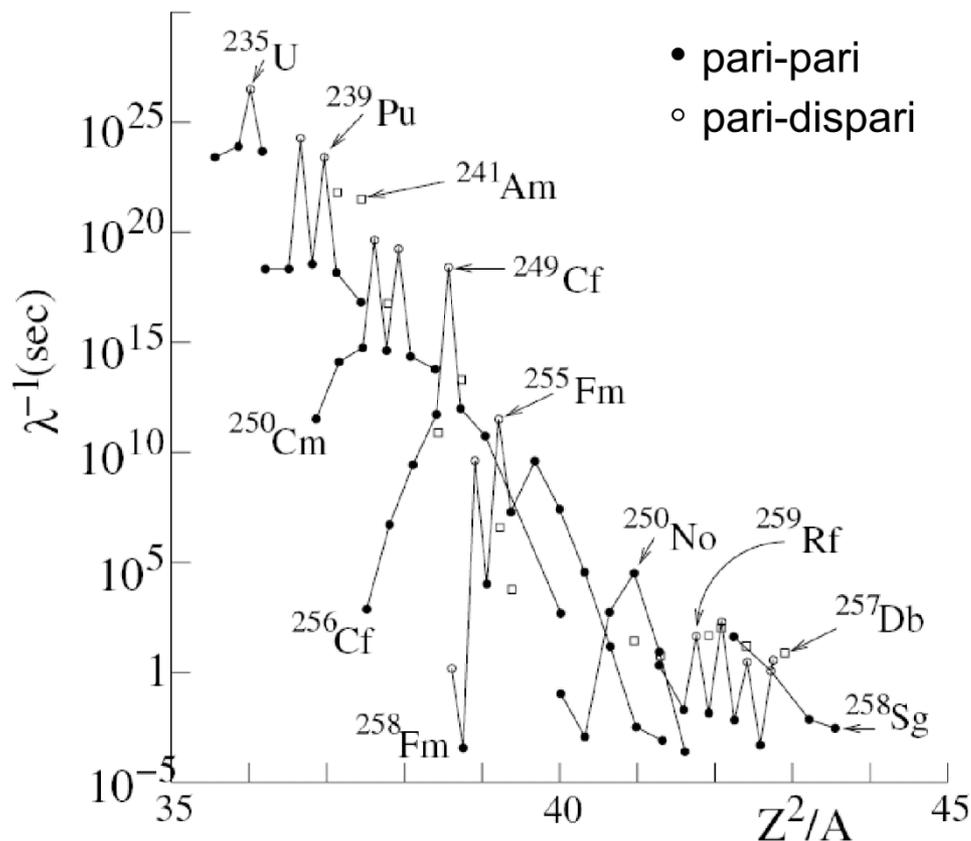


**Fissione
&
Fusione
Nucleare**

Fissione spontanea

La fissione spontanea è una forma di decadimento radioattivo caratteristica di isotopi molto pesanti.



Branching Ratio: frazione di decadimenti in un certo canale

$$\lambda_{fiss} = B.R. \cdot \lambda_{tot}$$

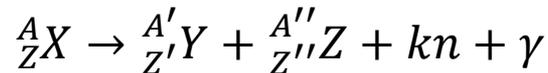
$$\lambda_{fiss}^{-1} = \frac{\tau}{B.R.} = \frac{\tau_{1/2}}{0,69 \cdot B.R.}$$

	^{235}U	^{238}U
$\tau_{1/2}$	$7 \cdot 10^8 \text{ y}$	$4,5 \cdot 10^9 \text{ y}$
B.R.	$7 \cdot 10^{-11}$	$5,5 \cdot 10^{-7}$

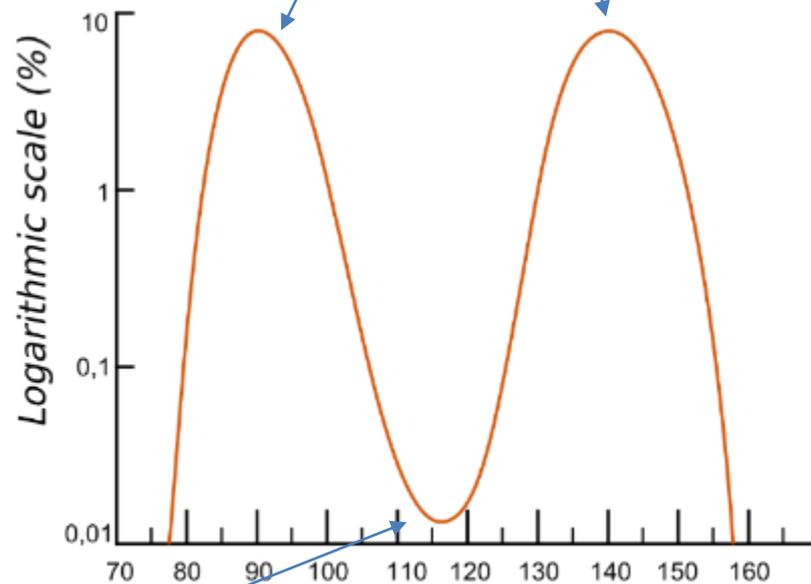
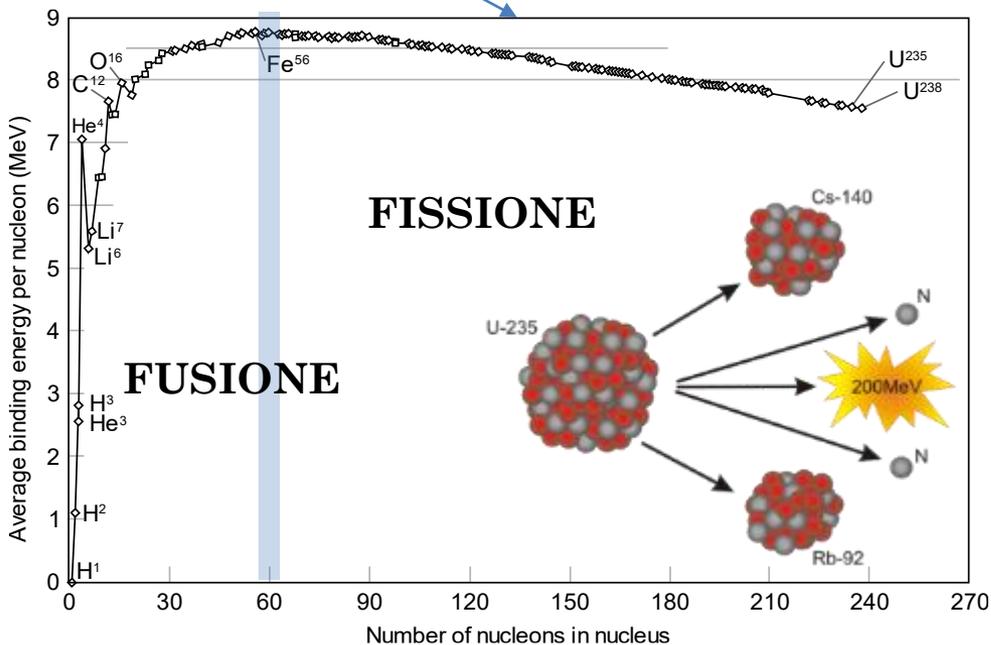
la probabilità di fissione spontanea è molto bassa

