



Centro  
Italiano  
Sostenibilità  
Energia



# FUSIONE, FUSIONE FREDDA E DINTORNI

## il futuro dell'energia dell'atomo

Flavio Parozzi  
CISE2007, Milano

*conferenza in collaborazione con l'Associazione Cernuschese Astrofili*

*Biblioteca Civica, Sala Camerani  
via Fatebenefratelli, Cernusco sul Naviglio*

*giovedì 23 Novembre 2017, ore 21.00*

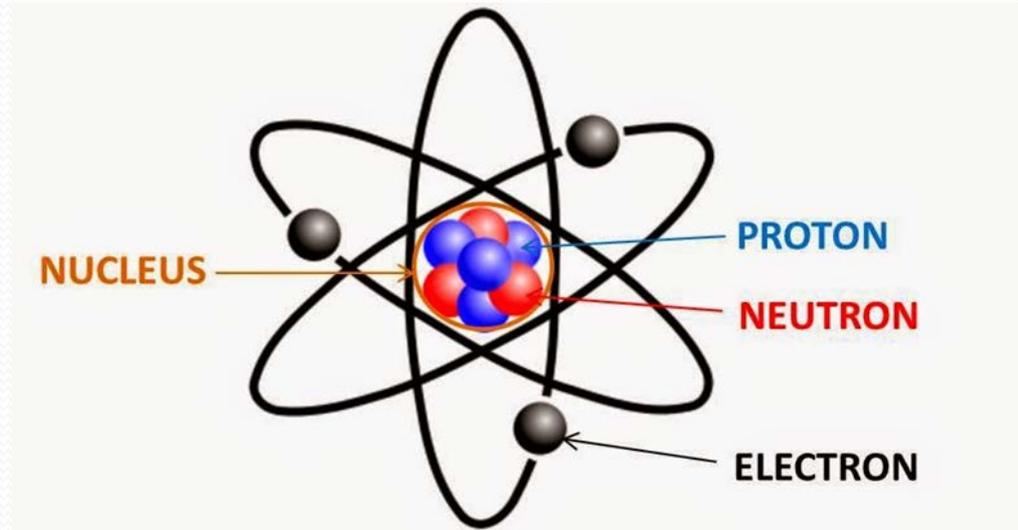
## *programma della conferenza...*

- L'energia imprigionata nell'atomo
- Le reazioni nucleari di interesse energetico
- I reattori nucleari a fissione
- I grandi progetti sulla fusione controllata «calda»
- Le illusioni e le speranze sulla fusione «fredda»
- Gli impieghi presenti e futuri nel settore spaziale
- I programmi di conversione degli esplosivi nucleari in energia elettrica
- *risposte alle domande del pubblico*

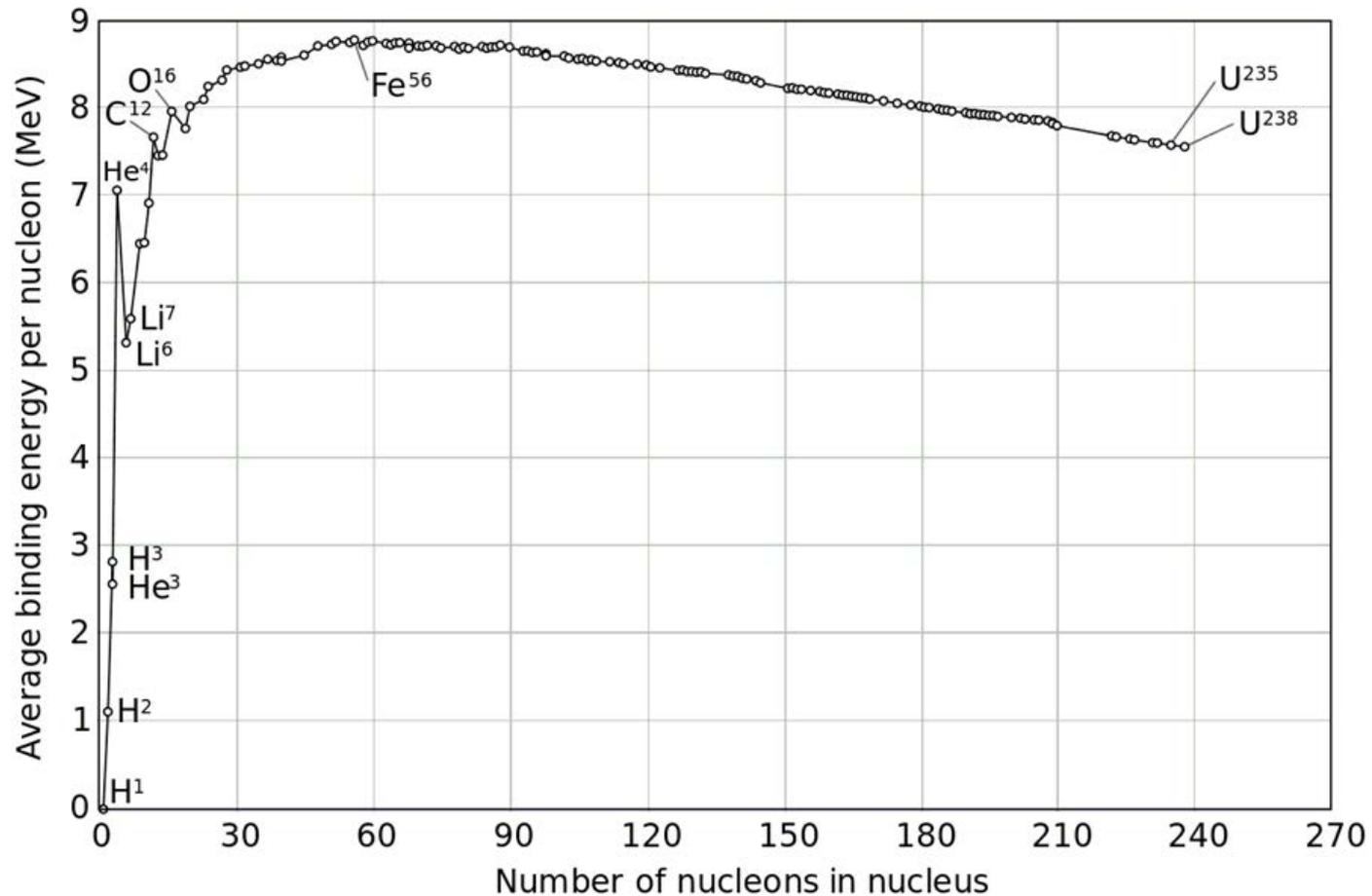


## L'energia imprigionata nell'atomo

- solamente alcune combinazioni di protoni e neutroni sono stabili grazie all'interazione nucleare forte
- senza i neutroni, i protoni da soli si respingerebbero!
- può essere estratta molta energia se il nucleo si porta in una configurazione più stabile, rilasciando particelle dotate di elevata energia cinetica, come nel caso della radioattività, della fusione e della fissione



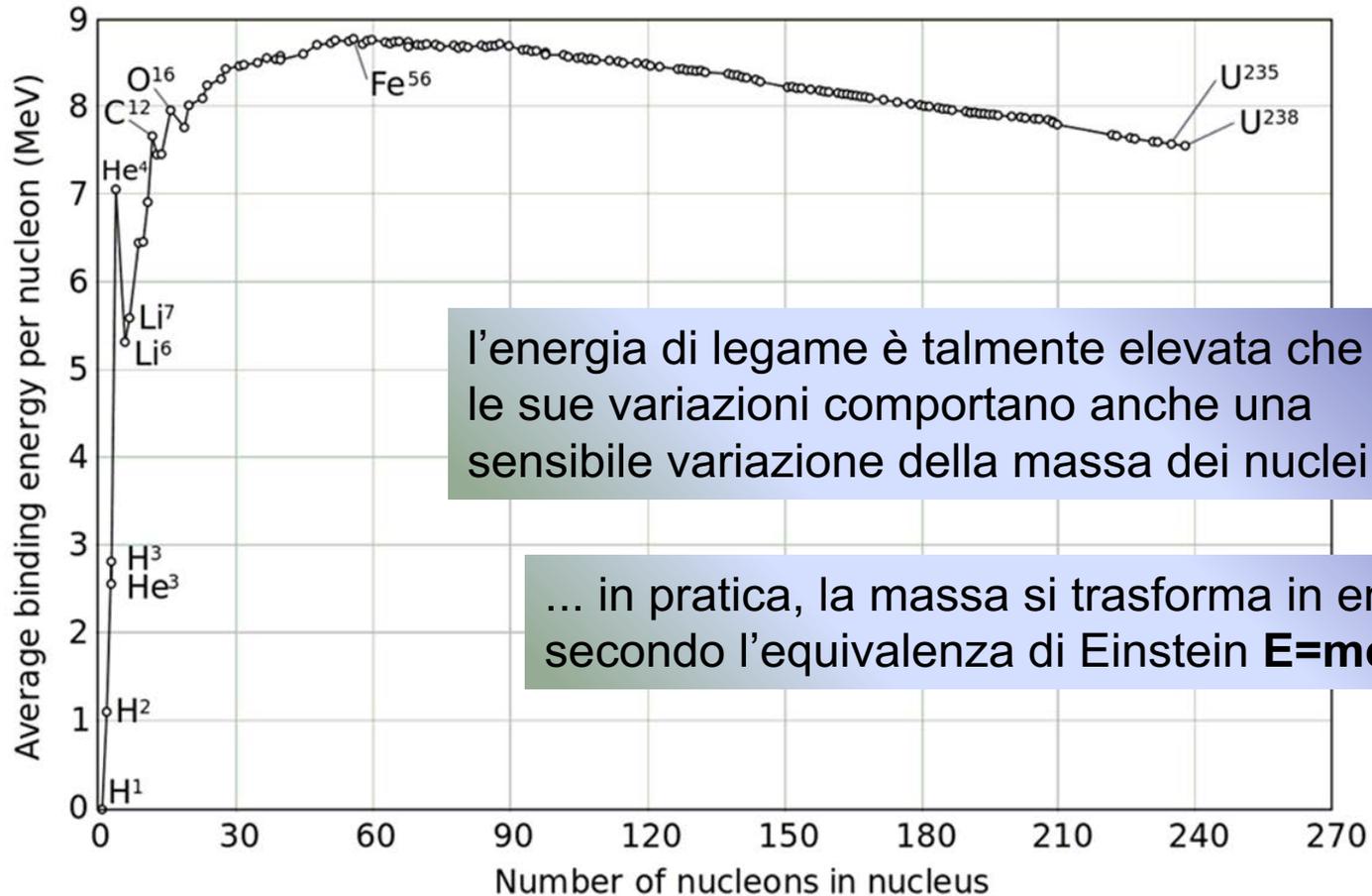
# L'energia imprigionata nell'atomo



Energia media di legame per nucleone in funzione del numero di nucleoni nel nucleo (protoni + neutroni).

