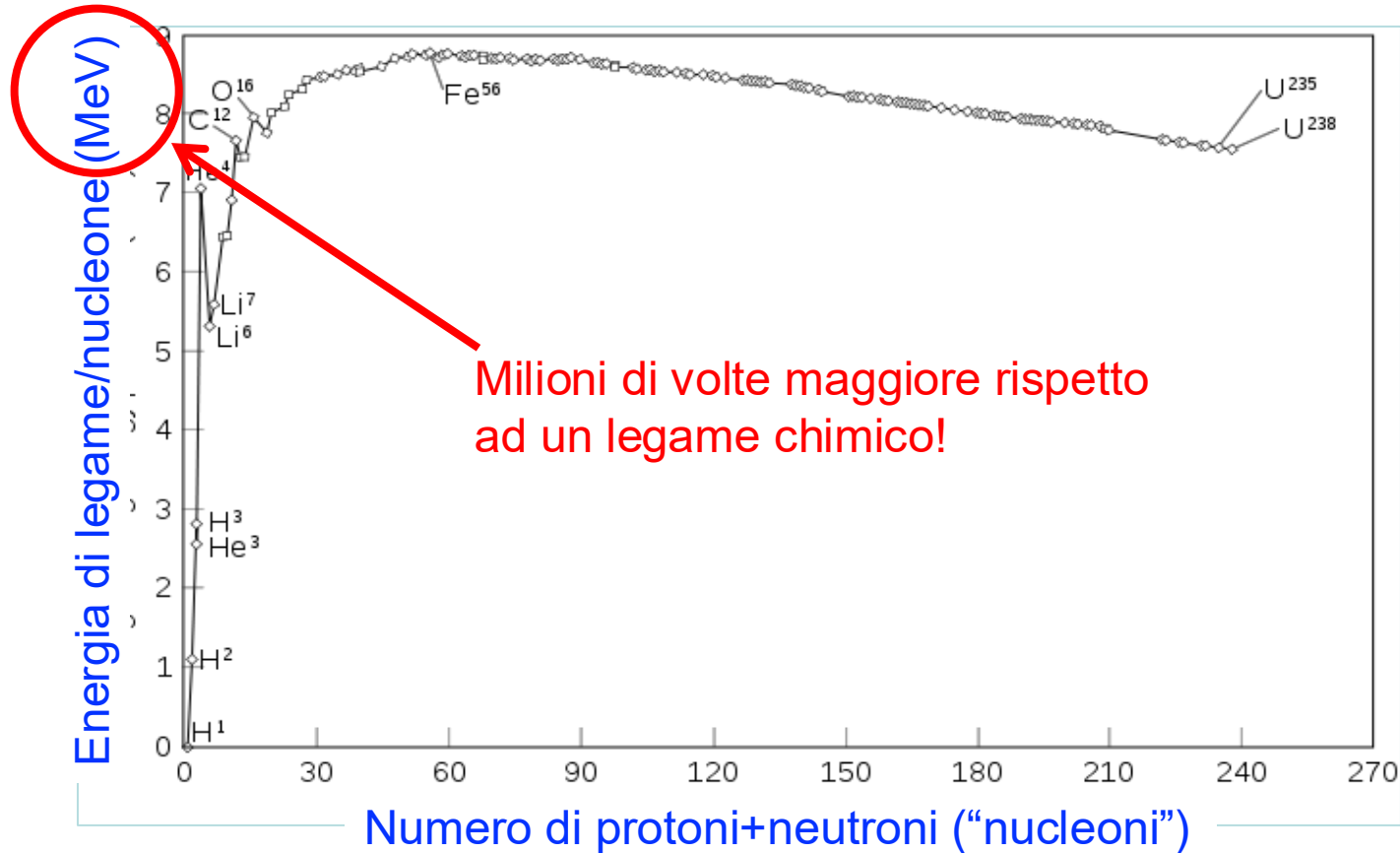
Esempio del metano

La combustione di 1 molecola di metano produce $8.9 \cdot 10^{-19}$ Joule ~ 5.56 eV

Sembra un numero piccolissimo, ma in 1 kg di metano ci sono
 $3.754 \cdot 10^{25}$ molecole!

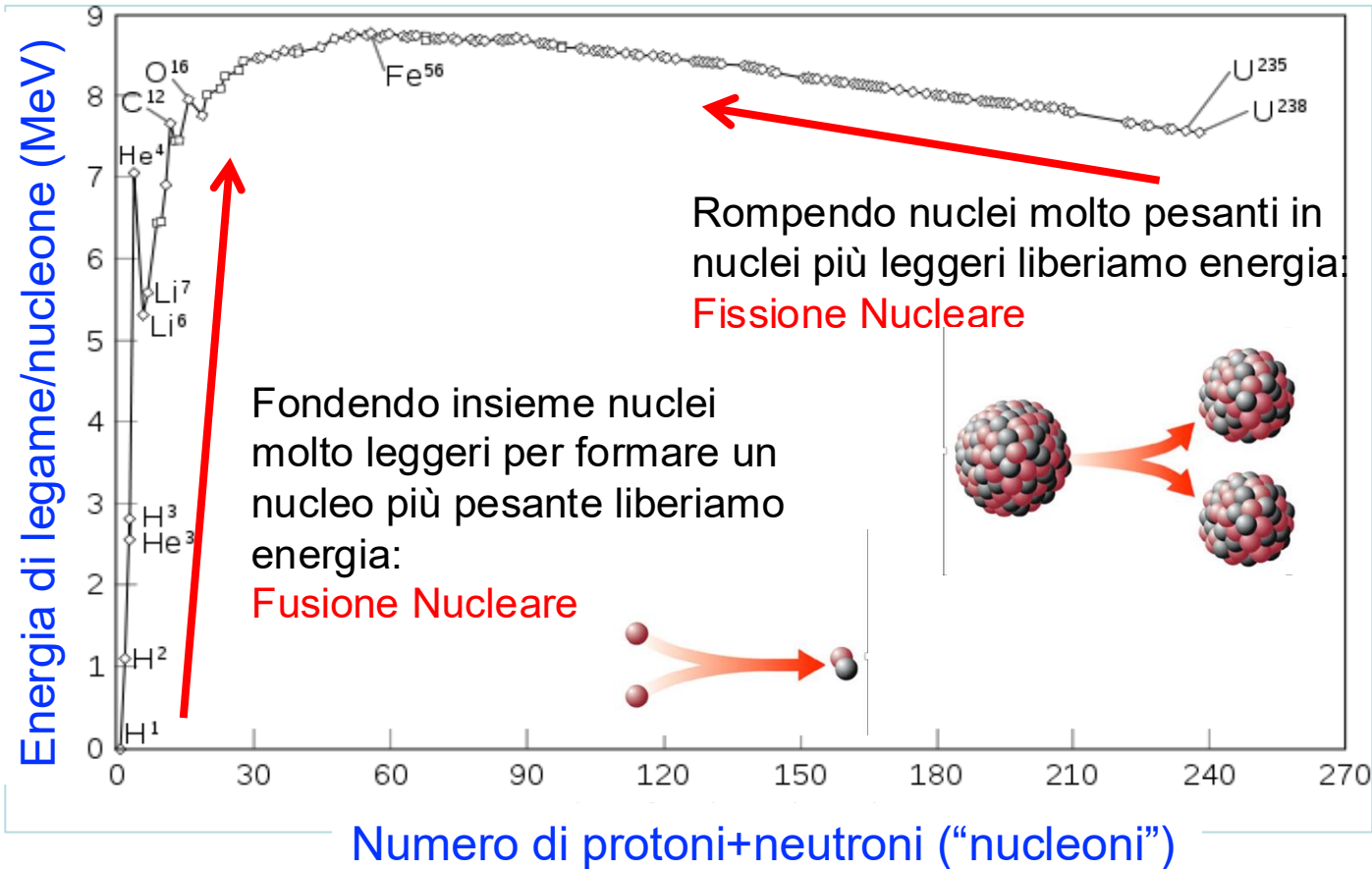
Questo si traduce nel fatto che la combustione di 1 kg di metano
produce $\sim 20.9 \cdot 10^{25}$ eV ~ 33.4 Milioni di Joule

Energia di legame nei nuclei atomici



Milioni di volte maggiore rispetto ad un legame chimico!