Fissione spontanea

- interazione forte
- emissione di neutroni (prompt e ritardati)
- energia rilasciata $\sim 100 - 200 \text{ MeV}$



$$k \approx 2 - 4$$



difficile che i frammenti abbiano la stessa massa

I prodotti di fissione hanno tipicamente un elevato numero di neutroni

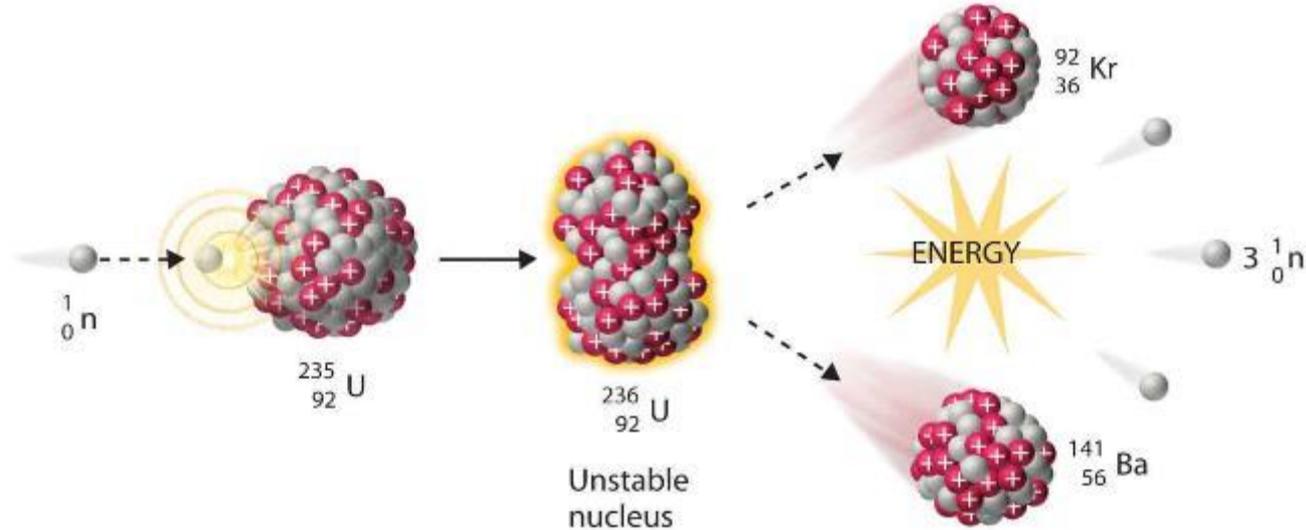
Scorie che decadono tipicamente beta

160 MeV ai frammenti
5 MeV ai neutroni
5 MeV a gamma

Fissione indotta

Il processo di fissione è alla base della produzione di energia nucleare

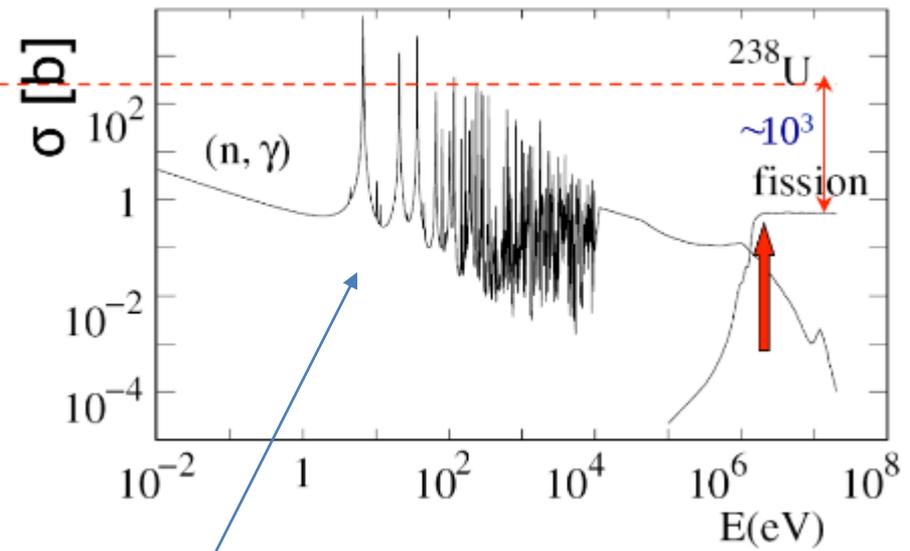
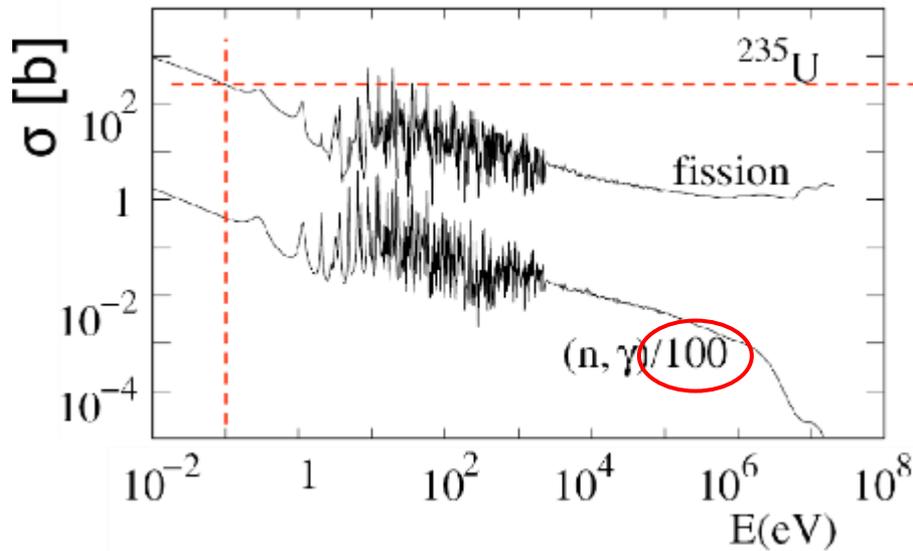
- La fissione spontanea non è in grado di produrre una potenza apprezzabile ed è quindi necessario ricorrere alla fissione indotta da neutroni



Fissione indotta

Processi di scattering del neutrone

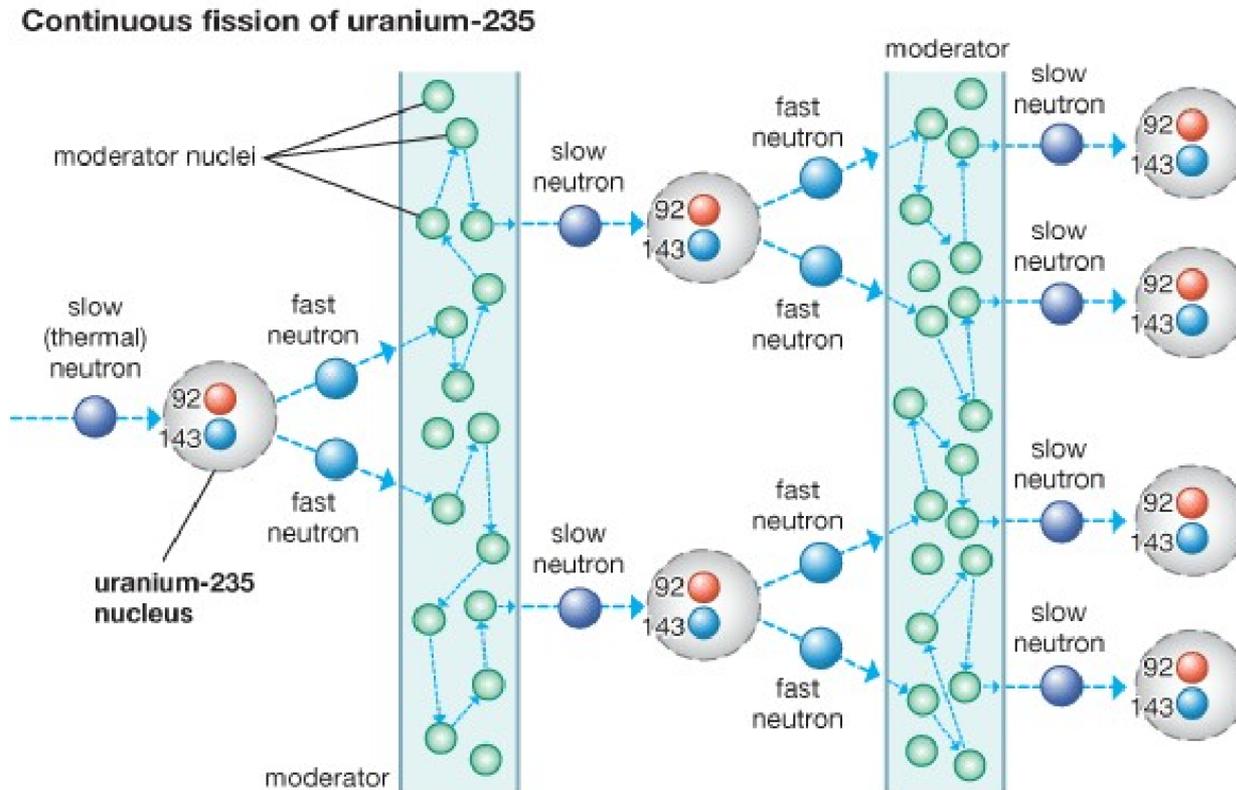
- Cattura del neutrone e fissione con emissione di altri neutroni
- Cattura del neutrone e diseccitazione per emissione gamma (n, γ)
- Scattering elastico del neutrone