Il culmine dell'energia di legame corrisponde al  $^{62}\text{Ni}$ , che risulta il nucleo più strettamente legato

Seguono  $^{56}\text{Fe}$  e  $^{58}\text{Fe}$



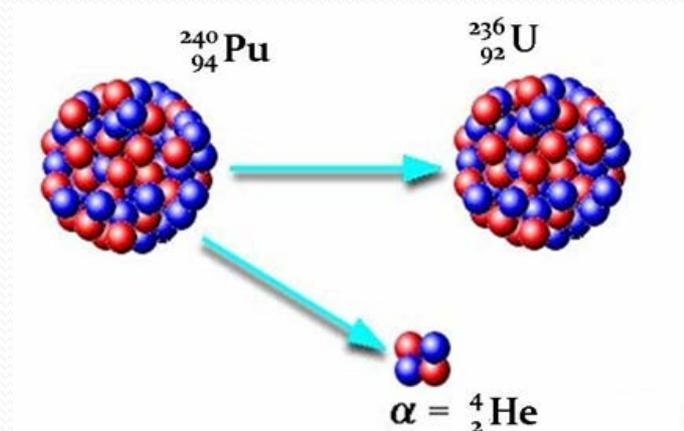
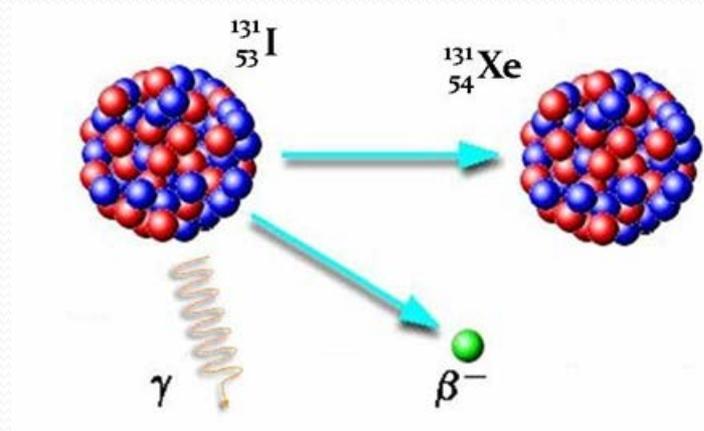
l'energia di legame è talmente elevata che le sue variazioni comportano anche una sensibile variazione della massa dei nuclei

... in pratica, la massa si trasforma in energia, secondo l'equivalenza di Einstein  $E=mc^2$

# Le reazioni nucleari di interesse energetico

il **decadimento radioattivo** consiste nell'emissione di particelle:

- nuclei di  ${}^4\text{He}$  (radiazione  $\alpha$ )
- elettroni (radiazione  $\beta^-$ ) o positroni (radiazione  $\beta^+$ )
- fotoni (radiazione  $\gamma$ )
- neutroni

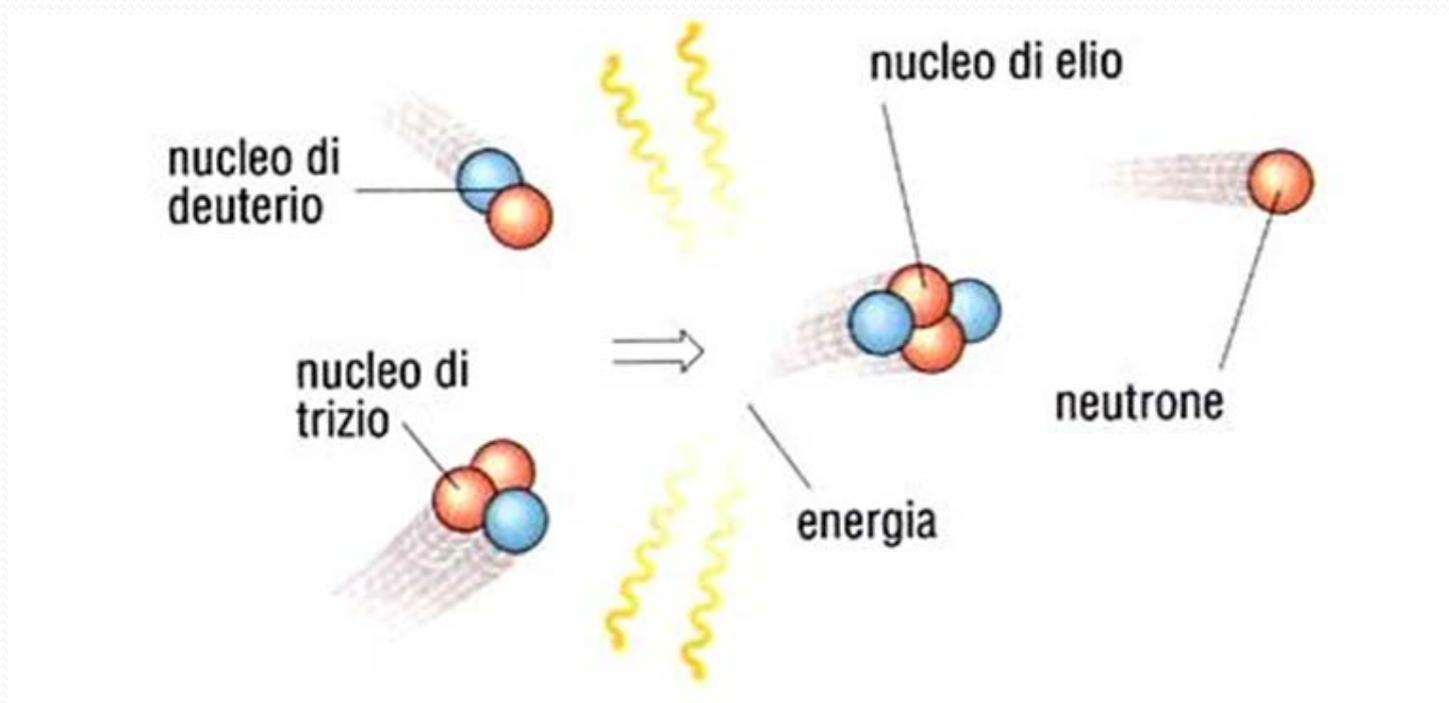


non viene sfruttato come fonte energetica su grande scala, e viene usato per alimentare strumentazione remota (es.: antenne radio e strumentazione di sonde spaziali)

## Le reazioni nucleari di interesse energetico

A causa della dipendenza dell'energia di legame in funzione del numero di protoni e neutroni presenti, le reazioni più interessanti al fine della produzione energetica possono essere:

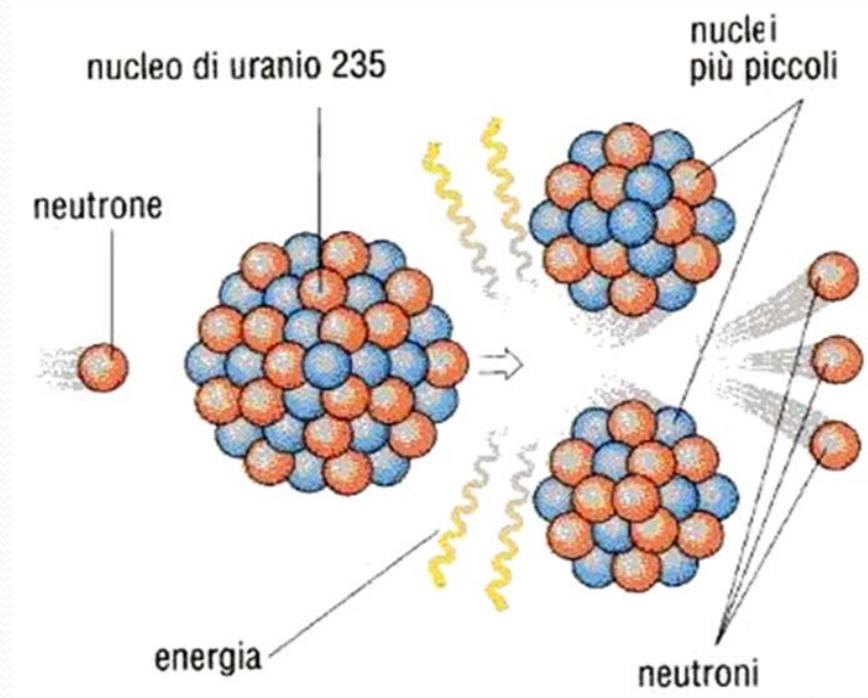
- la **fusione** di nuclei leggeri, come avviene nelle stelle



## Le reazioni nucleari di interesse energetico

A causa della dipendenza dell'energia di legame in funzione del numero di protoni e neutroni presenti, le reazioni più interessanti al fine della produzione energetica possono essere:

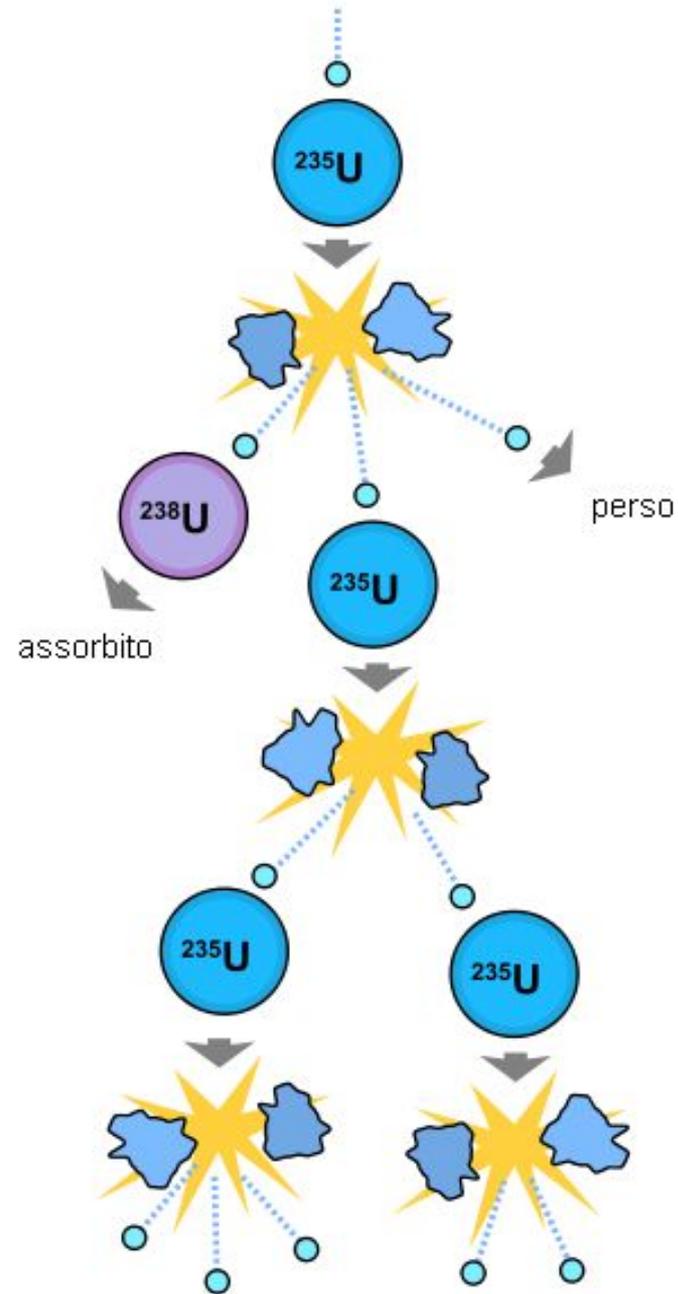
- la **scissione (fissione)** di nuclei pesanti



l'isotopo  $^{235}\text{U}$ , che è lo 0.72% dell'uranio naturale, è in grado di sostenere una reazione di fissione a catena

reazioni a catena sono possibili anche con  $\text{U}^{233}$  e  $\text{Pu}^{239}$

nei reattori tradizionali l'energia è fornita principalmente dalla fissione dell' $\text{U}^{235}$