Energia di legame nei nuclei atomici



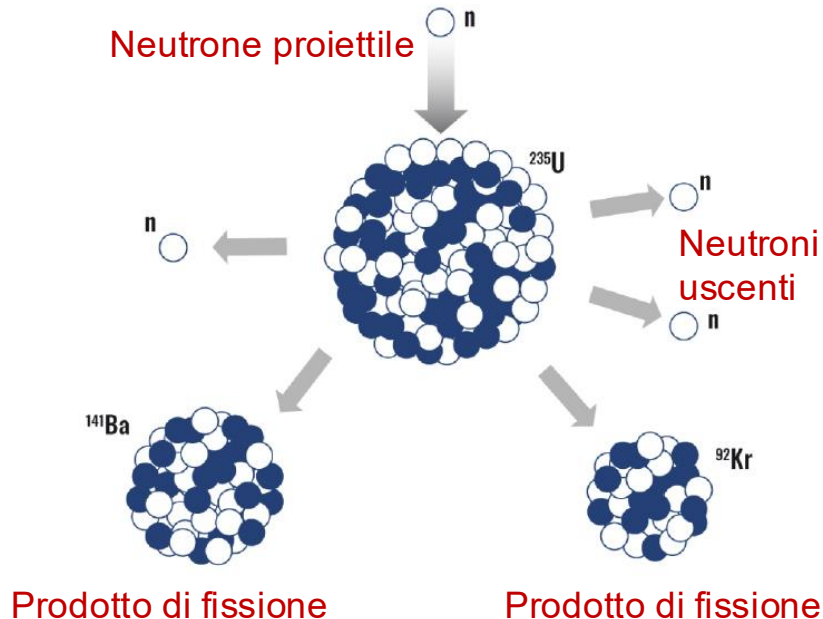
Efficienza di trasformazione di massa in energia

Le reazioni nucleari sono le più efficienti nel convertire materia in energia:

- **Reazioni chimiche:** 10^{-8} della massa si trasforma in energia (1 parte su 100 milioni)
- **Fissione nucleare:** $\sim 1/100$ della massa si trasforma in energia
- **Fusione nucleare:** $\sim 3 - 7/100$ della massa si trasforma in energia

La fissione nucleare

Nella fissione *un nucleo pesante si divide in due nuclei-frammenti più leggeri a seguito della cattura di un neutrone.*



- Nel processo si libera una quantità notevole di energia che si manifesta come «energia cinetica» (velocità) dei due frammenti.
- In alcuni nuclei (U^{233} , U^{235} , Pu^{239}), detti **fissili**, la cattura del neutrone è tanto più probabile quanto più bassa è la sua velocità
~200 MeV liberati per ogni nucleo fissionato
cioè $\sim 1^0/_{00}$ della massa dell' ^{235}U

La scoperta della fissione nucleare

La fissione nucleare è stata scoperta nel **dicembre 1938** a Berlino dai chimici tedeschi Otto Hahn e Fritz Strassmann

Esperimenti basati sul bombardamento di uranio con neutroni lenti rivelarono la scissione del nucleo in frammenti più leggeri, liberando una enorme quantità di energia.

L'interpretazione fisica fondamentale fu fornita nel **gennaio 1939** da Lise Meitner e suo nipote Otto Frisch.

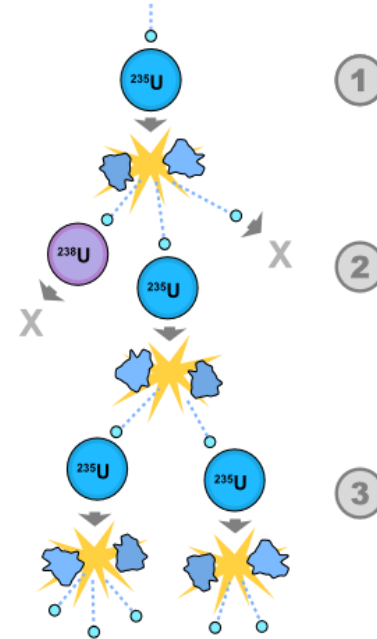


Nota: nel 1934, il gruppo di Enrico Fermi aveva ottenuto la fissione bombardando l'uranio con neutroni, ma non interpretò correttamente il risultato, credendo di aver prodotto elementi "transuranici" (= più pesanti dell'uranio)

La Reazione a Catena

Nella fissione vengono emessi, oltre ai nuclei frammenti, anche due/tre neutroni veloci

A loro volta, i neutroni possono innescare altre reazioni di fissione, creando un processo a cascata



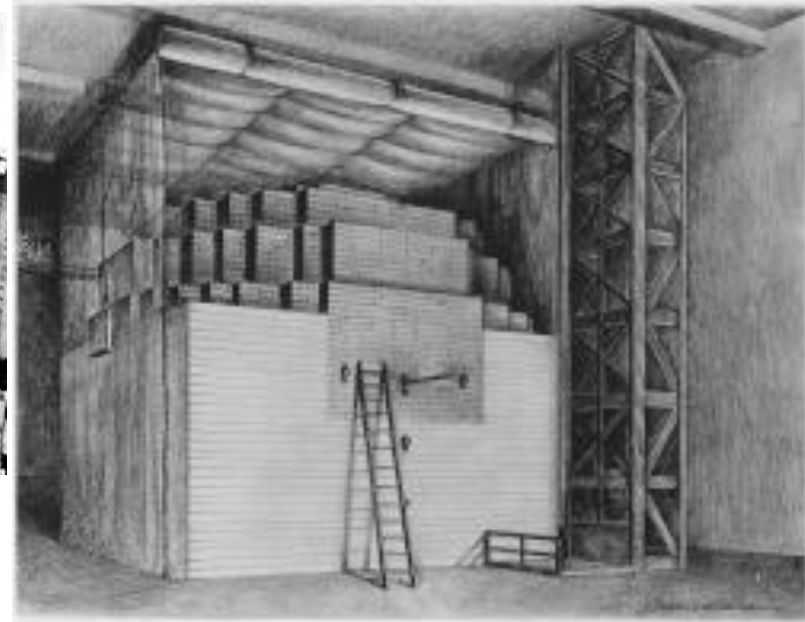
fattore di moltiplicazione = rapporto tra il numero di neutroni in una generazione e quelli della generazione precedente

$K > 1$ $K < 1$ $K = 1$

Fermi e l'energia Nucleare

Fermi è stato il primo a progettare e guidare la costruzione del primo reattore nucleare a fissione autoalimentato per produrre la prima reazione nucleare a catena controllata.

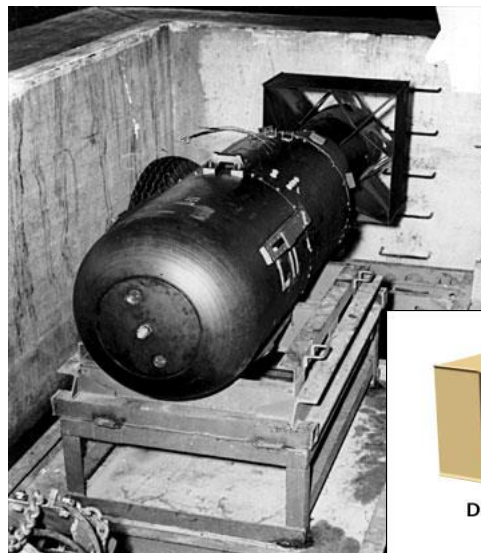
Chicago Pile-1 (CP-1): costruita sotto le gradinate dello stadio *Stagg Field* dell'Università di Chicago, la reazione ha avuto luogo per la prima volta il **2 dicembre 1942**.