- Fissione favorita a basse energie (neutroni termici) per ^{235}U
- Per ^{238}U neutroni solo con energie del MeV e comunque la sezione d'urto è soppressa di 2-3 ordini di grandezza rispetto a quella del ^{235}U . **Soglia a ~ 1.5 MeV.**
- **Picchi associati ad eccitazione dei livelli nucleari**

Fissione indotta

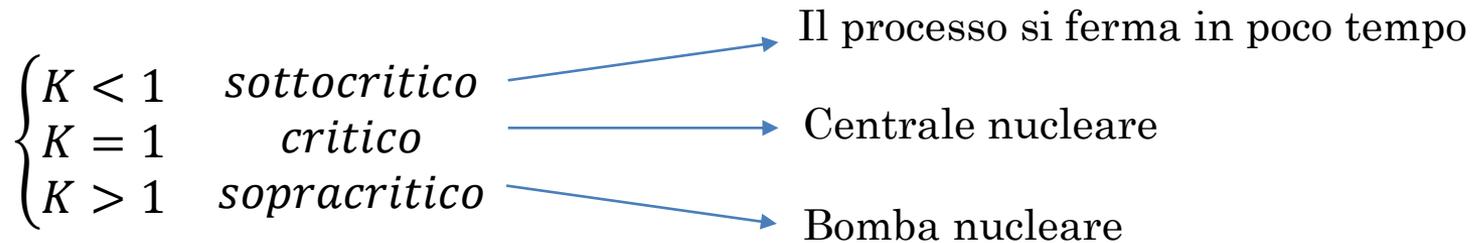
- Reazione a catena
 - Possibilità di auto-mantenimento della produzione di energia
 - Controllo della reazione attraverso moderatore



Fissione indotta

Un parametro fondamentale nella fissione indotta è il *fattore di moltiplicazione K*

$$K = \frac{\text{neutroni presenti in una generazione}}{\text{neutroni della generazione precedente}}$$



App. 42

Il *fattore di moltiplicazione K* dipende da:

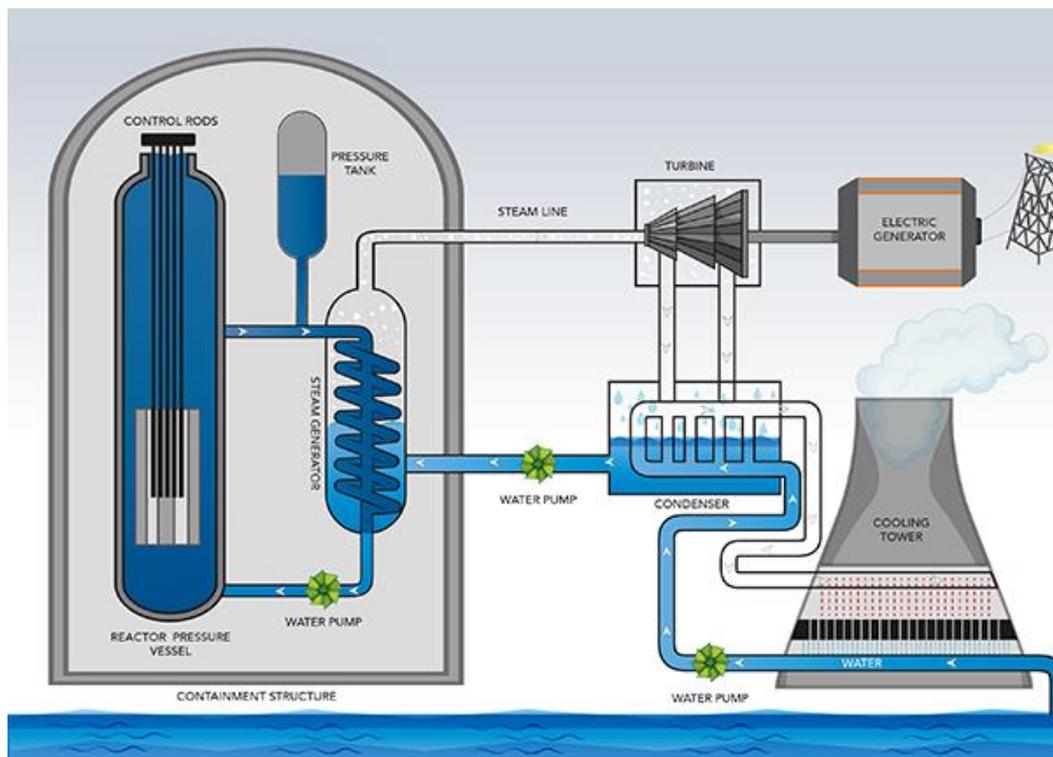
- contenuto di ^{235}U
- tipo di moderatore
- geometria

Influenza il flusso verso l'esterno e la perdita di neutroni.
Le configurazioni sferiche sono favorevoli.

↓
La **massa critica (K=1)** per ^{235}U **puro** è di circa 50 kg, corrispondente ad una sfera con un raggio di soli 8,4 cm!!

Reattore nucleare a fissione

Per funzionare il reattore ha bisogno di uranio arricchito in ^{235}U . L' ^{238}U può catturare neutroni e produrre ^{239}Np che decade in ^{239}Pu che a sua volta ha elevata sezione d'urto per cattura di neutroni.



Componenti di un reattore:

- **Combustibile**

(^{235}U arricchito – 2-3%)

- **Moderatore**

(C (grafite), H_2O , D_2O (acqua pesante))

- **Barre di controllo**

(Cd, ...)

Il fattore di moltiplicazione K in un reattore non è costante ma varia seguendo l'evoluzione del combustibile

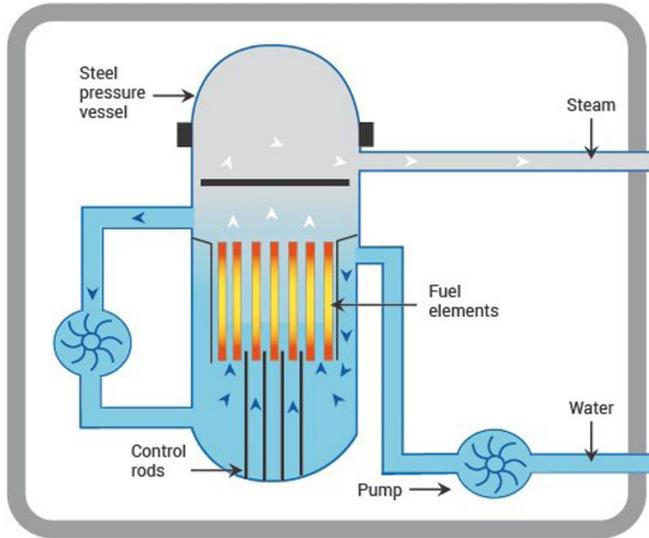
Quali moderatori? C (grafite), H_2O , D_2O (acqua pesante)

Se il moderatore è H_2O non si può utilizzare uranio naturale perché i neutroni vengono catturati nella reazione $n + p \rightarrow d + \gamma$