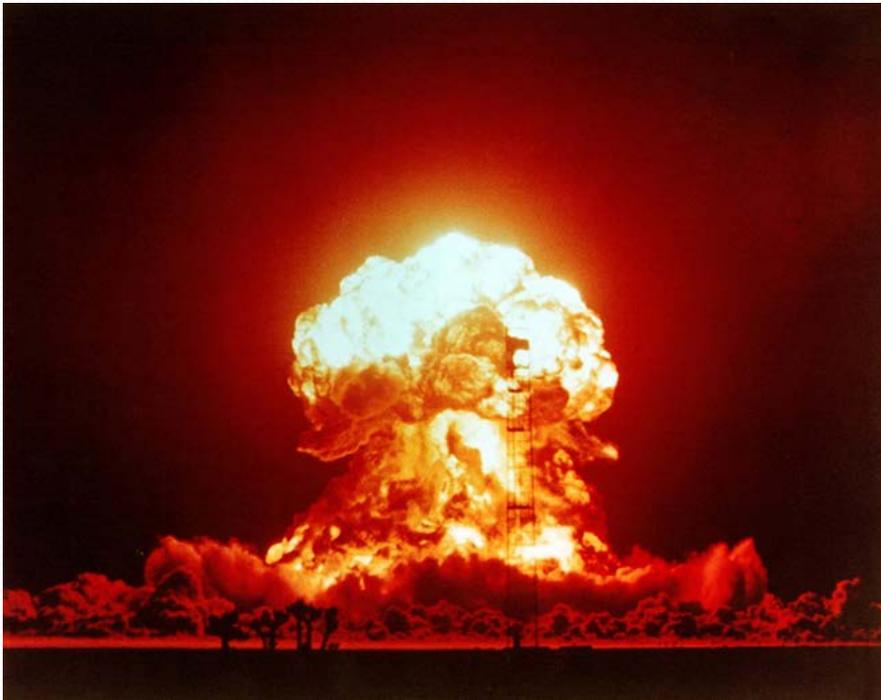


## Confronto con le reazioni chimiche

combustione di 1 kg di idrogeno = 143 MJ

fusione nucleare di 1 kg di isotopi di idrogeno = circa  $3.4 \cdot 10^8$  MJ  
(oltre due milioni di volte)

fissione di 1 kg di  $^{235}\text{U}$  oppure di  $^{239}\text{Pu}$  =  $8.3 \cdot 10^7$  MJ  
(l'energia di circa 2000 t di petrolio)



# Gli attuali reattori nucleari per la generazione elettrica

## Atomic fission succeeds

Dec 2. A group of physicists led by Enrico Fermi has achieved the first controlled nuclear chain reaction, opening the way to both an atomic bomb and nuclear energy.

The scientists built a nuclear pile composed of uranium and graphite in the squash court of the University of Chicago. The crucial moment came at 3:45 p.m. when the removal of control rods showed that neutrons from fissioning uranium atoms split other atoms to keep the chain reaction going. The atomic pile is part of the secret Manhattan Project to build an atomic bomb. Germany is said to have begun a similar effort (→ 7/16/45).

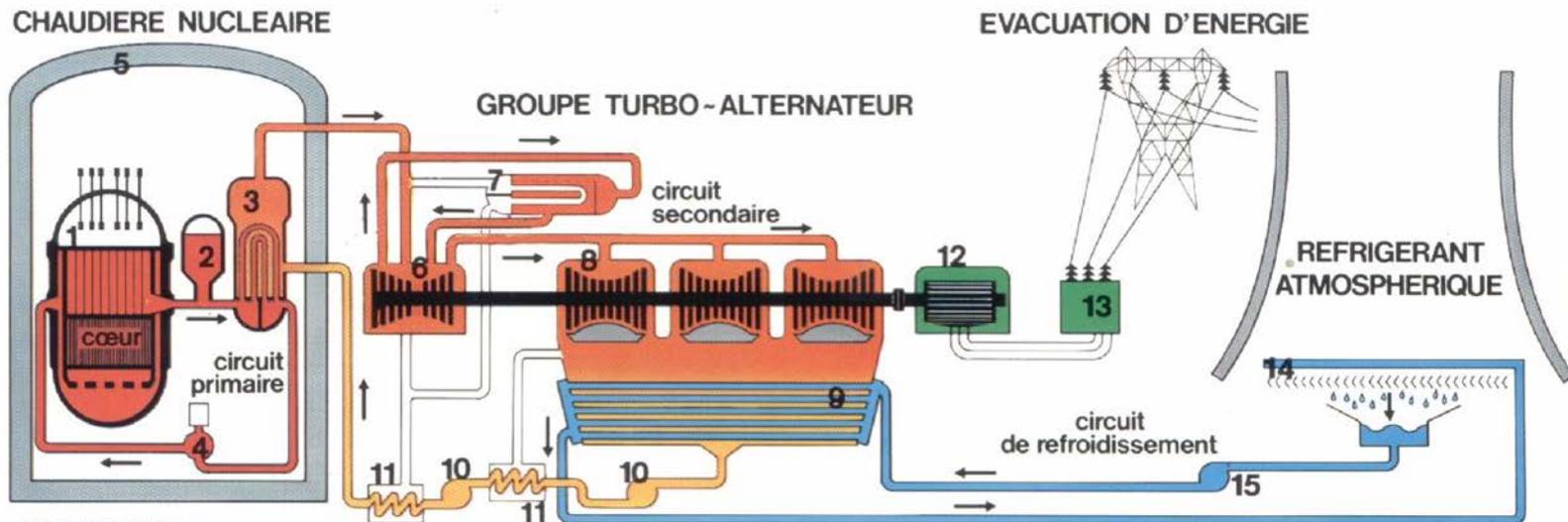


*Fermi, with model of an atom.*

- discendono dalla Pila di Fermi
- utilizzano tutti la **reazione di fissione**
- sono quelli in esercizio, in costruzione o di futura IV Generazione
- il combustibile è principalmente costituito da uranio ( $\text{UO}_2$ ) e, in alcuni casi, anche da plutonio ( $\text{PuO}_2$ )
- possibile impiego del torio (Th) mediante trasmutazione in uranio

# Gli attuali reattori nucleari per la generazione elettrica

Il tipo più diffuso è quello PWR (acqua naturale in pressione a ciclo duale)



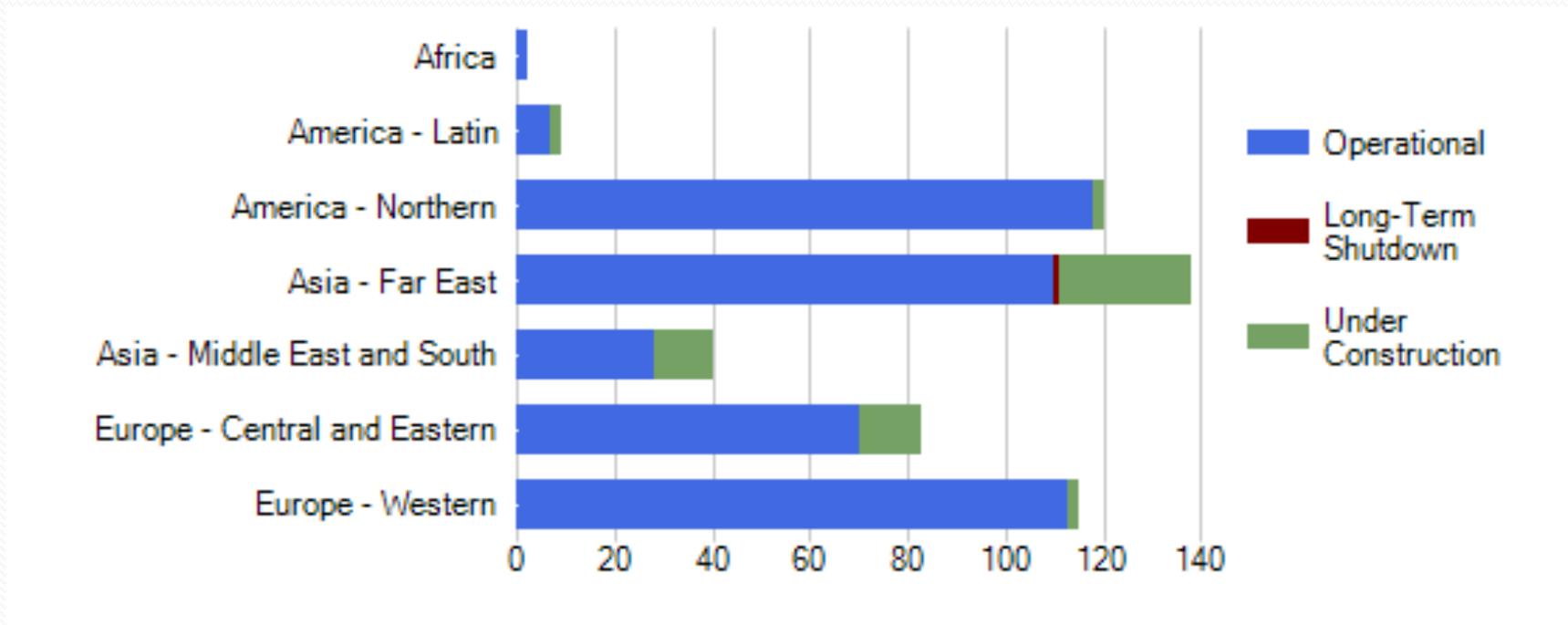
DESSIN : STEPHER

- 1 cuve
- 2 pressuriseur
- 3 générateur de vapeur
- 4 pompe primaire
- 5 enceinte de confinement

- 6 turbine - corps haute et moyenne pression
- 7 séchear-réchauffeur
- 8 turbine - corps basse pression
- 9 condenseur
- 10 pompes

