

Ciclo di Conferenze del premio Antonicelli

Liceo Scientifico Gramsci - Ivrea, 11 Novembre 2006



Energia nucleare oggi

Giuseppina Rinaudo

Dipartimento di Fisica Sperimentale - Università di Torino

sito web: <http://www.iapht.unito.it/uranio>

email: giuseppina.rinaudo@unito.it



Energia nucleare oggi

Tre domande:

1) perché oggi si parla tanto di energia

2) perché l'energia nucleare fa (non fa) "paura"

3) perché l'energia nucleare è (non è) una grande risorsa



Che cosa c'è di importante da capire sull'energia

Scopriamolo attraverso degli esempi:

- una torcia elettrica*
- un telefono cellulare*
- un fiammifero acceso*
- il "flipper magnetico"*



Che cosa c'è di comune in tutti gli esempi?

c'è sempre

- una *“fonte di energia”*, che contiene *immagazzinata* una certa *“forma”* di energia
- un *“dispositivo”* che *trasforma* l'energia in una forma più adatta all'uso che se ne vuole fare oppure al suo *trasporto*
- un *“utilizzatore”*, che riceve l'energia e la *trasforma* per renderla adatta al suo utilizzo finale

nella torcia elettrica:

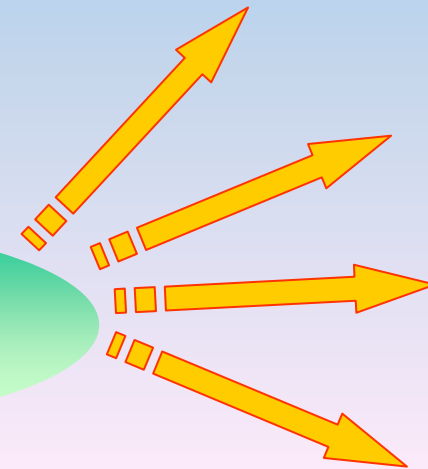
Esempio

energia chimica
(della pila)

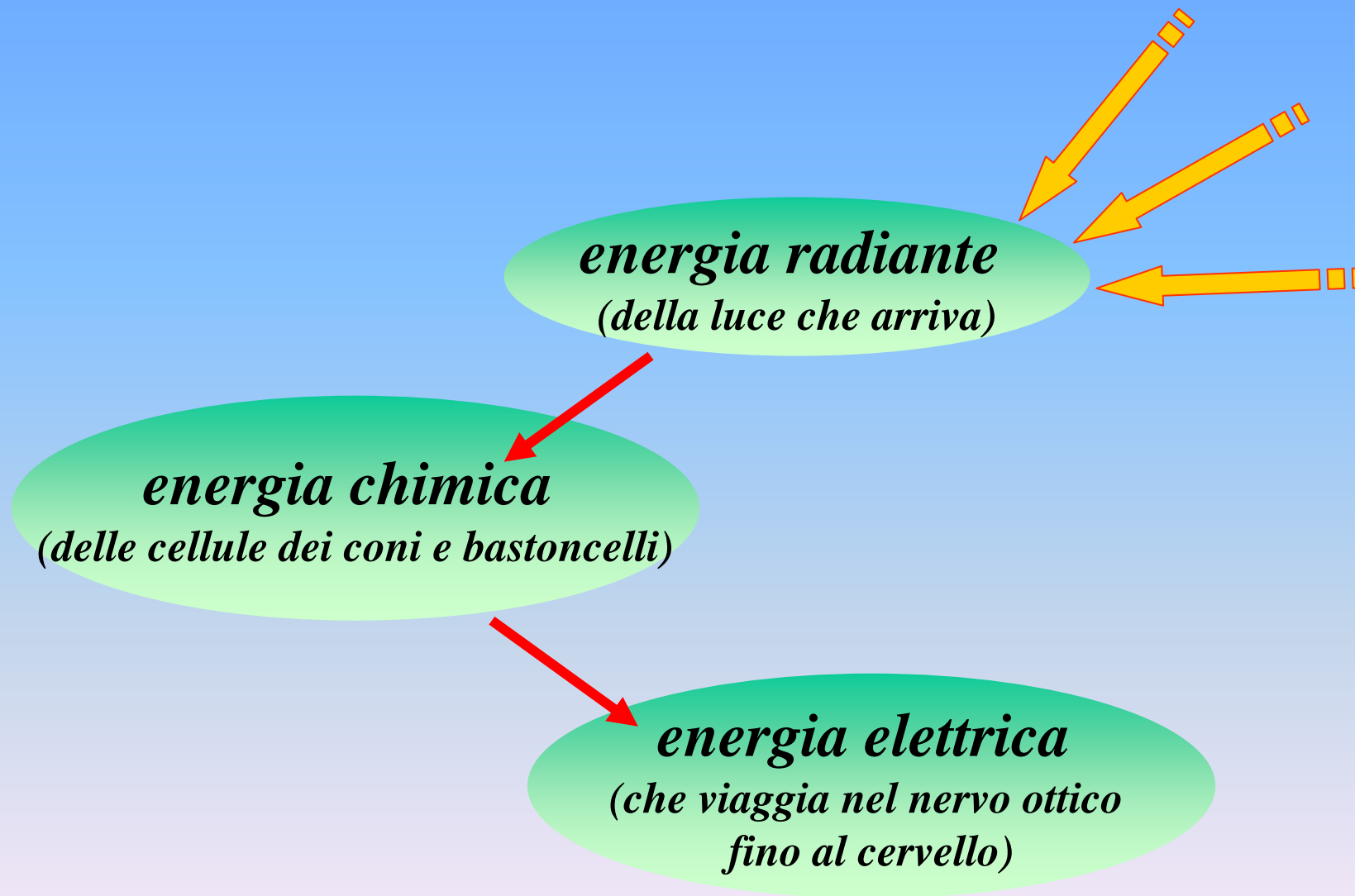
energia elettrica
(del circuito elettrico)