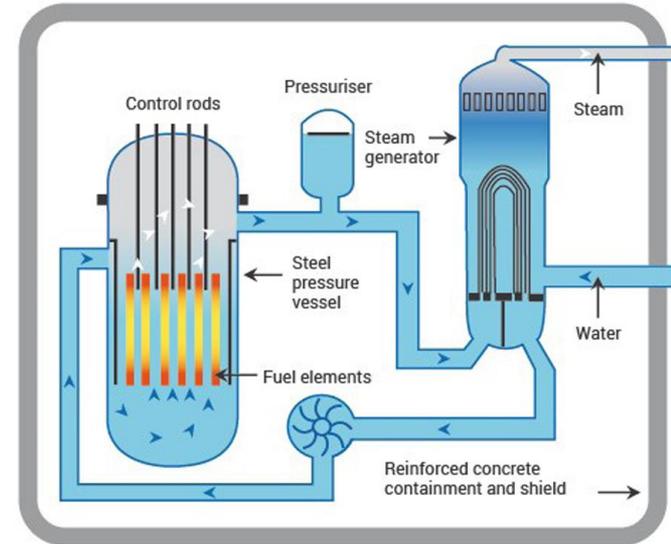
Reattore nucleare a fissione

Molte tipologie di reattori differenti.... Un paio di esempi di reattori ad acqua

Boiling-water Reactor (BWR)



Pressurized-water Reactors (PWR)



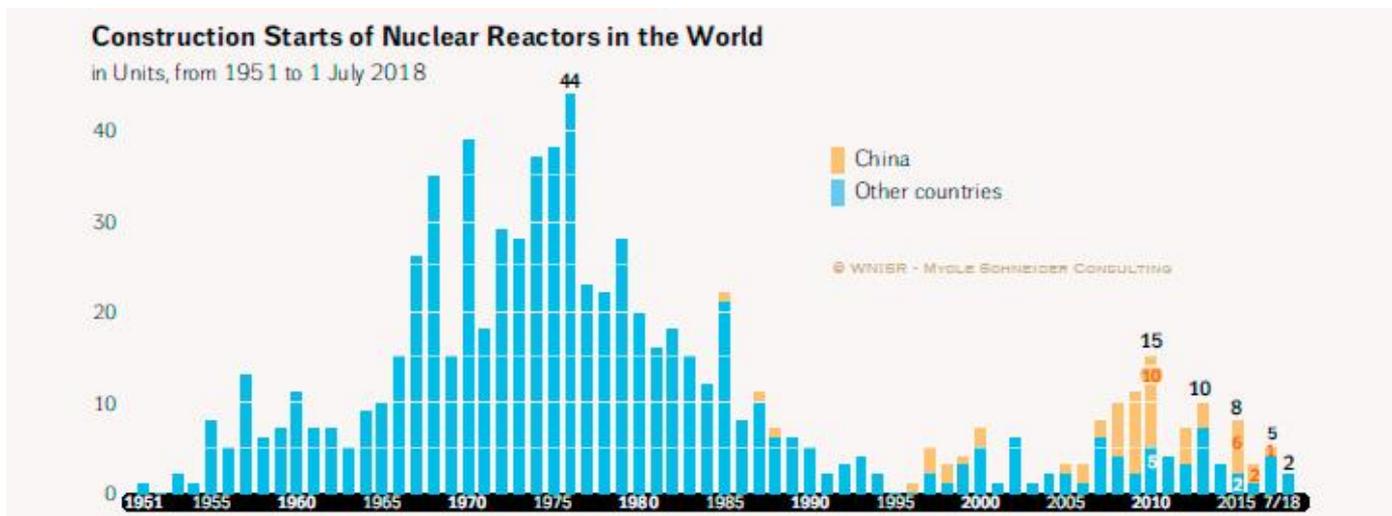
.... e molte altre (anche più recenti!)

Tipologie di reattori (ma in continua evoluzione):

- ~89,5% reattori moderati e raffreddati con acqua
- 6% reattori moderati e raffreddati con acqua pesante
- 2% raffreddati con acqua e moderati con graffite
- ~ 0,5% reattori veloci raffreddati con metallo liquido



Reattori nucleari a fissione nel mondo



Applicazioni comuni dei reattori di ricerca nel mondo

Type of application ^a	Number of research reactors involved ^b	Number of Member States hosting such facilities
Teaching/training	161	50
Neutron activation analysis	116	49
Radioisotope production	82	41
Neutron radiography	70	37
Material/fuel irradiation	67	26
Neutron scattering	44	28
Geochronology	23	20
Transmutation (silicon doping)	22	15
Transmutation (gemstones)	19	12
Neutron therapy, mainly R&D	15	12
Nuclear data measurement	14	7
Other ^c	117	34

IAEA
International
Atomic
Energy
Agency

<https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc65-inf2.pdf>

Reattori nucleari a fissione nel mondo

Reattori nucleari **di potenza** in funzione e in costruzione (2020)

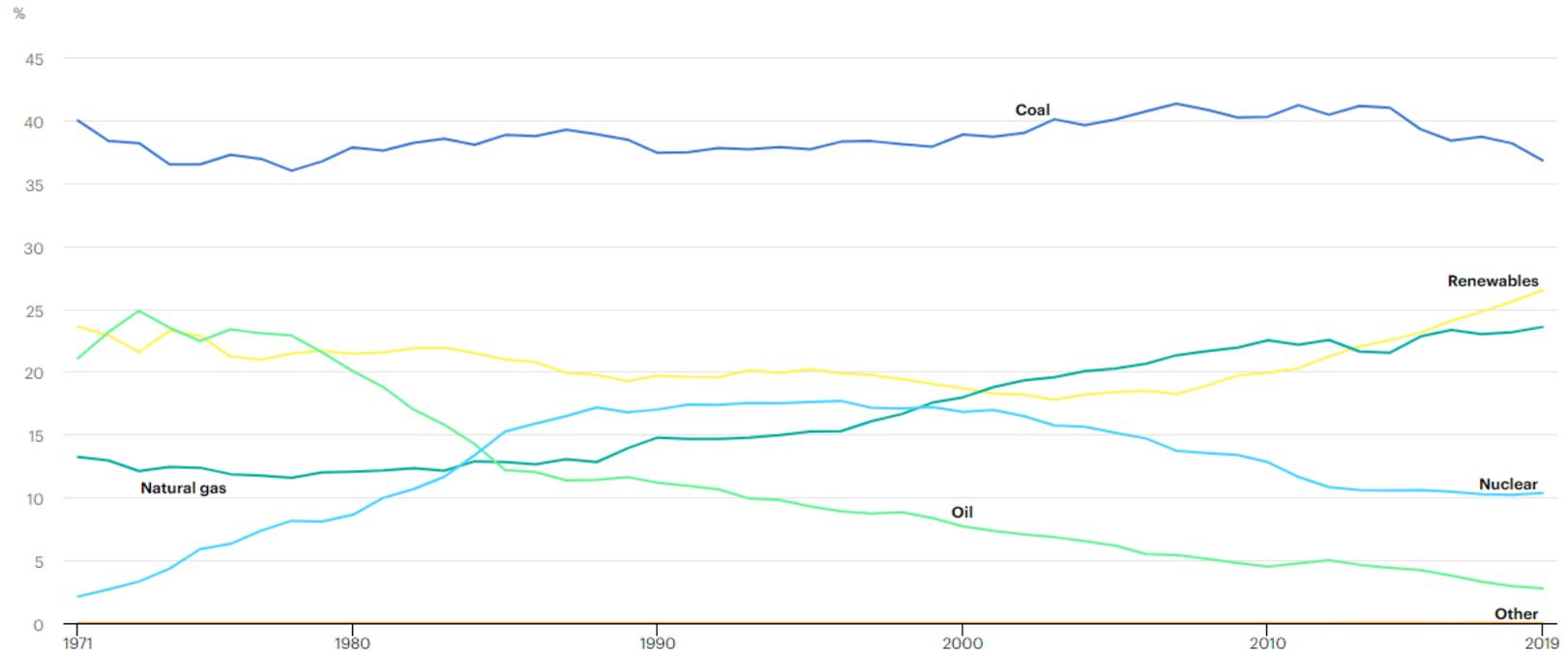
COUNTRY	In operation	Under constr
ARGENTINA	3	1
ARMENIA	1	
BANGLADESH		2
BELARUS	1	1
BELGIUM	7	
BRAZIL	2	1
BULGARIA	2	
CANADA	19	
CHINA	50	13
CZECH REPUBLIC	6	
FINLAND	4	1
FRANCE	56	1
GERMANY	6	
HUNGARY	4	
INDIA	22	7
IRAN	1	1
JAPAN	33	2