- 11 réchauffeurs
- 12 alternateur
- 13 transformateurs principaux
- 14 échange air-eau
- 15 pompes

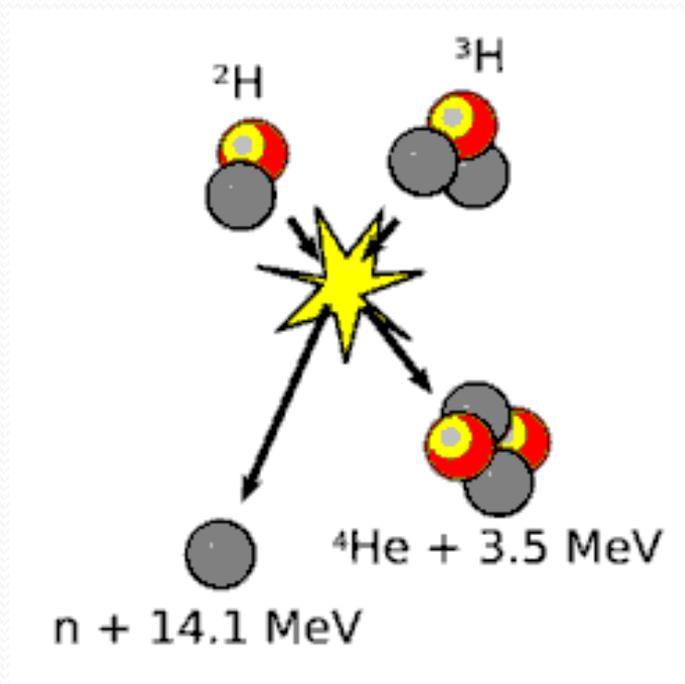
## Gli attuali reattori nucleari per la generazione elettrica



a novembre 2017, nel mondo sono in esercizio 448 reattori di vario tipo per la produzione elettrica e altri 58 sono in costruzione

## I grandi progetti sulla fusione controllata «calda»

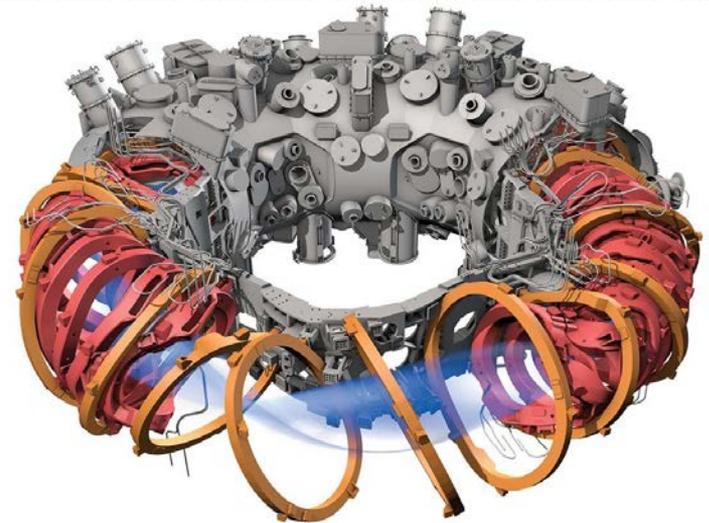
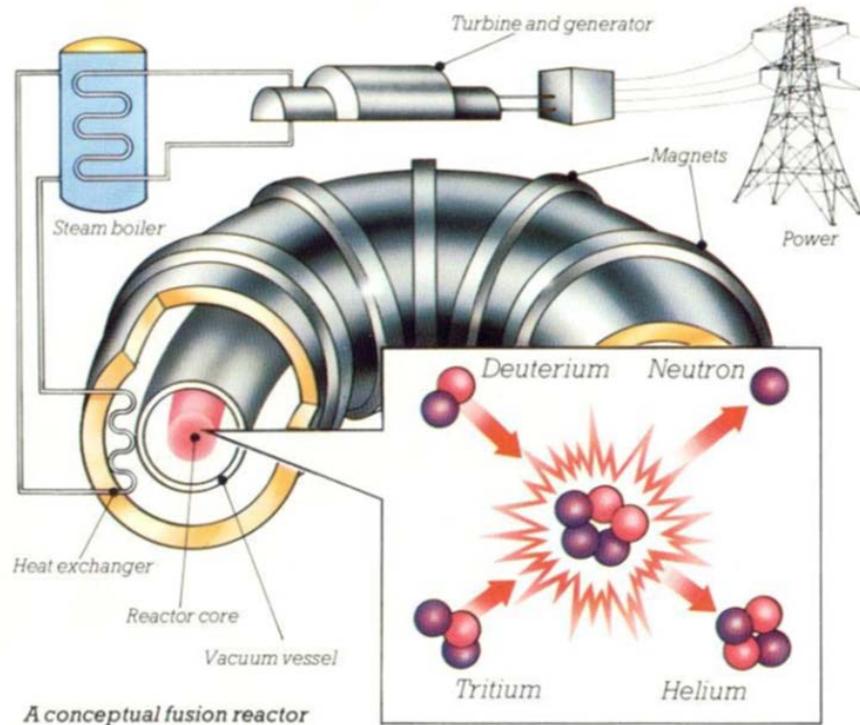
- il combustibile è  $^2\text{H}$  (deuterio) +  $^3\text{H}$  (trizio)
- la reazione di fusione è stata realizzata solo per periodi molto brevi in impianti sperimentali
- non esistono ancora reattori in grado di auto-sostenersi



# I grandi progetti sulla fusione controllata «calda»

i tipi di reattore con cui si pensa di ottenere la fusione nucleare controllata sono principalmente di due tipi:

➤ **a confinamento magnetico**



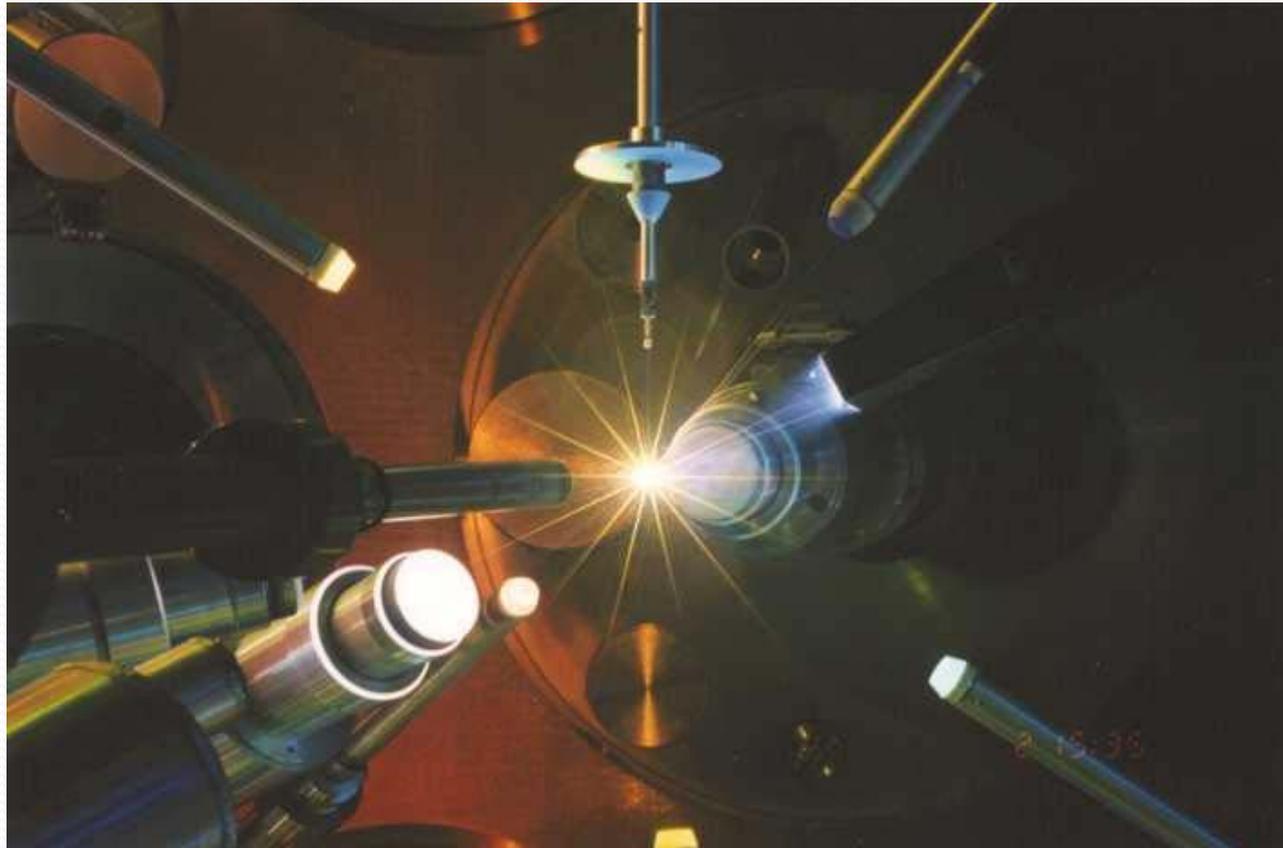
*Stellarator*

*Tokamak*

## I grandi progetti sulla fusione controllata «calda»

i tipi di reattore con cui si pensa di ottenere la fusione nucleare controllata sono principalmente di due tipi:

- **a confinamento inerziale mediante laser**

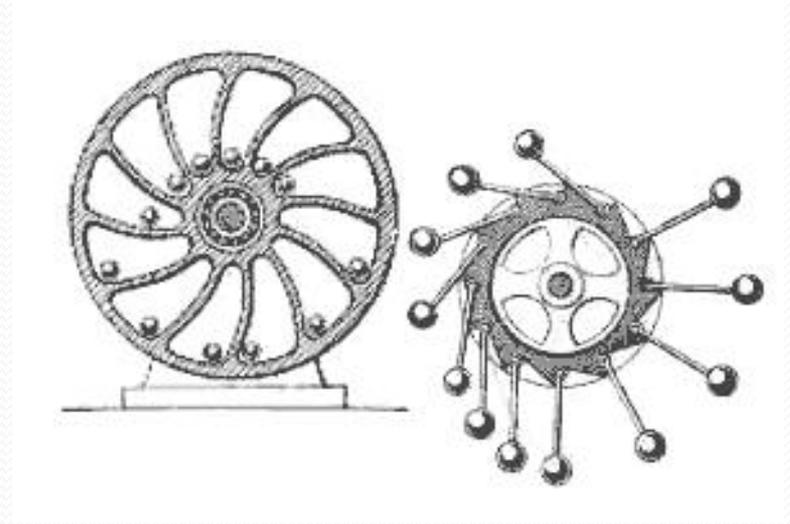
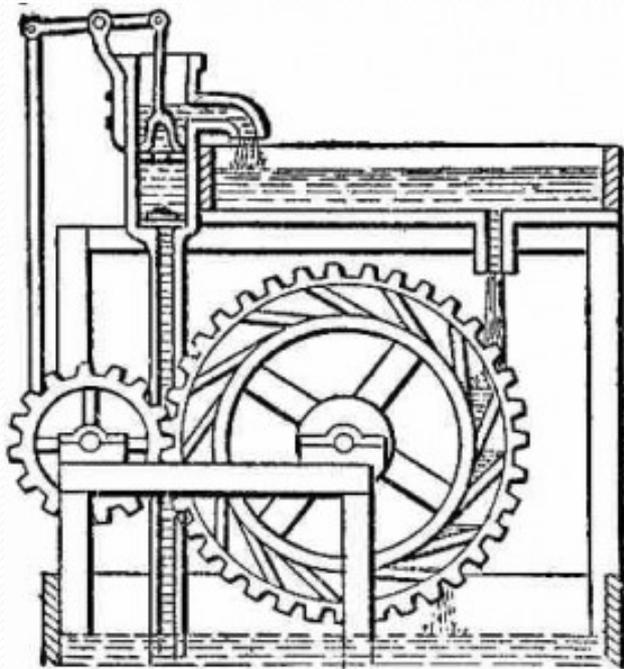