Questo esperimento ha segnato l'inizio dell'era nucleare e ha fornito la base scientifica per il Progetto Manhattan.

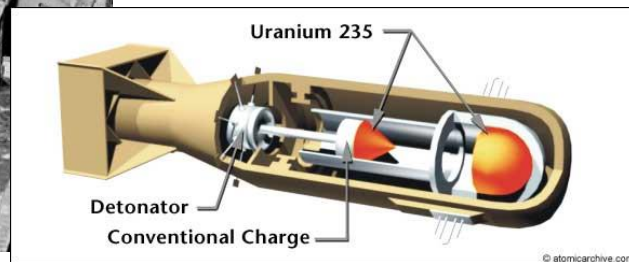
La prima applicazione dell'energia da fissione nucleare è stata la Bomba "Atomica"

Trinity Test 16 Luglio 1945

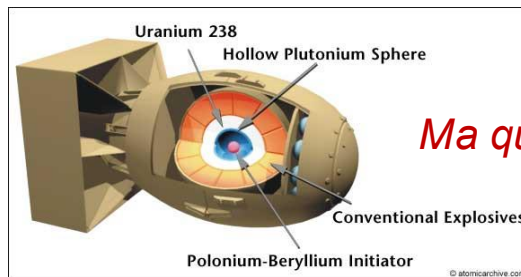
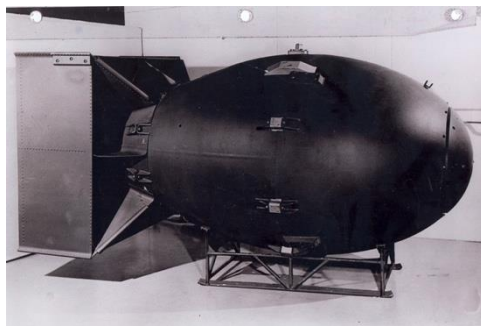


reazione a catena
incontrollata

"Little Boy", Hiroshima,
6 Agosto 1945

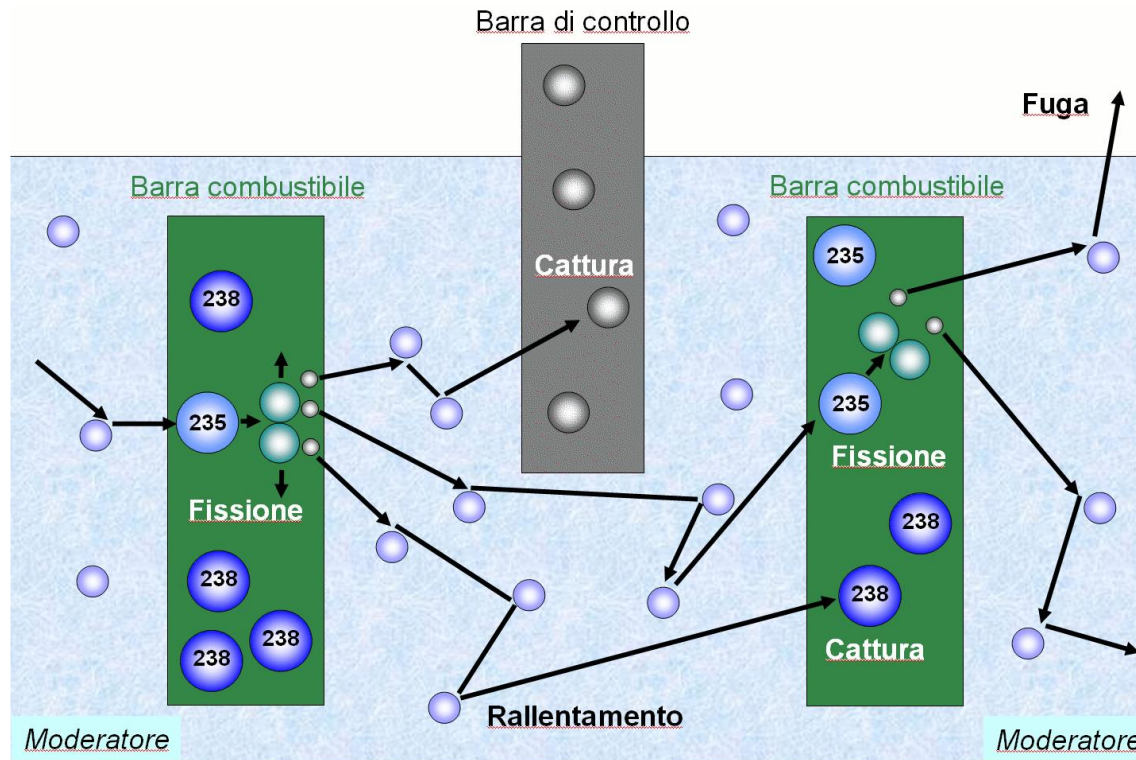


"Fat Man",
Nagasaki,
9 Agosto 1945



Ma questa è un'altra storia...

La Reazione a Catena controllata in un reattore

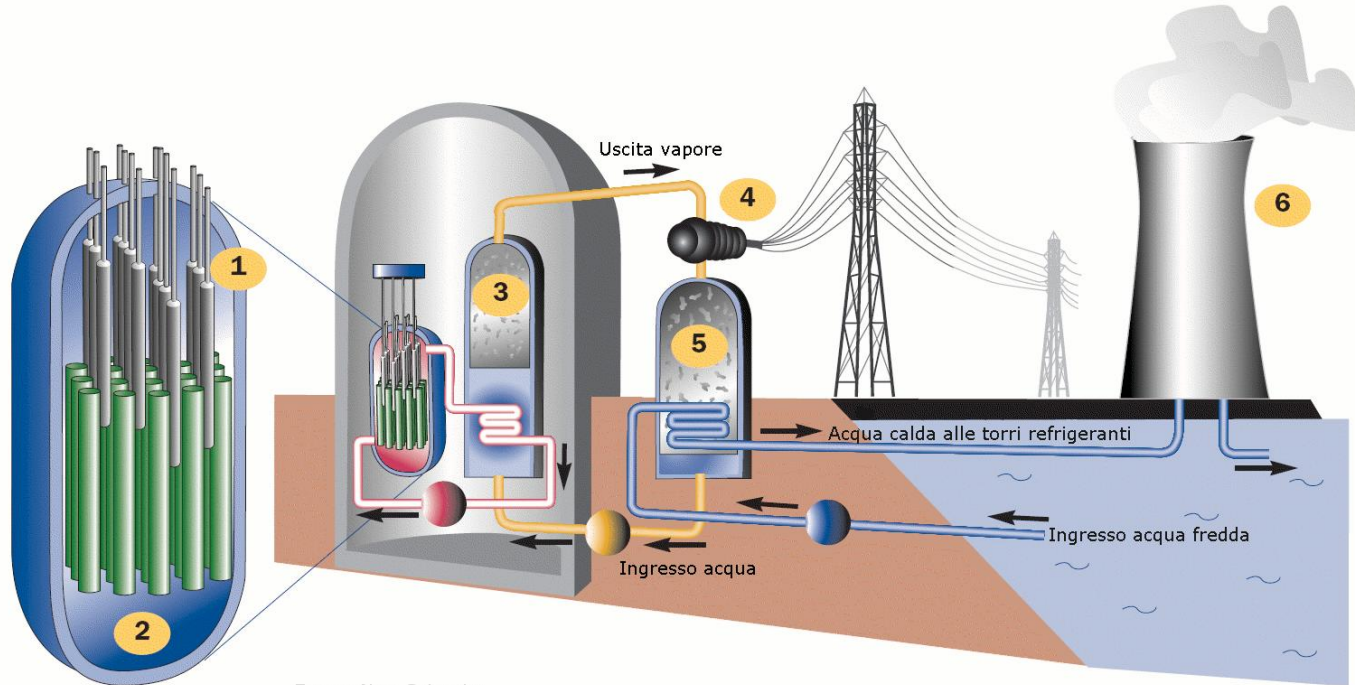


Le parti che compongono il Nocciolo di un Reattore a Fissione

Il **NOCCILO** è la zona dove si sviluppa la reazione a catena e si genera il calore. Contiene:

- Il **combustibile**, una miscela di isotopi di Uranio contenente U^{238} e U^{235} arricchito a circa 3%, dove avviene la fissione, generalmente sotto forma di ossido di uranio in barre cilindriche.
- Il **moderatore/refrigerante**, generalmente acqua, in cui sono immerse le barre di combustibile e che consente sia di rallentare i neutroni, sia di rimuovere il calore prodotto nel combustibile.
- L'**assorbitore**, una sostanza in grado di assorbire i neutroni senza fissionare: variando la quantità di assorbitore si può cambiare la quantità di neutroni disponibili e quindi il fattore di moltiplicazione. In forma di barre mobili che possono essere inserite o estratte

L'impianto del Reattore a Fissione



Fonte: New Scientist

- 1 COMBUSTIBILE E BARRE DI CONTROLLO; 2 MODERATORE; 3 SCAMBIATORE DI CALORE; 4 TURBINE
5 CONDENSATORE; 6 TORRI REFRIGERANTI

Il combustibile nucleare

Pastiglie di Uranio arricchito dell'isotopo 235 (^{235}U) tra il 3% e il 6% ("LEU")

Per confronto:

- l'abbondanza naturale dell'isotopo 235 nell'uranio naturale (quasi solo ^{238}U) è ~0.72%
- il "weapon grade" richiede l'85% o più di ^{235}U o almeno 93% di ^{239}Pu

L'energia prodotta «bruciando» circa **1 gr di uranio**
equivale a: ~10000 m³ di gas metano (~6.7 ton)
2.9 ton. di carbone
2 ton. di petrolio

Le materie prime

La valutazione della disponibilità di combustibile nucleare in futuro è incerta in quanto dipende da vari fattori tra cui:

- La previsione dell'incremento nell'utilizzo dell'energia nucleare nel mondo
- La valutazione delle risorse: sia quelle già conosciute sia quelle nascoste o ancora da sfruttare

Il livello attuale di domanda è pari a **67000 - 69000 t/anno**.

Considerando le riserve identificate e le tecniche di recupero (a costi competitivi), ce ne dovrebbe essere per **90-130** anni.

Tuttavia l'aumento di domanda porta al **rischio di esaurimento entro il 2080** (ci sono proiezioni che vedono un aumento della domanda fino a **87000 t/anno entro il 2030**)

L'impatto ambientale

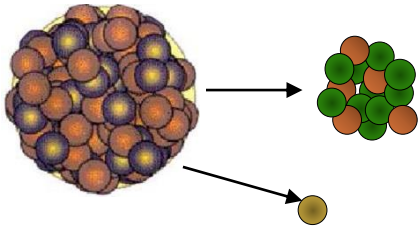
Rilasci ed emissioni di un impianto da 1000 MWe [t/anno].

	CO₂	SO₂	MO_x	Polveri	Residui di produzione
Nucleare	0	0	0	0	100
Carbone	7.500.000	60.000	22.000	1.300	250.000
Olio comb.	6.200.000	43.000	10.000	1.600	70.000
Gas (ciclo Comb)	4.300.000	35	12.000	100	100
Fotovoltaico	0	0	0	0	0
Eolico	0	0	0	0	0

Decadimento radioattivo

Fenomeno descritto dalla meccanica quantistica

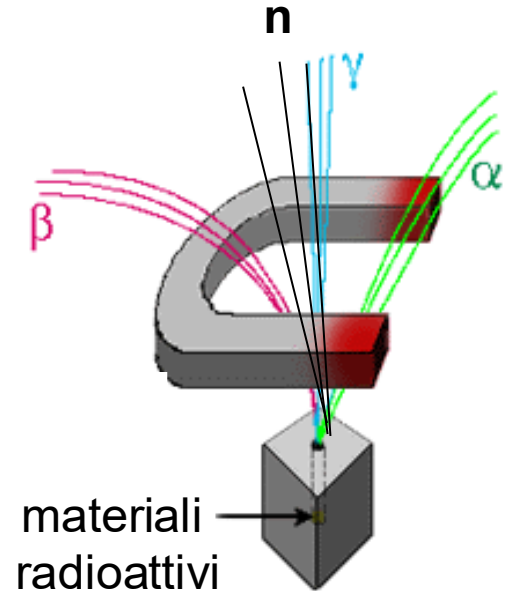
Alcune particelle (come il neutrone) e quindi anche alcuni isotopi nucleari **non sono stabili**: dopo un certo tempo si trasformano emettendo altre particelle



La somma delle masse delle particelle prodotte è sempre inferiore alla massa della particella di partenza

$$M = m_1 + m_2 + \dots + m_n + \text{Energia}$$

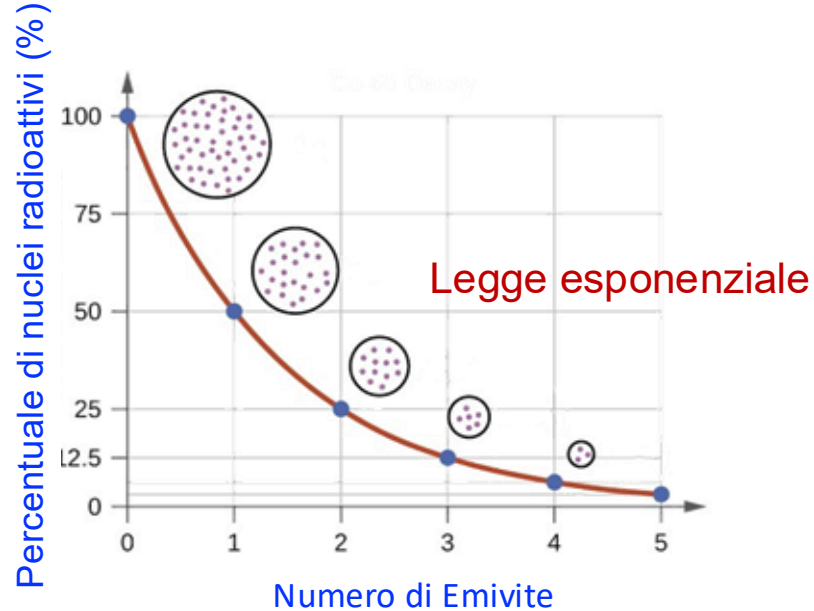
Esempio: il Potassio-40 (^{40}K) presente in natura (0.0117% del Potassio)



“Decadimento β ” (la prima teoria di questo fenomeno fu di E. Fermi)

Decadimento e tempo di dimezzamento (“Emivita”)

Ogni isotopo radioattivo è caratterizzato da un suo tempo di dimezzamento $T_{1/2}$



Se aspetto un tempo $\Delta T = T_{1/2}$ (1 Emivita) sopravviverà metà della sostanza radioattiva e metà sarà decaduta.
Se aspetto 2 Emivite ($2T_{1/2}$), ne rimane $\frac{1}{4}$, se ne aspetto 3 solo $\frac{1}{8}$ e così via.