COUNTRY	In operation	Under constr
KOREA	24	4
MEXICO	2	
NETHERLANDS	1	
PAKISTAN	5	2
ROMANIA	2	
RUSSIAN FEDERATION	38	3
SLOVAKIA	4	2
SLOVENIA	1	
SOUTH AFRICA	2	
SPAIN	7	
SWEDEN	6	
SWITZERLAND	4	
TURKEY		2
UKRAINE	15	2
UNITED ARAB EMIRATES	1	3
UNITED KINGDOM	15	2
UNITED STATES OF AMERICA	94	2
Total	442	52

<https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc65-inf2.pdf>

Reattore nucleare a fissione

Produzione mondiale di elettricità per combustibile



IEA. All Rights Reserved

● Nuclear ● Coal ● Oil ● Natural gas ● Renewables ● Other

<https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview/world>

<https://www.iea.org/countries/italy>

Reattore nucleare a fissione

Alla fine del 2020, la capacità nucleare mondiale era di 392,6 GW generata da 442 reattori nucleari operativi in 32 paesi



~ 1 GW per centrale



Centrali a carbone attive in Italia nel 2022 (dismesse entro il 2025)

Portovesme (Sardegna)	480 MW
Torrevaldaliga (Lazio)	1.980 MW
Porto Torres (Sardegna)	600 MW
La Spezia (Liguria)	682 MW
Fusina (Veneto)	976 MW
Monfalcone (Friuli)	336 MW
Brindisi (Puglia)	2.640 MW

Combustibile	Potere calorifico [MJ/kg]
Gasolio	44,4
Benzina	43,6
GPL	46,1
Metano	52
Carbone (coal)	29,6
Legna secca	17
Zucchero	17
Olio di semi	37
Burro	30

Quanta energia viene prodotta dalla fissione di 1 kg di ^{235}U ?

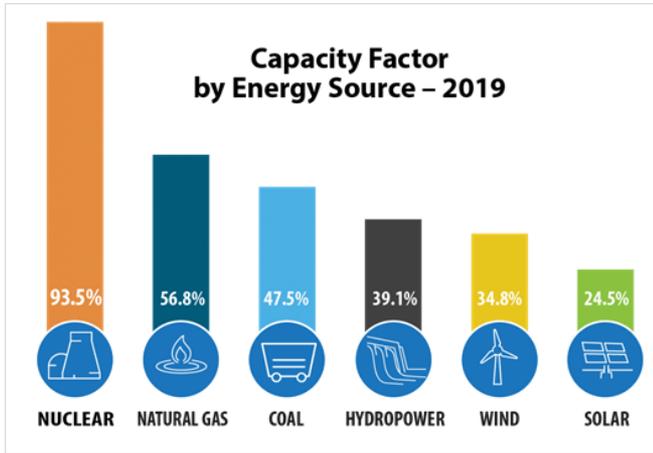
$$N_{fissione} = \frac{1000 \text{ g}}{235} \cdot 6.02 \cdot 10^{23} = 2.6 \cdot 10^{24} \text{ nuclei/kg} \quad E_{fiss} \approx 200 \text{ MeV}$$

$$E = 200 \text{ MeV} \cdot 2.6 \cdot 10^{24} \frac{\text{nuclei}}{\text{kg}} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}} = 83 \cdot 10^6 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Conto approssimativo... bisogna tenere conto delle efficienze etc. ma restituisce un'idea dell'ordine di grandezza...

Reattore nucleare a fissione

Vantaggi



IAEA report:

‘As a clean, reliable, sustainable and modern energy source, nuclear power makes a significant contribution to reducing greenhouse gas emissions worldwide’

Svantaggi

- Scorie
- Costo costruzione nuove centrali
- ...



Reattore nucleare a fissione – ‘Previsioni’ per il futuro...

Dal report IAEA, nel 2050

Low Case Projection

7% ↓

decrease compared to today's installed capacity of **392 GW(e)** to about **363 GW(e)**

corresponding to a **6%** share of electricity generation

High Case Projection

82% ↑

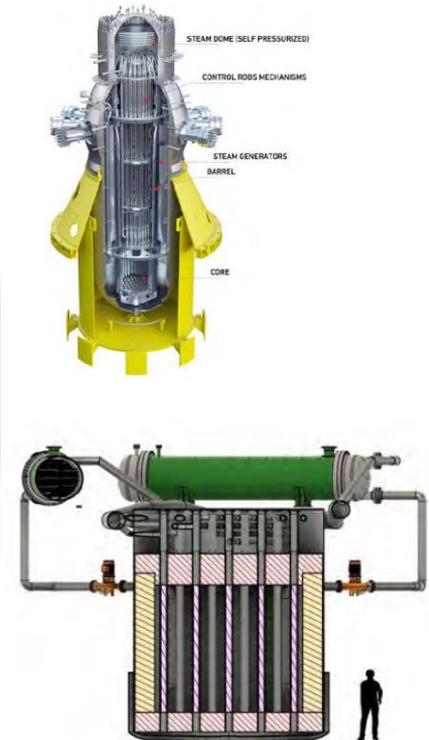
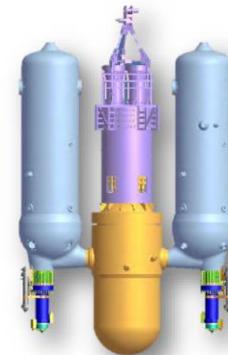
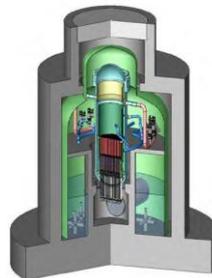
increase compared to today's installed capacity of **392 GW(e)** to about **715 GW(e)**

corresponding to a **11%** share of electricity generation

Scelta non solo di carattere tecnico/scientifico...

Small Modular Reactor (SMR – Potenza <200 MW)

- Notevole e crescente interesse per gli SMR, in particolare nelle **località remote** o nei paesi con reti più piccole.
- Alla fine del 2020 almeno 16 nazioni avevano programmi attivi per la progettazione e lo sviluppo tecnologico di SMR.
- Circa **50 progetti** e concetti SMR a livello globale.