## I grandi progetti sulla fusione controllata «calda»

- il progetto su cui si concentra la maggior parte delle risorse mondiali è a confinamento magnetico con il **tokamak ITER** (International Thermonuclear Experimental Reactor)
- è in costruzione a Cadarache, nel sud della Francia, mediante un consorzio internazionale composto da Unione Europea, Russia, Cina, Giappone, Stati Uniti d'America, India, Corea del Sud



## Le illusioni e le speranze sulla fusione «fredda»



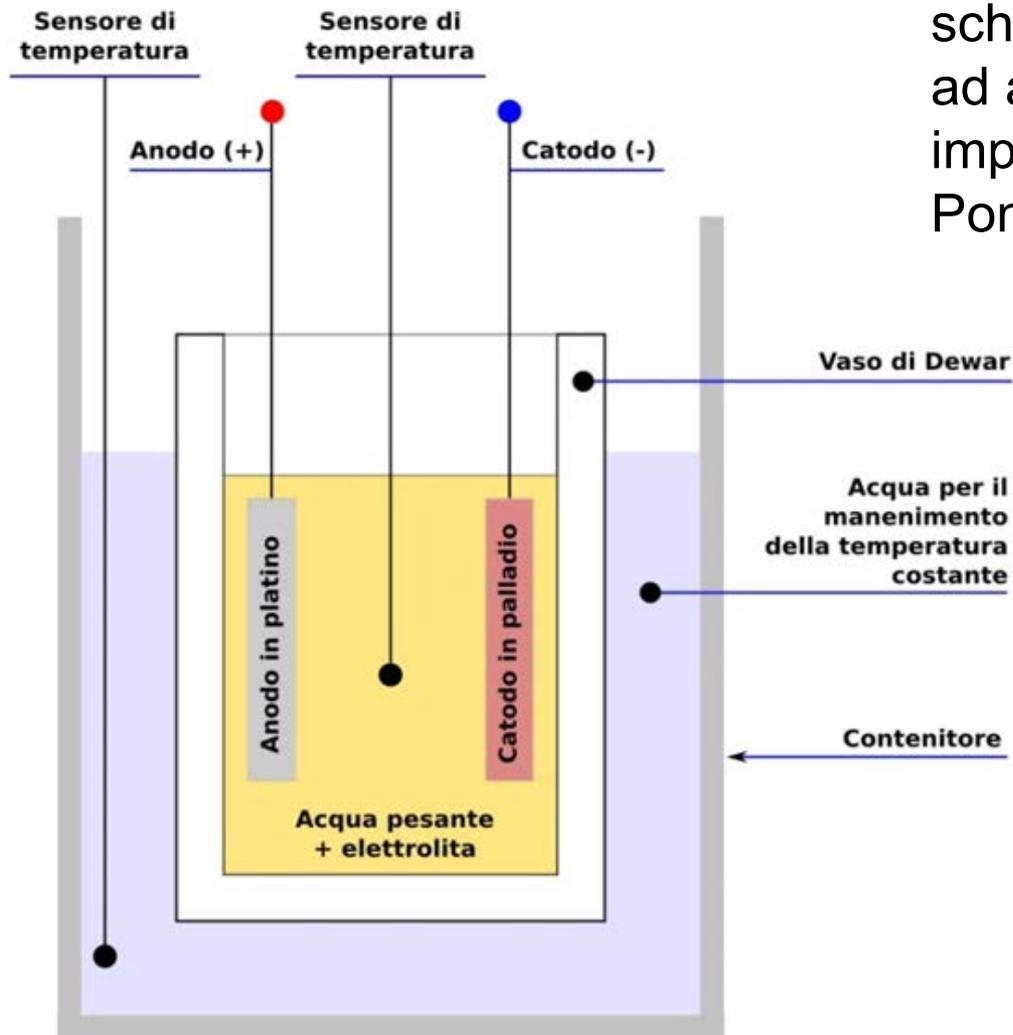
gironzolando tra:

- miti e illusioni pre-scienza moderna
- scienza patologica
- errori di misura
- inganni e speculazioni...

## LENR (Low Energy Nuclear Reactions)

- la categoria è comunemente citata sui giornali come “fusione nucleare fredda”
- secondo alcuni studiosi la fusione dei nuclei leggeri sarebbe possibile a temperature molto più basse di quelle richieste per la fusione nucleare classica, grazie alla presenza di materiali catalizzatori
- sono reazioni per ora solamente ipotizzate e in fase di studio per cercare di spiegare comportamenti ritenuti «anomali» di piccole apparecchiature a scala di laboratorio
- opinioni controverse e scetticismo nell’ambiente scientifico

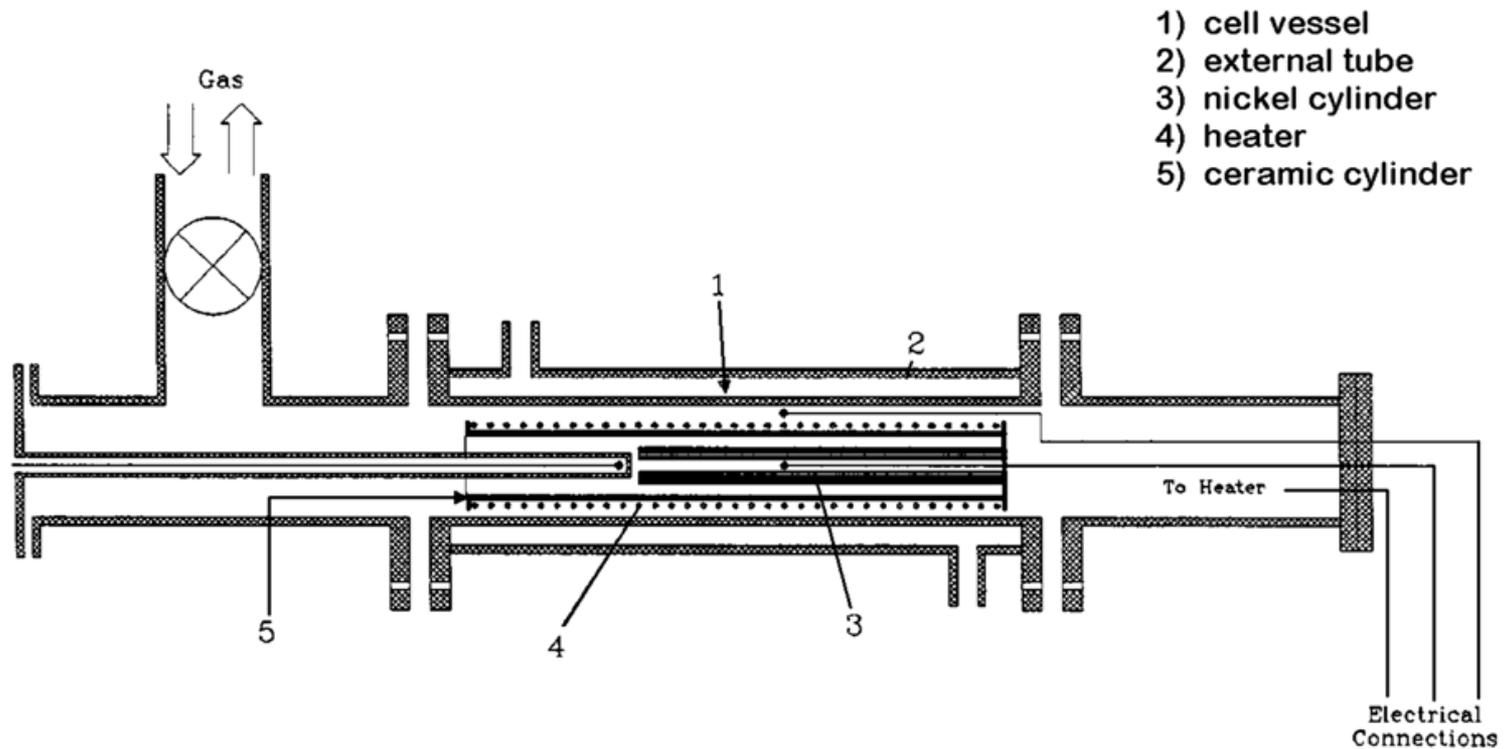
# LENR (Low Energy Nuclear Reactions)



schema della cella elettrolitica ad acqua pesante ( $D_2O$ ) impiegata da Fleischmann e Pons nel 1989