Le scorie radioattive

Il combustibile nucleare si esaurisce: Le barre di combustibile esaurite contengono una massa di rifiuti radioattivi, le cosiddette scorie, pari a circa **20 tonn/anno** per un reattore da 1000 MWe, costituite :

1. Per il 95% principalmente da ^{235}U non bruciato e ^{238}U
2. Per l'1-2% di plutonio ^{239}Pu che è un combustibile fissile
3. Per circa il 3% da materiali radioattivi a vita media medio-lunga (frammenti di fissione) o lunghissima («*attinidi minori*»)

20 tonn. di combustibile (= 2 vagoni ferroviari):

-Scorie ad attività medio/bassa

-Scorie alta attività: **~0.3-0.5 ton**

Radioattività che decade a livelli trascurabili in ~300 anni

Prodotti radioattivi a lunga vita media che rimangono pericolosi per migliaia o decine di migliaia di anni

^{239}Pu : $t_{1/2} \sim 24000$ anni

^{237}Np : $t_{1/2} \sim 2$ milioni di anni

^{129}I : $t_{1/2} \sim 15$ milioni di anni ?

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	H Hydrogen 1.008	Atomic Symbol Name Weight																	
2	Li Lithium 6.94	Be Beryllium 9.0122																He Helium 4.0026	
3	Na Sodium 22.990	Mg Magnesium 24.305																Ne Neon 20.180	
4	K Potassium 39.098	Ca Calcium 40.078	Sc Scandium 44.956	Ti Titanium 47.867	V Vanadium 50.942	Cr Chromium 51.996	Mn Manganese 54.938	Fe Iron 55.845	Co Cobalt 58.933	Ni Nickel 58.693	Cu Copper 63.546	Zn Zinc 65.38	Ga Gallium 69.723	Ge Germanium 72.630	As Arsenic 74.922	Se Selenium 78.971	Br Bromine 79.904	Kr Krypton 83.798	
5	Rb Rubidium 85.468	Sr Strontium 87.62	Y Yttrium 88.906	Zr Zirconium 91.224	Nb Niobium 92.906	Mo Molybdenum 95.95	Tc Technetium (98)	Ru Ruthenium 101.07	Rh Rhodium 102.91	Pd Palladium 106.42	Ag Silver 107.87	Cd Cadmium 112.41	In Indium 114.82	Sn Tin 118.71	Sb Antimony 121.76	Te Tellurium 127.60	I Iodine 126.90	Xe Xenon 131.29	
6	Cs Caesium 132.91	Ba Barium 137.33	57-71	Hf Hafnium 178.49	Ta Tantalum 180.95	W Tungsten 183.84	Re Rhenium 186.21	Os Osmium 190.23	Ir Iridium 192.22	Pt Platinum 195.08	Au Gold 196.97	Hg Mercury 200.59	Tl Thallium 204.38	Pb Lead 207.2	Bi Bismuth 208.98	Po Polonium (209)	At Astatine (210)	Rn Radon (222)	
7	Fr Francium (223)	Ra Radium (226)	89-103	Rf Rutherfordium (267)	Db Dubnium (268)	Sg Seaborgium (269)	Bh Bohrium (270)	Hs Hassium (277)	Mt Meitnerium (278)	Ds Darmstadtium (281)	Rg Roentgenium (282)	Cn Copernicium (285)	Nh Nihonium (286)	Fl Flerovium (289)	Mc Moscovium (290)	Lv Livermorium (293)	Ts Tennessine (294)	Og Oganesson (294)	
For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is in parentheses.																			
	La Lanthanum 138.91	Ce Cerium 140.12	Pr Praseodymium 140.91	Nd Neodymium 144.24	Pm Promethium (145)	Sm Samarium 150.36	Eu Europium 151.96	Gd Gadolinium 157.25	Tb Terbium 158.93	Dy Dysprosium 162.50	Ho Holmium 164.93	Er Erbium 167.26	Tm Thulium 168.93	Yb Ytterbium 173.05	Lu Lutetium 174.97				
	Ac Actinium (227)	Th Thorium 232.04	Pa Protactinium 231.04	U Uranium 238.03	Np Neptunium (237)	Pu Plutonium (244)	Am Americium (243)	Cm Curium (247)	Bk Berkelium (247)	Cf Californium (251)	Es Einsteinium (252)	Fm Fermium (257)	Md Mendelevium (258)	No Nobelium (259)	Lr Lawrencium (266)				



L'unità di misura della radioattività

Misura della attività di una sorgente radioattiva:

Bq (bequerel) = 1 decadimento radioattivo/secondo

Radioattività totale delle scorie a lunga vita media prodotte in media da un impianto nucleare a fissione da 1000 Mwe in 1 anno: **2 GBq/anno**

Per capirsi, un confronto con i livello di attività naturale:

il cemento che usiamo normalmente come materiale da costruzione ha un attività compresa fra 50 e 300 Bq/kg. E' dovuta principalmente a radio-isotopi primordiali come ^{40}K , ^{238}U e ^{232}Th

Evoluzione nel tempo dei Reattori Nucleari a Fissione

Generazione I

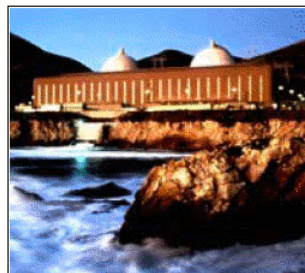
Primi prototipi di reattore



Reattore di Fermi a Chicago (Fermi I) etc.

Generazione II

Reattori commerciali di potenza



Reattori ad acqua pressurizzata (PWR) o bollente (BWR)

Reattori ad acqua pesante

Generazione III

Reattori ad acqua avanzati



Reattore avanzato ad acqua bollente (ABWR)

440 reattori in funzione
40-50 di gen. III+

Generazione III+

Progetti in evoluzione di prossima disponibilità¹. Offrono migliori caratteristiche economiche, di sicurezza e maggiore durata.

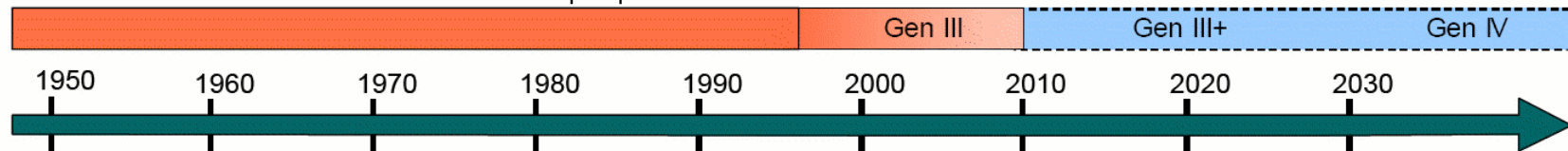
Reattore Pressurizzato Europeo (EPR) e AP1000

Generazione IV



Maggiore convenienza economica e sicurezza intrinseca. Migliore sfruttamento delle risorse. Minima produzione di scorie. Resistenza alla proliferazione.