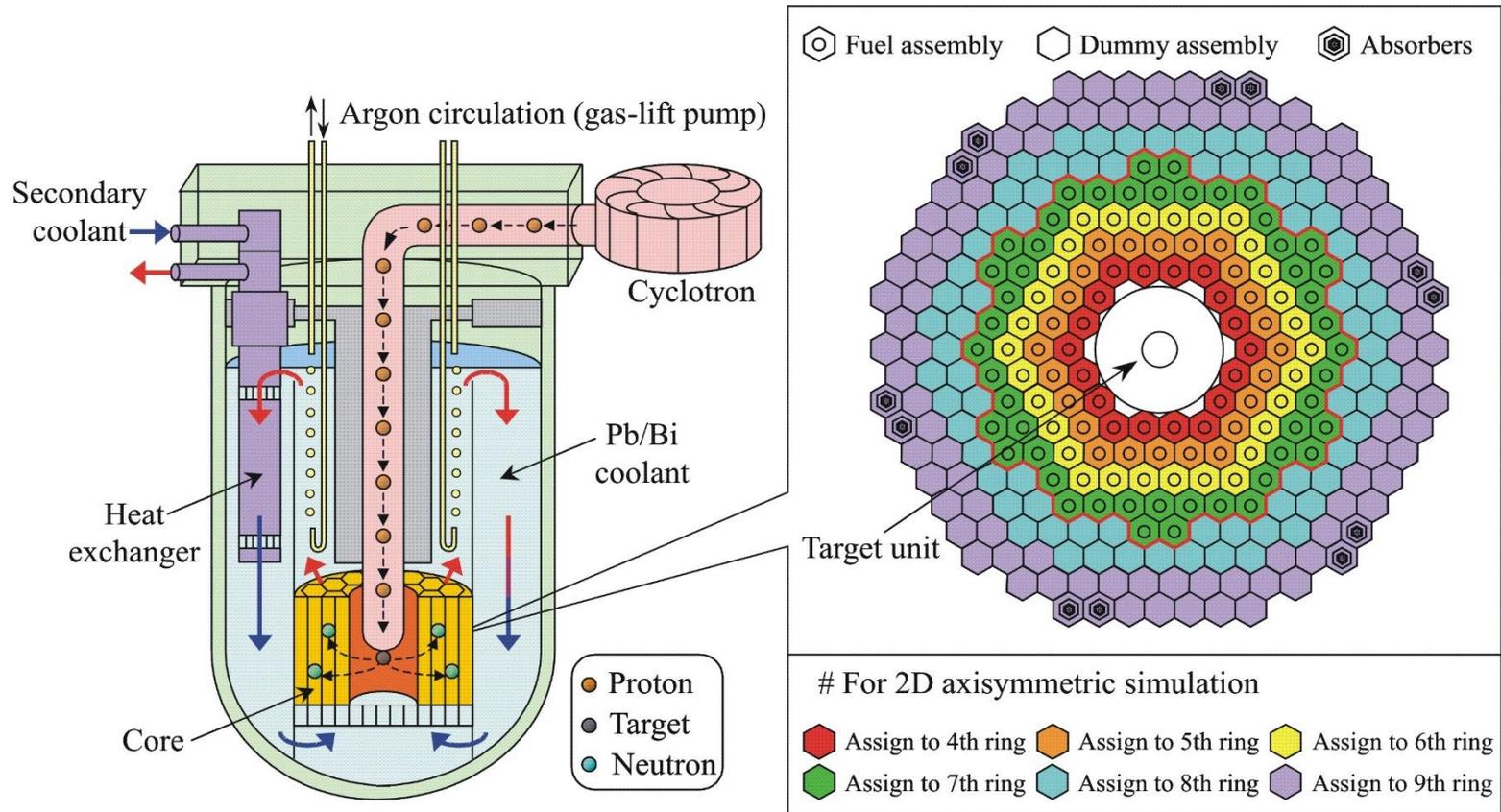


Accelerator-Driven Systems (ADS)

L'ADS è un sistema composto da un reattore subcritico e un acceleratore di protoni esterno.

Può utilizzare combustibili con grandi frazioni di elementi transuranici.

Il fascio di protoni entra nel nocciolo del reattore attraverso un tubo a vuoto e colpisce il bersaglio di piombo con conseguente emissione di neutroni.



Reattore nucleare a fissione naturale

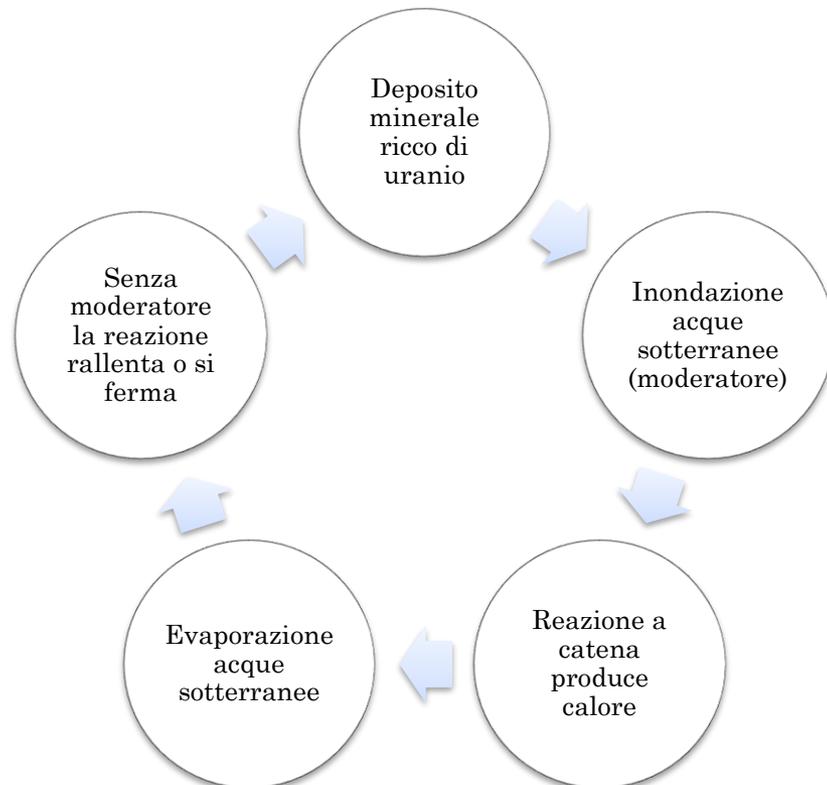
Prima di passare alla fissione una curiosità... nel 1972 in Gabon furono trovati 17 reattori nucleari a fissione naturali attivi 2 miliardi di anni fa e rimasero attivi per un milione di anni



Lo sappiamo dallo studio delle concentrazioni relative degli isotopi presenti nella miniera

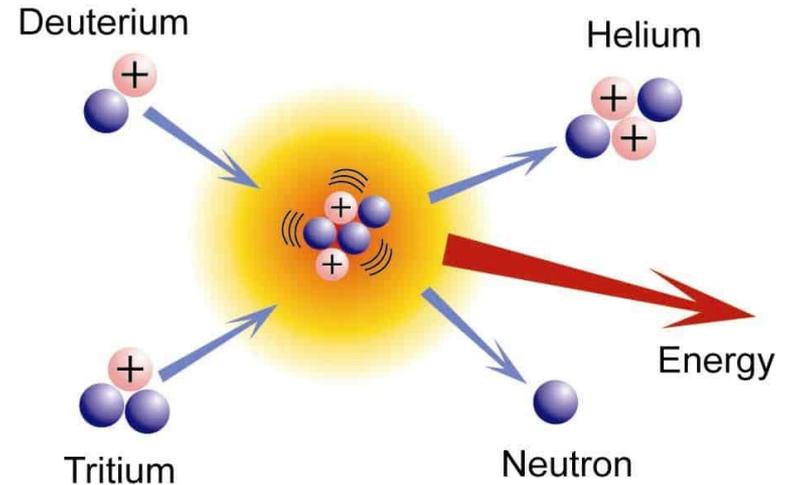
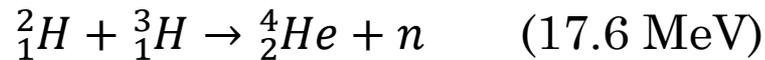
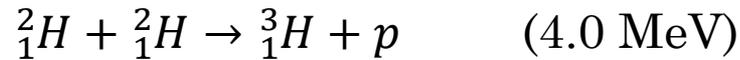
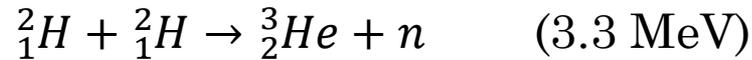
Condizioni affinché si abbia un reattore nucleare naturale:

- Deposito deve contenere almeno 10% di U e spessore di almeno 3 m
- Deve essere presente un moderatore
- Non devono esserci troppi inibitori (isotopi che assorbono i neutroni)
- L'uranio deve avere almeno il 3% di ^{235}U (miliardi di anni fa)



Fusione nucleare

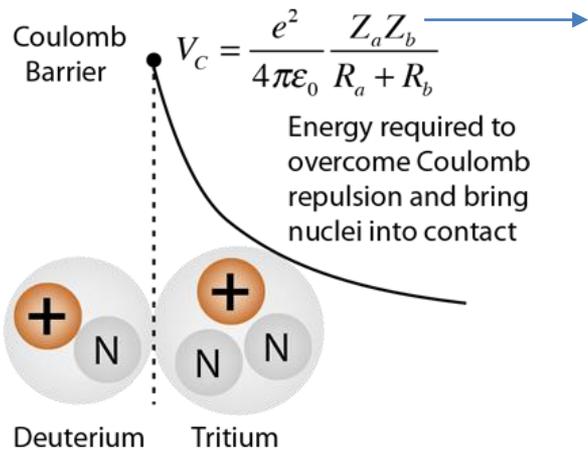
Alcuni esempi di reazioni di fusione:



Devo superare la barriera di repulsione coulombiana affinché si possa avere fusione nucleare.