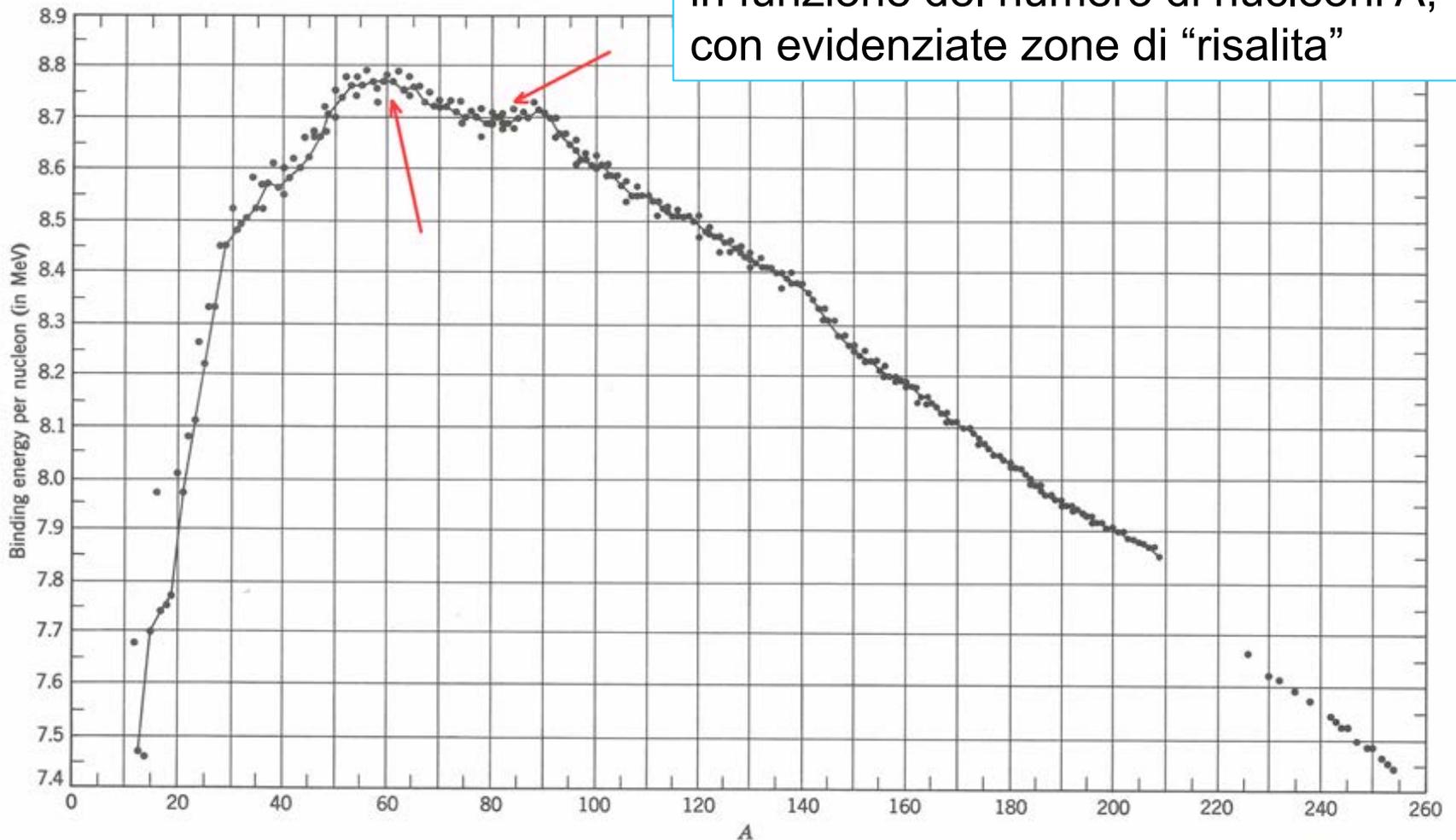
# LENR (Low Energy Nuclear Reactions)

Schema di una cella impiegata da Piantelli e Focardi per lo studio delle reazioni nichel-idrogeno e nichel-deuterio



# LENR (Low Energy Nuclear Reactions)

energia media di legame per nucleone  
in funzione del numero di nucleoni A,  
con evidenziate zone di “risalita”



## LENR (Low Energy Nuclear Reactions)

- un'ipotetica reazione potrebbe essere:  ${}^{62}\text{Ni} + \text{p} \rightarrow {}^{63}\text{Cu} + \Delta E$
- la bassa resa energetica per unità di massa sarebbe compensata dal fatto che i nuclei dei metalli come il nichel pesano molto meno di quello dell'uranio e che quindi in un chilogrammo ce ne sono circa quattro volte di più
- la cattura di un protone da parte di un chilogrammo di nichel fornirebbe circa  $4.8 \cdot 10^{12}$  J, contro gli  $8.3 \cdot 10^{13}$  J/kg forniti dalla fissione dell'uranio o del plutonio

resta il quesito: come portare un protone a colpire un nucleo senza disporre di un acceleratore?

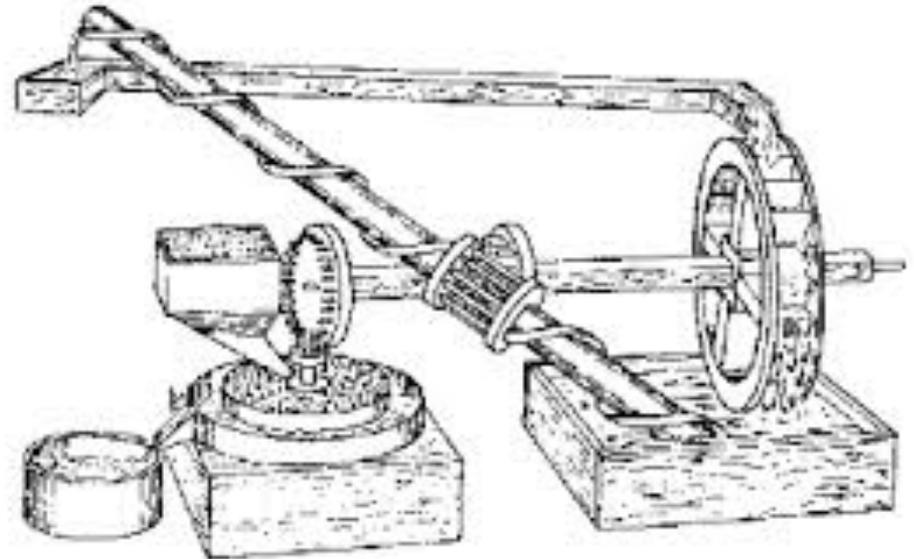
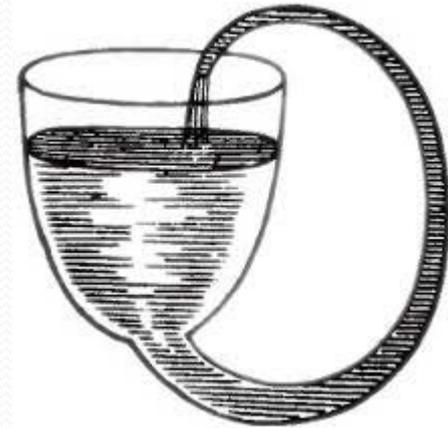
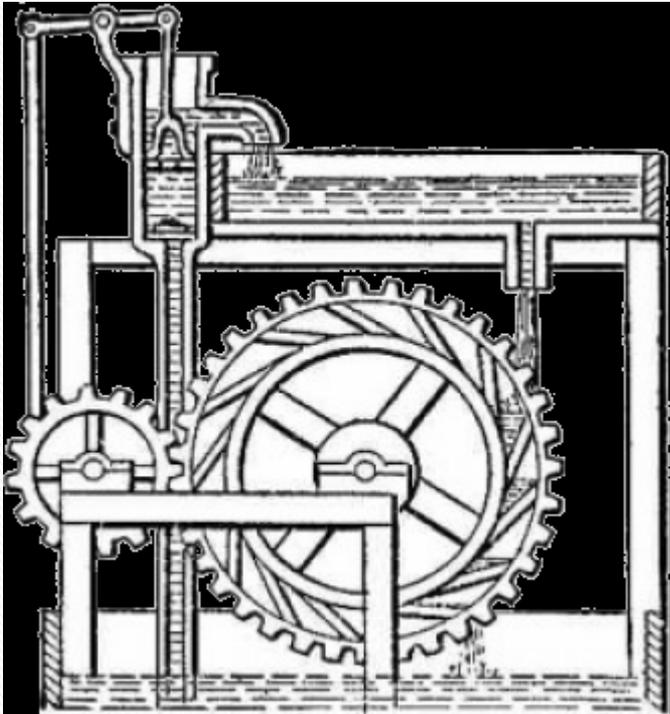
e quale sarebbe la resa energetica netta del processo?

# LENR (Low Energy Nuclear Reactions)

- carenza di *position paper* ufficiali di grandi istituti di ricerca
- rapporti non verificabili e non sottoposti a *peer review*
- materiale bibliografico di taglio giornalistico



... tralasciando infine gli errori di misura, le ingenuità e le bufale speculative...



## scienza patologica

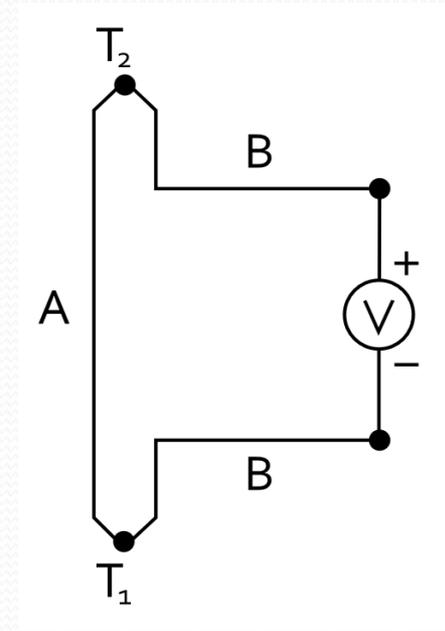
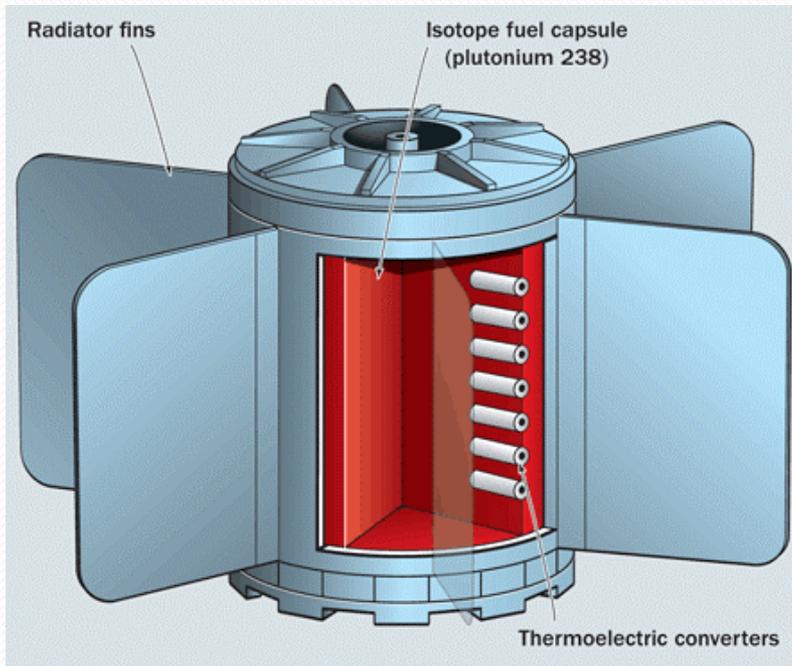
termine coniato dal Premio Nobel per la chimica Irving Langmuir nel 1953

Le caratteristiche tipiche di questo processo:

- il massimo effetto osservato viene prodotto da un agente causale di intensità appena percettibile, e l'ampiezza dell'effetto è essenzialmente indipendente dall'intensità della causa
- l'ampiezza dell'effetto rimane confinata nei limiti della percettibilità, ovvero si rendono necessarie molte misurazioni a causa della bassa rilevanza statistica dei risultati
- è richiesta una grande accuratezza
- vengono suggerite teorie contrarie all'esperienza
- alle critiche vengono fornite risposte "ad hoc"