6 progetti selezionati



Perché ci si aspetta un livello di sicurezza maggiore nei reattori di ultima generazione

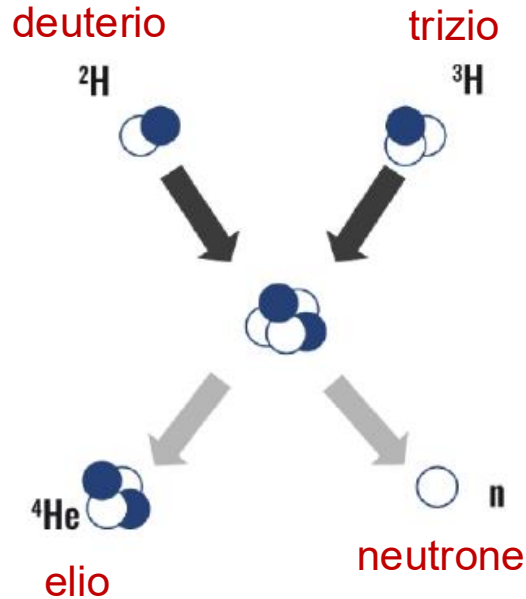
- I reattori di generazione III+ sono progettati con probabilità di accadimento di un incidente grave con fusione del nocciolo e contaminazione del mondo esterno pari a 10^{-6} eventi per anno.
- Ossia in un parco di 1000 reattori nucleari si potrà verificare un incidente grave una volta ogni 1000 anni.
- Hanno un elevato grado di “sicurezze passive” ossia basate su fenomeni naturali invece che su interventi pilotati. (EPR-Francia, AP100-USA)
- Si tratta di sistemi definiti “a sicurezza intrinseca” che non richiedono nè intervento umano nè complesse apparecchiature elettroniche

La generazione IV (*non ancora operativa!*) prevede maggiore efficienza e migliore sicurezza intrinseca. Per. es.:

- come refrigerante prevede Pb, Gas o sali fusi che garantiscono sicurezza anche in condizioni incidentali estreme ed eliminano il pericolo di esplosioni di vapore.
- Uso di neutroni veloci che permette di tramutare in parte le scorie radioattive riducendone volume e durata.
- Progetti di reattori modulari compatti. Scalabili in combinazione a partire da ~5 MW fino anche 1000 MW

La Fusione Nucleare

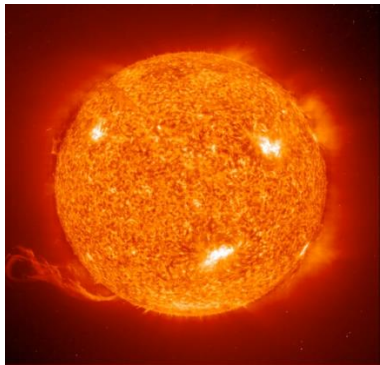
Come abbiamo visto in precedenza, questa è la reazione più efficiente per la produzione di energia



Dal punto di vista fisico il problema è portare a contatto fra loro due nuclei atomici, che invece tendono a respingersi!

(entrambi con carica elettrica positiva)

La Fusione Nucleare in natura: le Stelle

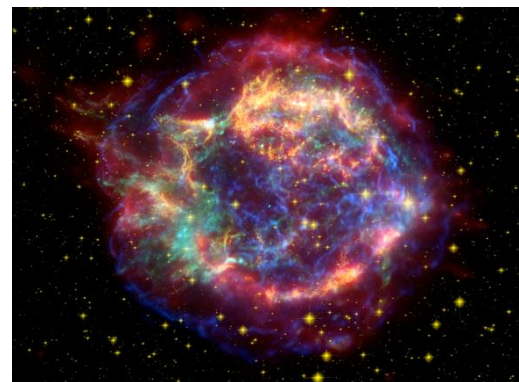


All'interno delle stelle per effetto della grande pressione esercitata dalla massa dell'astro, i nuclei di H (elemento di cui è costituita la stella) sono portati a stretto contatto fra loro e possono fondere, dando luogo a una serie di reazioni che portano alla produzione di nuclei di He, liberando energia (*comprensione già dagli anni 30*)

Quando la zona centrale si è arricchita di He, con un altro meccanismo di fusione, le stelle fabbricano elementi quali **C**, **N** e **O**.

In uno stadio successivo, vengono prodotti elementi ancora più pesanti, come **Si** e **Fe**.

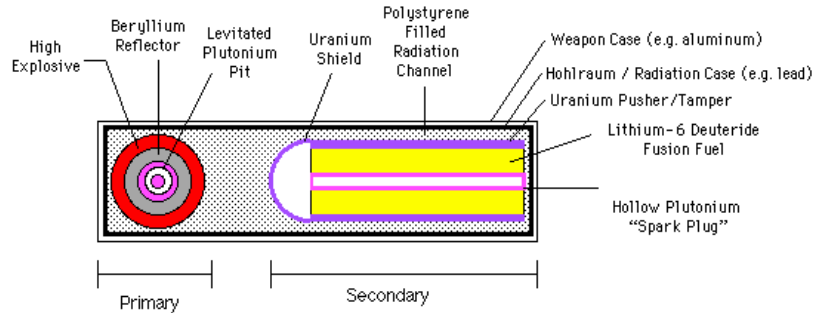
Nelle fasi finali di vita la stella può esplodere scaraventando fuori i prodotti della sua attività. **Nella fase dell'esplosione vengono prodotti tutti i nuclei più pesanti.**



La prima applicazione artificiale è stata la Bomba TermoNucleare ("Bomba H")

1° novembre 1952

Atollo di Eniwetock



Come ottenere una Fusione Nucleare controllata

Per innescare una reazione di fusione nucleare bisogna ricreare condizioni simili a quelle che si trovano nel nucleo delle stelle: **materia allo stato di “plasma”**

Nel Sole 15 milioni di gradi e qualche centinaio di miliardi di atmosfere.

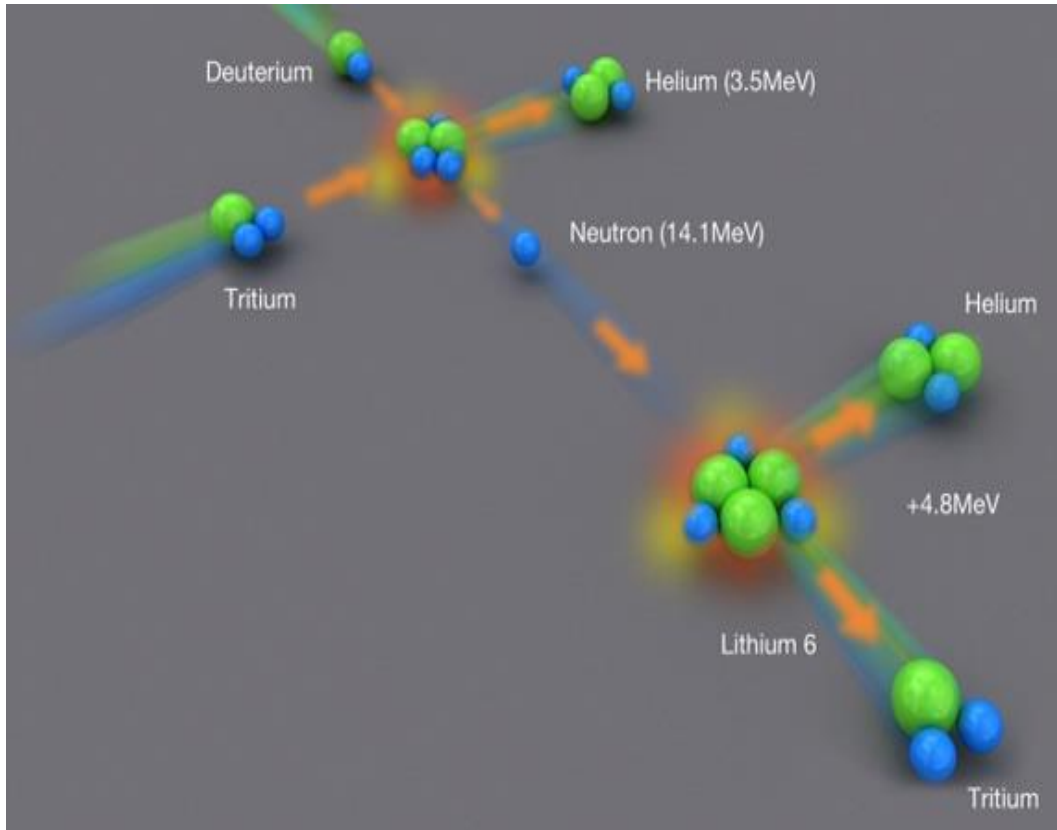
Non c'è modo di contenere artificialmente una simile pressione perciò nei tentativi in corso si preferiscono una bassa pressione (poche decina di atmosfere) e un sovrappiù di **temperatura oltre cento milioni di gradi.**

Il problema è che **il plasma tende ad espandersi**, ma ci serve **confinarlo in un volume precisamente definito!**

Siamo ancora nella fase di Ricerca e Sviluppo. 2 vie:

- 1) “Reattori” a fusione (**tokamak**) dove si usano campi magnetici per contenere e confinare i plasmi che dovrebbero fondersi.
- 2) “Fusione inerziale”: utilizza potenti raggi laser per “confinare” il combustibile da fondere.