Necessaria elevata energia cinetica dei nuclei

Fusione nucleare



Più semplice per nuclei di H (un solo protone)

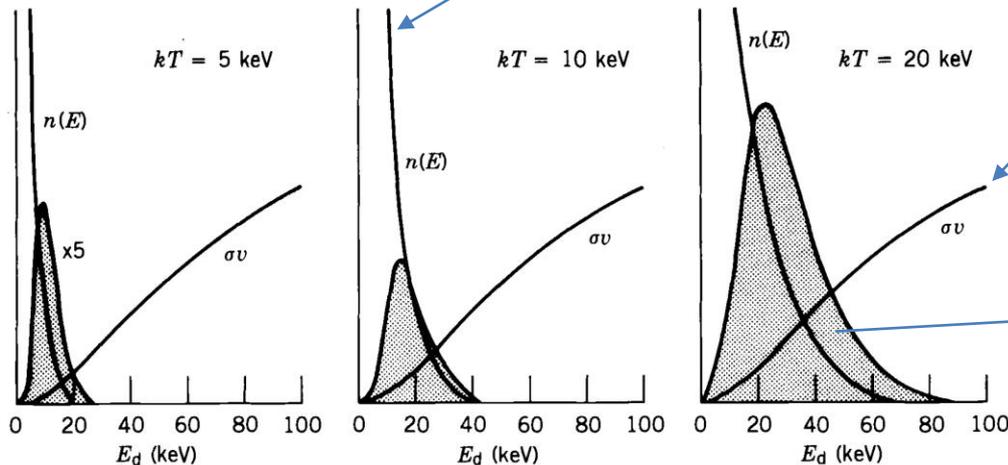
Nella reazione deuterio-trizio: $V_C = 0.4 \text{ MeV}$

Energia termica gas a T ambiente $\rightarrow kT = 0.025 \text{ eV}$

A $T = 10^7 \text{ K} \rightarrow kT \sim \text{keV}$ ma

- Distribuzione Maxwell-Boltzmann
- Effetto tunnel

$$\sigma \propto \frac{1}{v^2} e^{-2G}$$

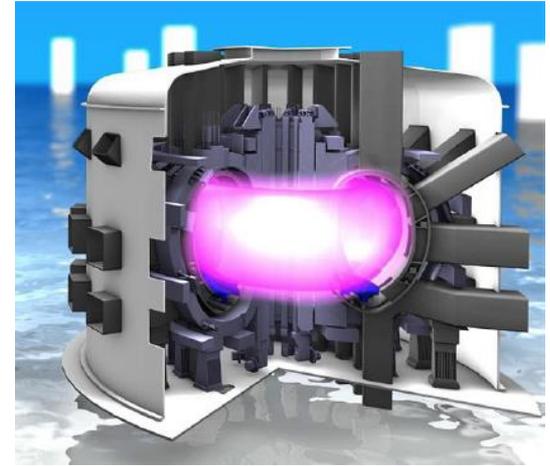


$\sigma v \propto$ tasso di reazioni nucleari

La regione scura indica il prodotto tra le due curve

Fusione nucleare

- Il plasma deve essere controllato e l'energia prodotta dalle reazioni di fusione deve essere trasformata in energia elettrica



Vantaggi della Fusione Nucleare

- **Combustibili primari disponibili in grande quantità** (mare, rocce) quasi ovunque nel mondo
- I **prodotti** delle reazioni sono **elementi stabili** (^4He , n)
- I materiali attivati dal bombardamento neutronico possono essere riutilizzati dopo 100 anni dalla **dismissione**
- In un reattore a fusione **non sono possibili reazioni autosostenute incontrollate**

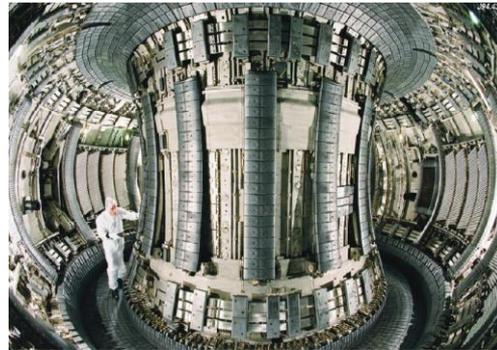
Fusione nucleare

- Occorre generare un plasma caldo (10-100 MK)
 - Il plasma deve essere confinato in una regione di spazio evitando il contatto con le pareti del 'contenitore': si usano intensi campi magnetici (TOKAMAK)

JET (UK)

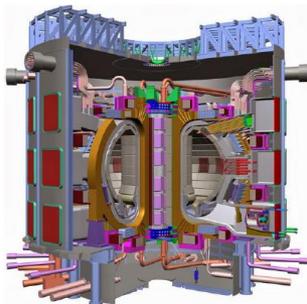


80 m³

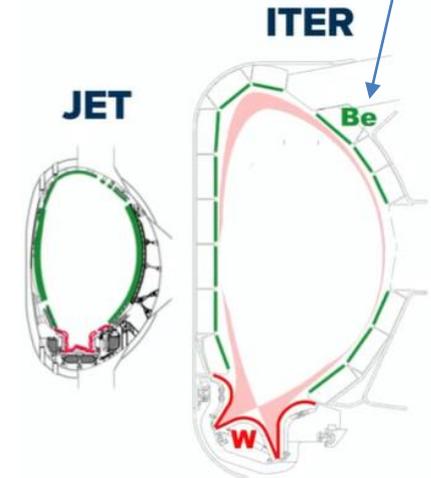


Stesso materiale
per le pareti

ITER (FRANCE)



800 m³

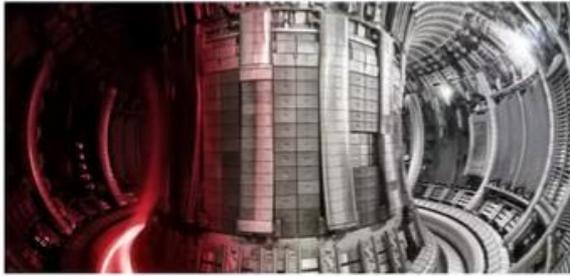


ITER è già stato costruito all'80% e inizierà a funzionare nel 2025/2026

Fusione nucleare

JET è l'unico tokamak, prima di ITER, in grado di operare utilizzando deuterio-trizio

From JET to powerplant



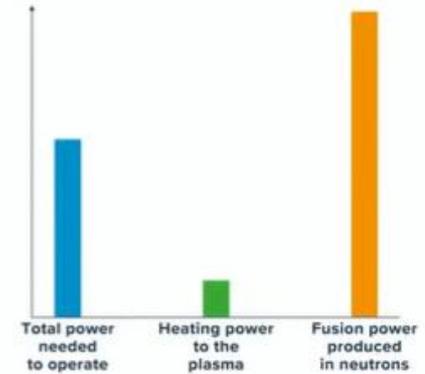
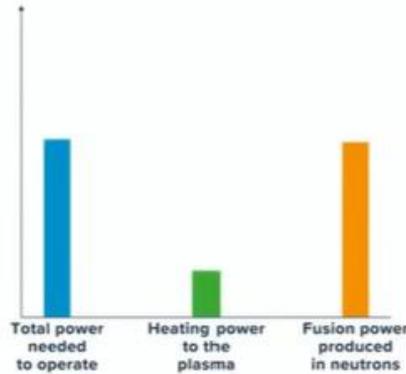
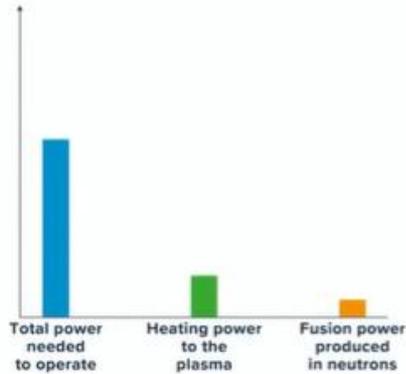
JET