# Gli impieghi presenti e futuri nel settore spaziale

alimentatori elettrici mediante RTG  
(Radioisotope Thermoelectric Generator)

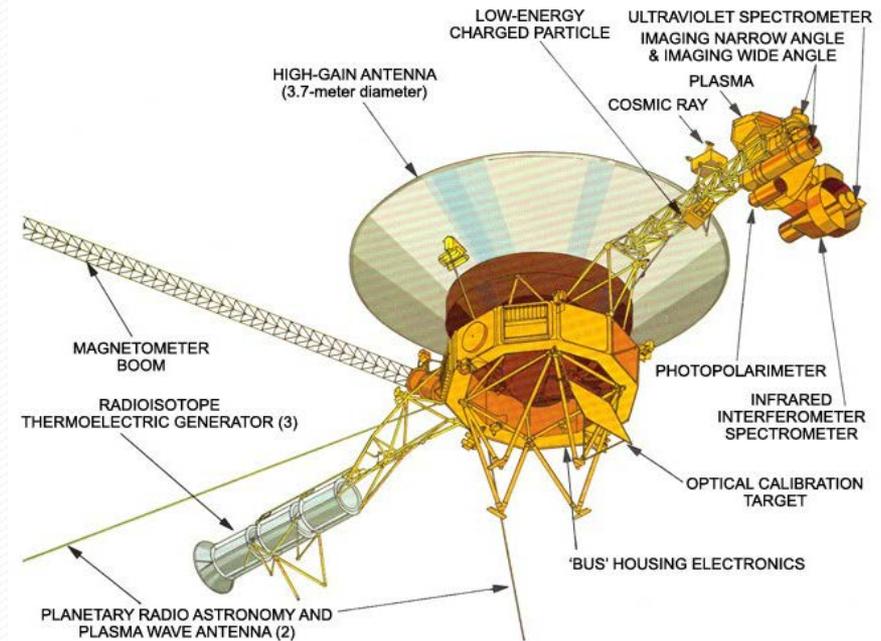
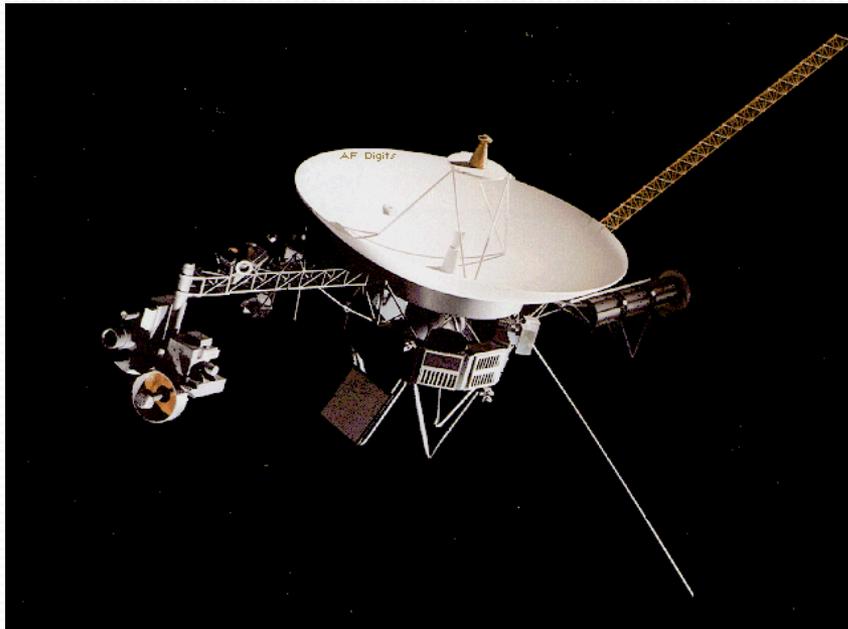


un radioisotopo, il plutonio-238, si riscalda a causa del proprio decadimento radioattivo

il calore è trasformato in elettricità da un convertitore termoelettrico che sfrutta l'effetto Seebeck

# Gli impieghi presenti e futuri nel settore spaziale

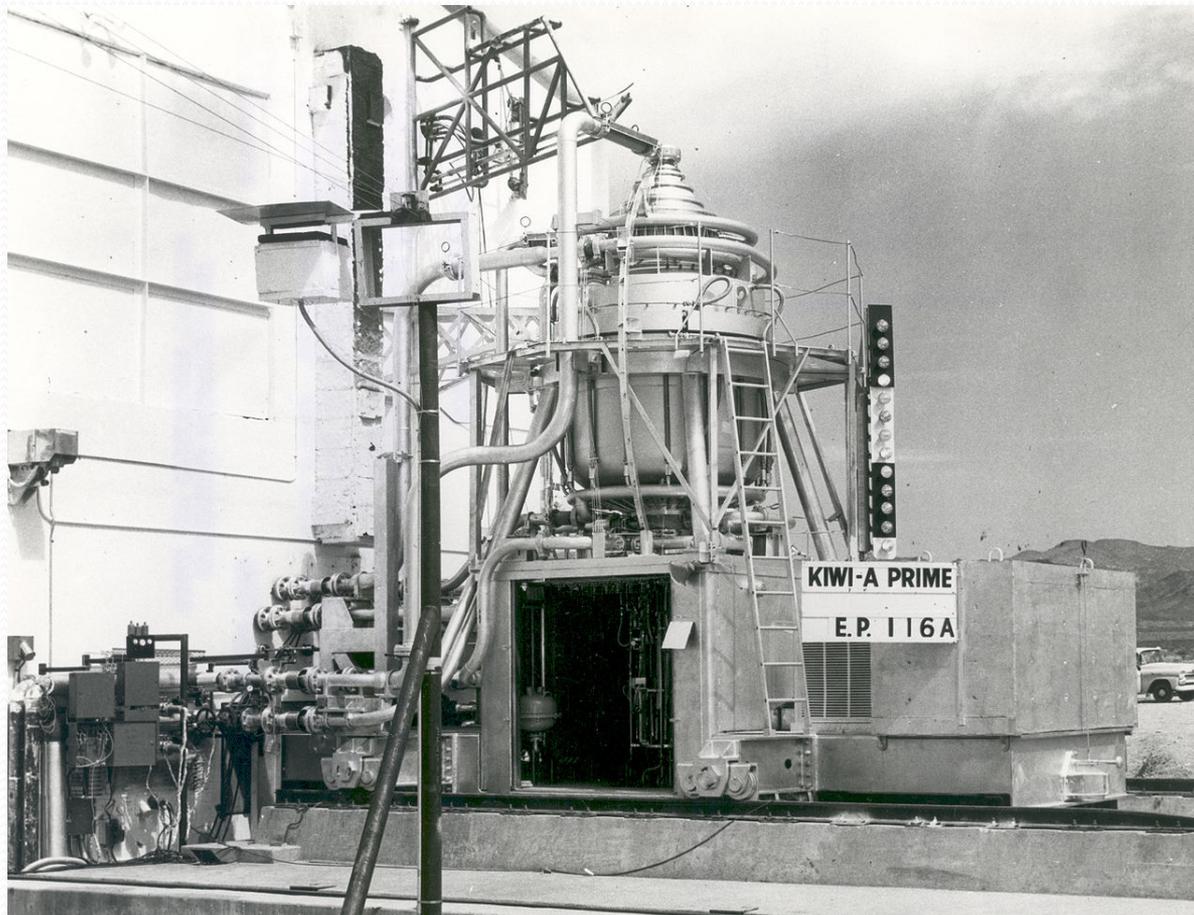
Le potenze degli RTG sono dell'ordine del centinaio di Watt, adatte ad alimentare piccoli motori, strumenti di misura e telecomunicazioni nelle zone dove non è sufficiente o disponibile l'alimentazione fotovoltaica



Esempio del generatore termoelettrico a radioisotopi della sonda Voyager

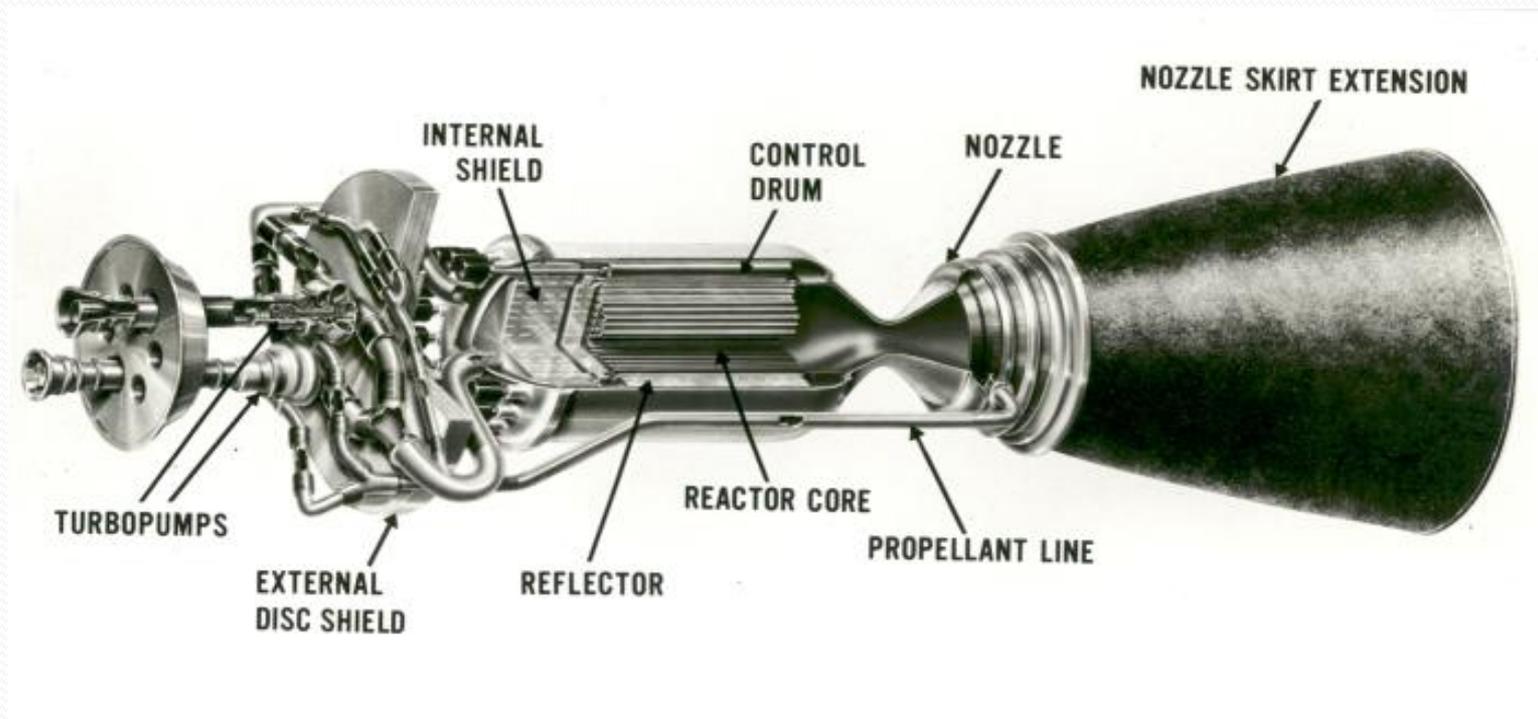
## Gli impieghi presenti e futuri nel settore spaziale

sin dagli anni '60 sono stati studiati e sperimentati a terra sistemi per la propulsione basati su reattori a fissione