La reazione deuterio-trizio



Isotopi dell'idrogeno:
 ^2H e ^3H

22.4 MeV in totale
liberati per ogni
reazione di fusione

$\sim 3.5\%$ della
massa è convertita
in energia

1 g di deuterio-trizio produce
la stessa energia ricavabile
da ~ 6000 ton di gas naturale

I vantaggi dell'energia da Fusione Nucleare rispetto alla Fissione

- Combustibile ~illimitato: l'idrogeno è l'elemento più abbondante dell'universo. In natura 1 atomo di deuterio ogni ~6000 atomi di idrogeno. Il trizio lo ricaviamo da reazioni su Litio, che ce n'è per molto più di 100,000 anni
- La fusione non produce scorie ad alta attività e lunghissima vita media. Solo attivazione dei materiali colpiti dai neutroni (esauribile in ~150 anni)
- Non può produrre materiale utilizzabile per la proliferazione di armi nucleari
- Nessun problema di sicurezza: la fusione può essere interrotta in qualsiasi momento: basta interrompere il flusso di combustibile

Come per l'energia da Fissione

- Non produce gas serra
- Può funzionare in modo continuo, indipendentemente da condizioni climatiche e stagionali

Tokamak: il Progetto ITER

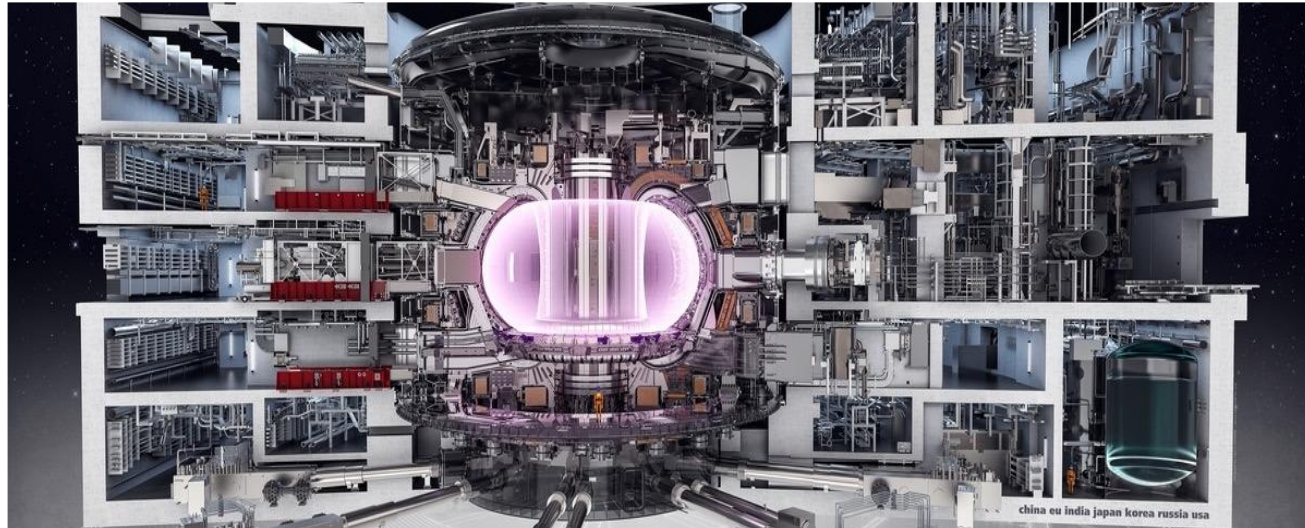
Progettato per raggiungere 500 MW

Guadagno di Potenza 10

In costruzione a Cadarache (sud della Francia)



Share EU
50%



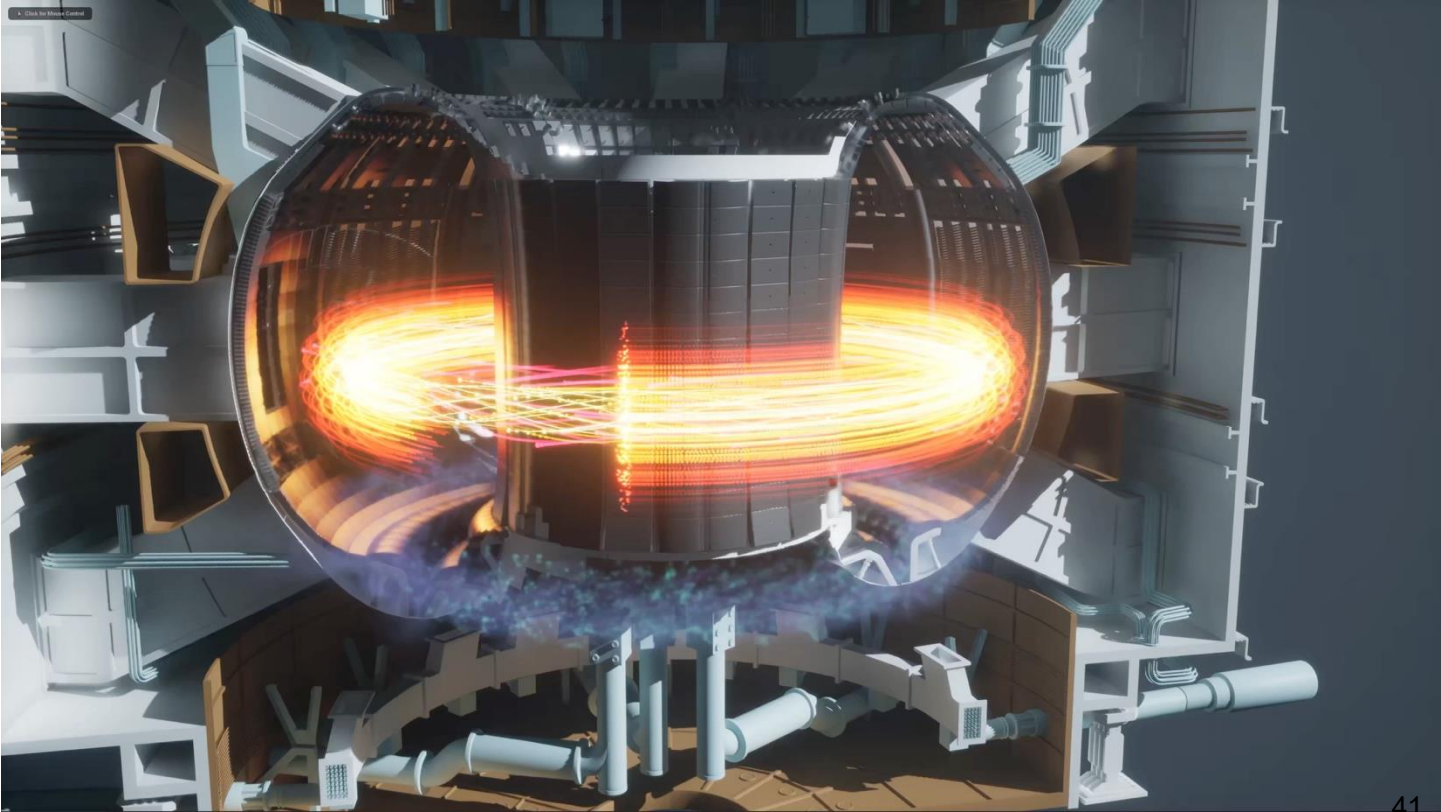
E' come accendere una stella (e costruire la scatola capace di contenerla!)