ITER



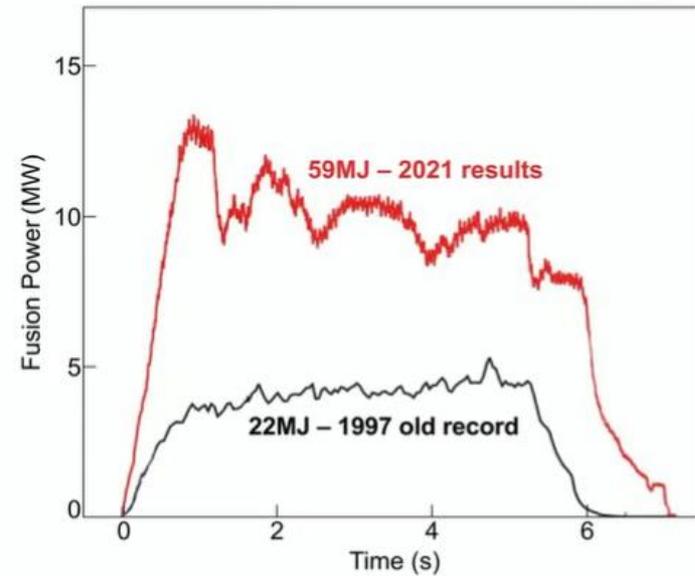
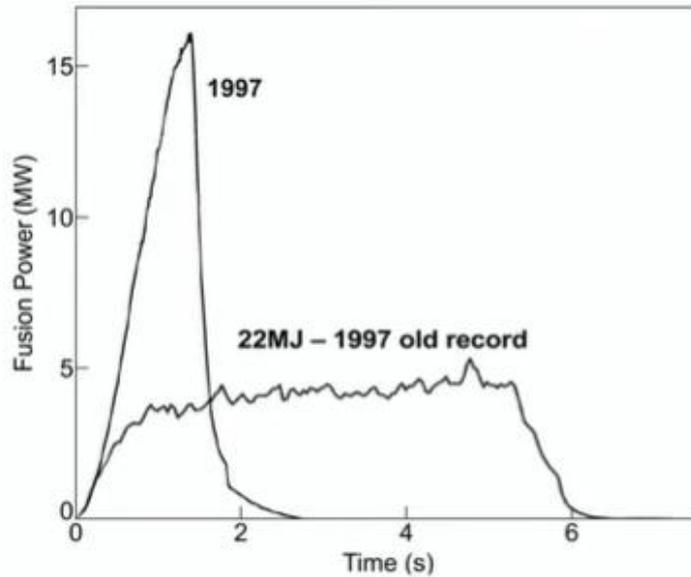
Powerplant



↓
Verranno utilizzati magneti superconduttori

Fusione nucleare - JET

Annuncio dei risultati del Joint European Torus (JET) Deuterio-Trizio – Febbraio 2022



La fissione a JET è stata mantenuta per tutto il tempo previsto per il funzionamento dei magneti/sistemi di raffreddamento (5 secondi)

Scopo di ITER:

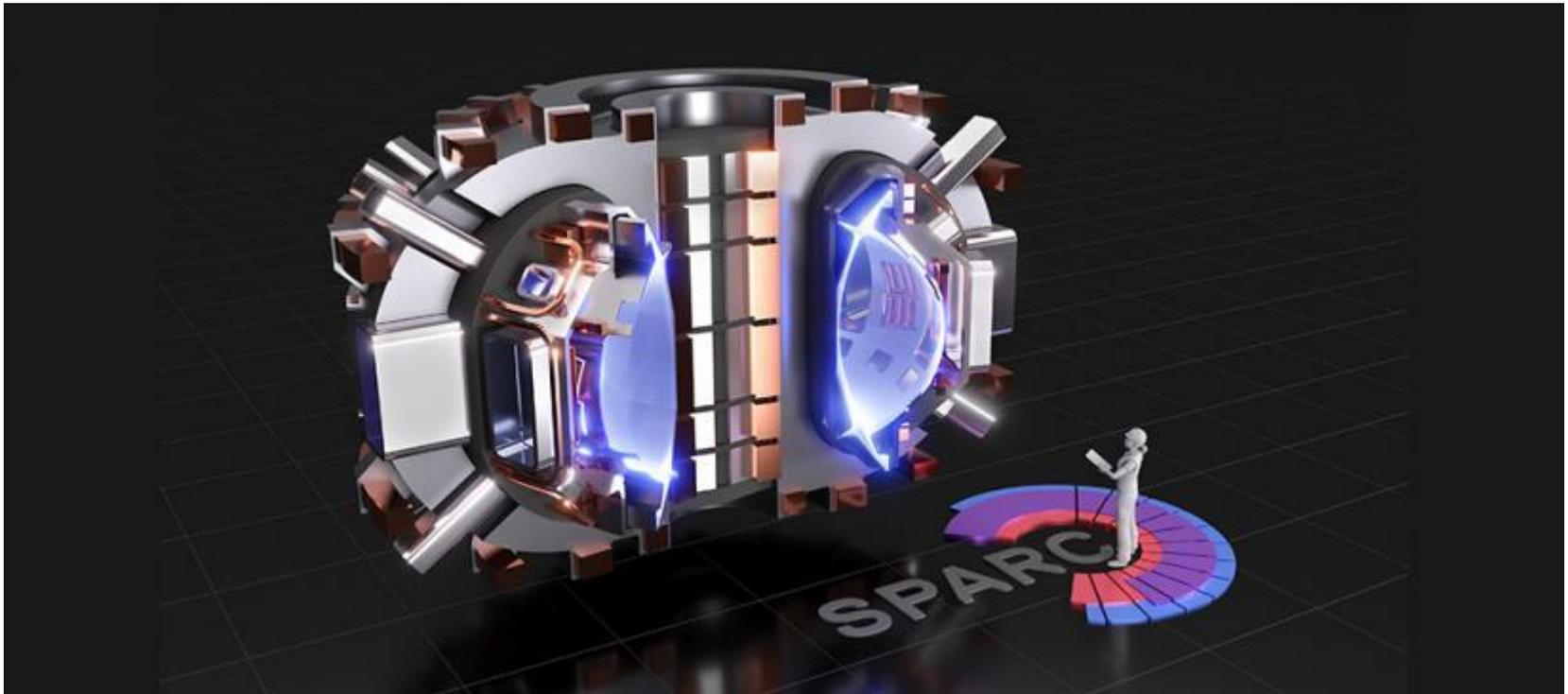
- Raggiungere 500 MW di potenza di fusione per >300 secondi
- Dimostrazione in linea di principio del funzionamento in regime stazionario (>300 MW per un'ora)

Fusione nucleare

Esistono diversi altri progetti per la fusione oltre a JET/ITER. Ad esempio:

SPARC

Il MIT in collaborazione con una startup privata sta sviluppando un dispositivo compatto e ad alto campo.



- ITER è un dispositivo a campo e densità moderate, SPARC è un dispositivo ad alto campo e densità elevata
- SPARC è attualmente in fase di progettazione ingegneristica

Fusione nucleare nelle stelle

Nelle stelle il discorso è un po' diverso...

L'elemento maggiormente presente nelle stelle (come in tutto l'Universo) è l'idrogeno (90%).