## Gli impieghi presenti e futuri nel settore spaziale

sono basati sull'espulsione di gas surriscaldato da un reattore nucleare «aperto»



## Gli impieghi presenti e futuri nel settore spaziale

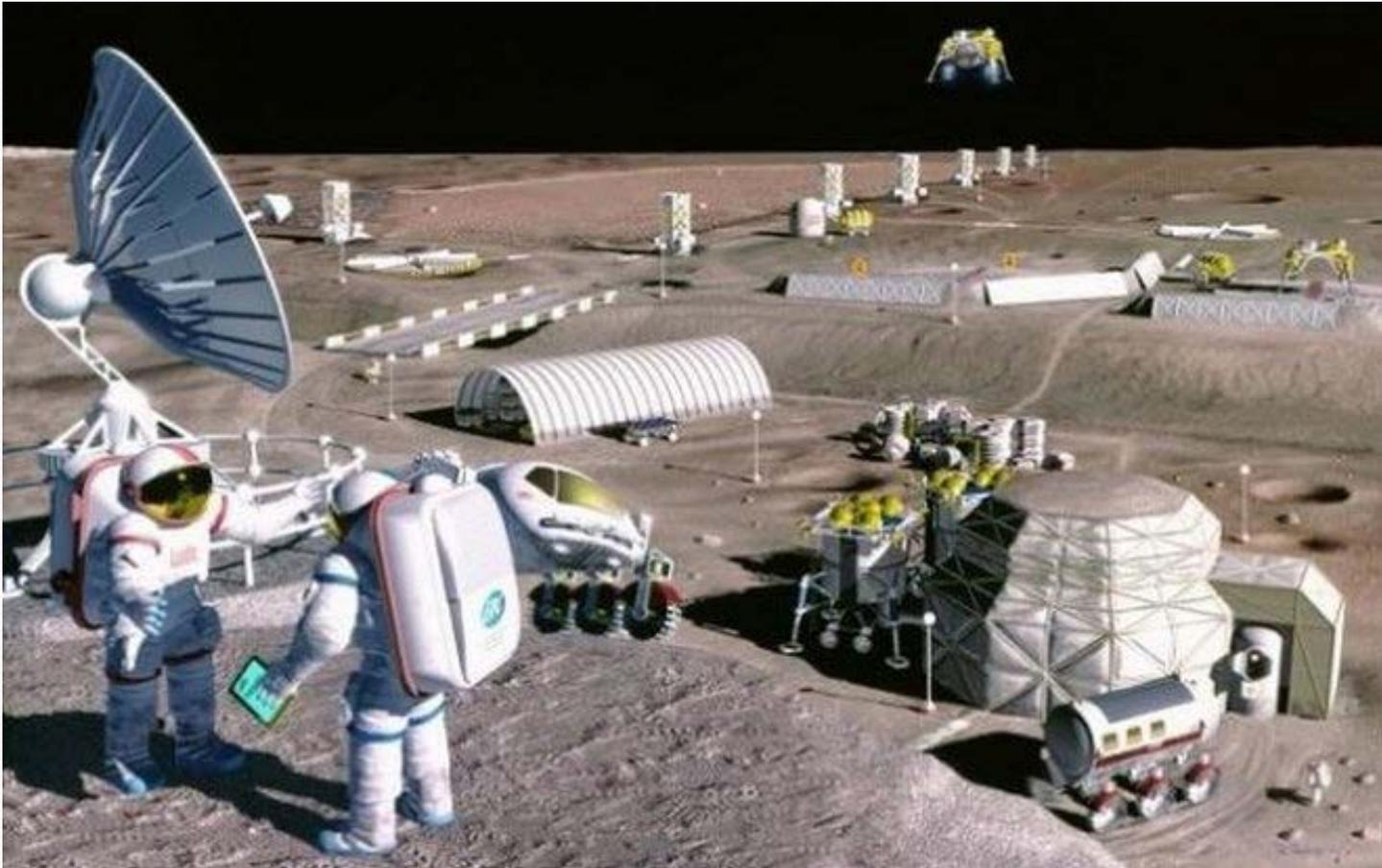
I sistemi di propulsione nucleare sono ritornati alla ribalta pensando a future missioni verso mete lontane



Razzo "bimodale" chimico-nucleare studiato dalla NASA

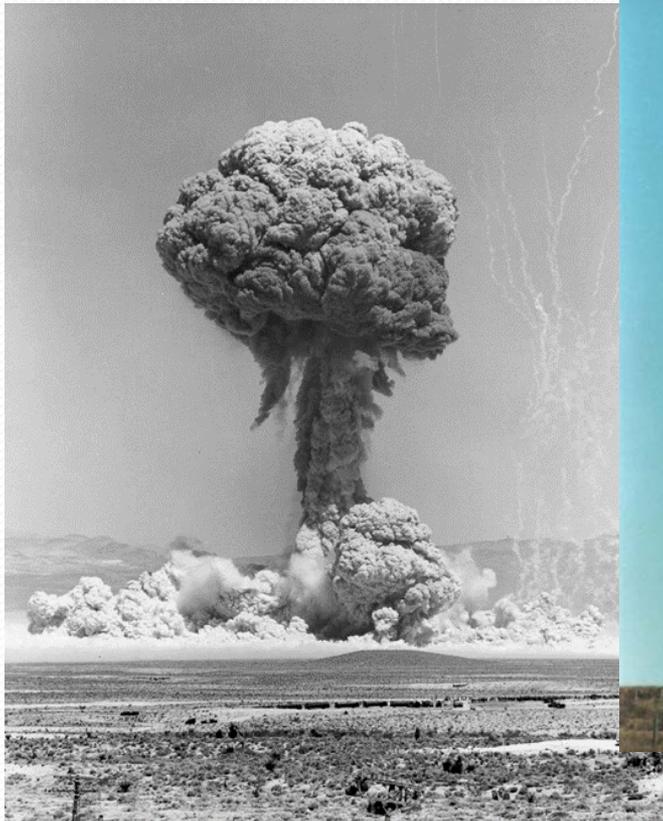
## gli impieghi presenti e futuri nel settore spaziale

I reattori nucleari sarebbero indispensabili per l'alimentazione di elettricità e calore su basi spaziali permanenti dove il fotovoltaico non è disponibile o non è sufficiente



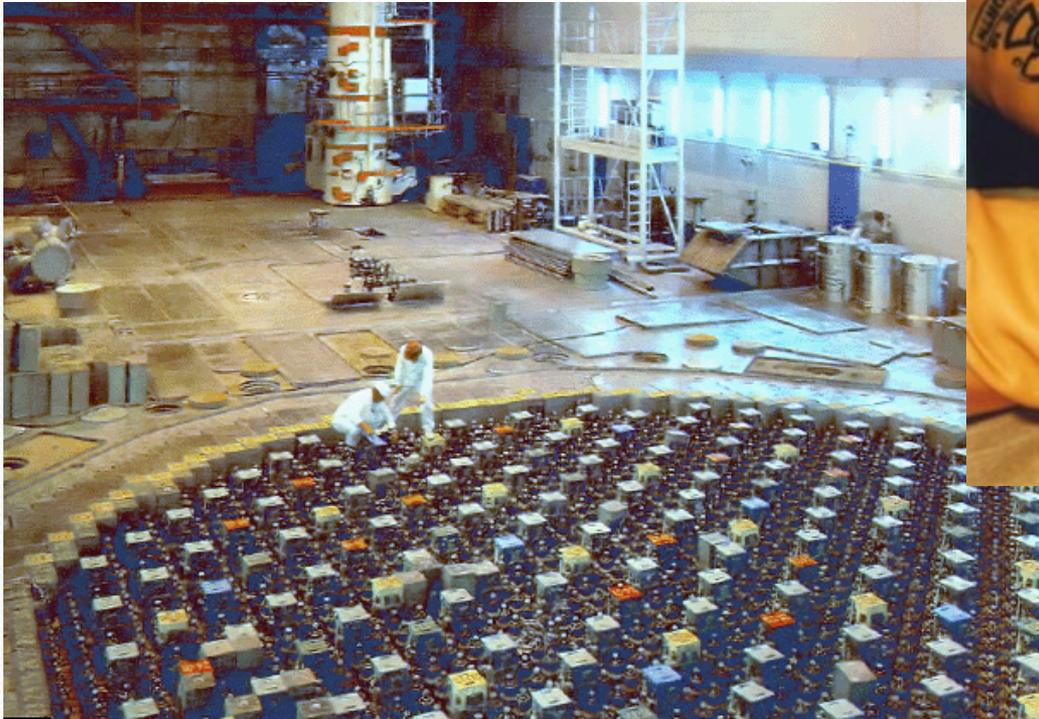
## gli attuali reattori nucleari impiegabili per la Pace

per produrre l'uranio ad alto contenuto di isotopo 235 impiegato negli armamenti (bombe atomiche) sono necessari impianti molto complessi e costosi per l'arricchimento, come speciali centrifughe



## gli attuali reattori nucleari impiegabili per la Pace

per generare il plutonio adatto alla fabbricazione di testate è invece necessario ricorrere a specifici reattori gestiti in ambito militare dai paesi dotati di armi atomiche



## eliminazione dell'esplosivo nucleare con i reattori

- il programma USA-Russia «Megatons to Megawatts» recentemente concluso ha permesso di eliminare 20000 testate caricate con uranio-235 altamente arricchito, fabbricando così del combustibile adatto alle centrali di generazione elettrica
- le analisi condotte dai ricercatori italiani permettono di affermare che, smantellando ad esempio un lotto di 4000 testate nucleari all'uranio, è possibile produrre circa 3000 tonnellate di combustibile arricchito al 4% per impiego in centrali commerciali
- l'energia elettrica producibile può realisticamente raggiungere, con tecnologie del combustibile già disponibili, i 900 TWh
- anche il plutonio impiegato nelle testate può essere distrutto in modo analogo, attraverso tecnologie più complesse, ma comunque già collaudate



Centro  
Italiano  
Sostenibilità  
Energia

[www.cise2007.eu](http://www.cise2007.eu)



grazie per l'attenzione!