Una miscela gassosa di **deuterio-trizio** che forma il plasma viene iniettata molto velocemente nella camera a vuoto tramite un sistema di pompaggio con portata media di $200 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ e quindi trasformata in un plasma tramite ionizzazione indotta da un sistema elettrico.

Il campo magnetico all'interno del tokamak (12 tesla) sarà prodotto da un solenoide centrale e da ventiquattro bobine superconduttrici disposte perpendicolarmente all'anello del toroide

un circuito di raffreddamento ad elio liquido mantiene gli avvolgimenti alla temperatura di 4 K ($-269 \text{ }^\circ\text{C}$)

Il plasma all'interno del tokamak è riscaldato fino alla temperatura di fusione tramite l'iniezione nella camera a vuoto di atomi di idrogeno ad alta velocità che, tramite collisioni, trasferiranno la loro energia ai componenti del plasma. Due sistemi aggiuntivi a radiofrequenza sono inoltre utilizzati per riscaldare gli ioni e gli elettroni del plasma



Sito di ITER



Componenti di ITER



Gli ultimi record della fusione

EUROfusion, ottenuto nell'impianto JET di Oxford:

3 Ottobre 2023

Quantità di D-T: 0.2 mg

Energia da fusione: 69 MegaJoules in 5 secondi

Princeton Plasma Physics Laboratory (PPPL), negli Stati Uniti:

Campagna sperimentale gennaio-aprile 2024:

Plasma mantenuto per 6 minuti

ITER:

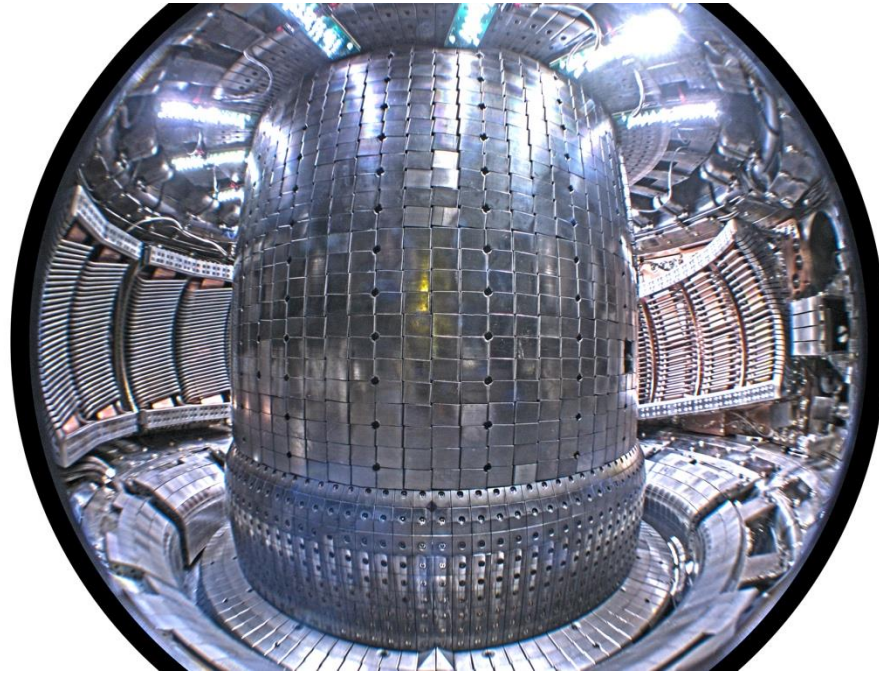
l'inizio delle operazioni scientifiche è previsto per il 2034 e la data per la produzione di reazioni di fusione si stima ~ al 2039

Il ruolo dell'Italia in ITER

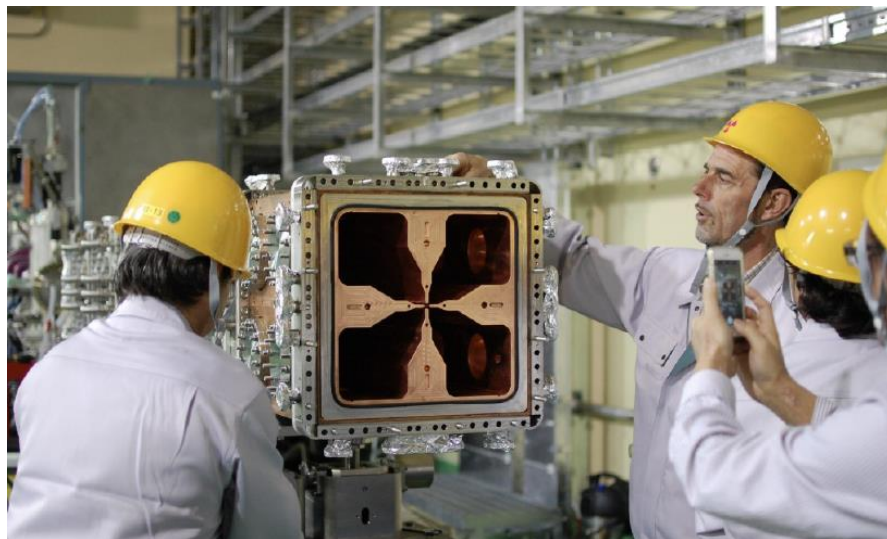
- Secondo contributore in EU dopo la Germania
- Enti di ricerca coinvolti: ENEA, CNR, INFN (consorzi CREATE e RFX) più diversi gruppi universitari. L'ENEA ha responsabilità di coordinamento
- Il direttore generale di ITER al momento è Italiano
- ENEA Frascati:
 - sorgente di neutroni da 14 MeV per studiare l'effetto dei neutroni sui materiali
 - Divertor Tokamak Test (partecipano anche INFN e diverse industrie)
- Neutral Beam Test (Padova) per lo studio del Sistema di iniezione
- INFN nel progetto IFMIF-DONES per lo sviluppo dei materiali per il reattore a fusione (studio del comportamento di materiali soggetti a bombardamento con neutroni). L'INFN costruisce parte di un acceleratore per la produzione di neutroni.



Il “Divertore”



Per lo smaltimento del calore prodotto dal plasma (e calore generato dalle particelle prodotte nella reazione di fusione): **ordine di grandezza 10 MW/m^2**



Componente per l'acceleratore
di ioni deuterio per IFMIF
(lab. INFN di Legnaro)



Meccanica esperimento RFX

Ci sono problemi ancora da risolvere completamente per le centrali a fusione

- Tecnologia per il trizio
- Ottimizzazione della scelta dei materiali per i vari componenti critici
- Estrazione e scarico della potenza
- Smaltimento rifiuti e gestione sicurezze
- Controllo remoto e manutenzione
- Teoria e simulazioni numeriche
- ...

Quando funzioneranno?

Grazie per
l'attenzione!



Per qualsiasi domanda sul tema:
giuseppe.battistoni@mi.infn.it