energia termica
(del filamento della lampadina)

energia radiante
(della luce che viaggia)

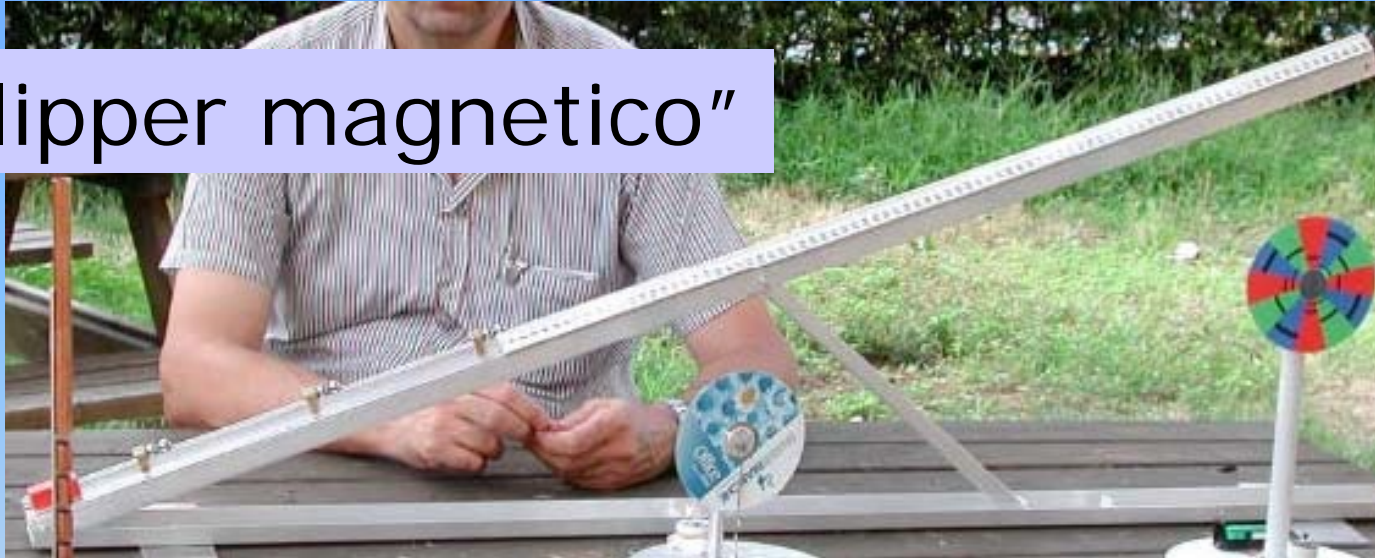


nella retina dell'occhio:



Una fonte un po' misteriosa di energia: un magnete

Il "flipper magnetico"





Stato iniziale



Stato Finale

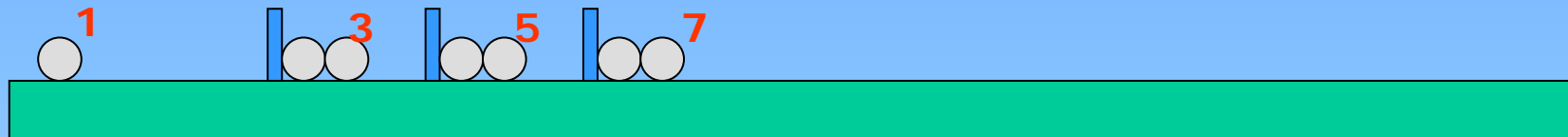


 Magnete di neodimio
(lega neodimio, ferro e boro (NIB))
(dimensioni 10mmx12 mm)

 Sferetta d'acciaio
(raggio 5,5 mm; massa 5,5g)

L'origine dell'energia magnetica

nello stato iniziale le sferette 1, 3 e 5 sono "poco legate", perché sono distanti dal magnete



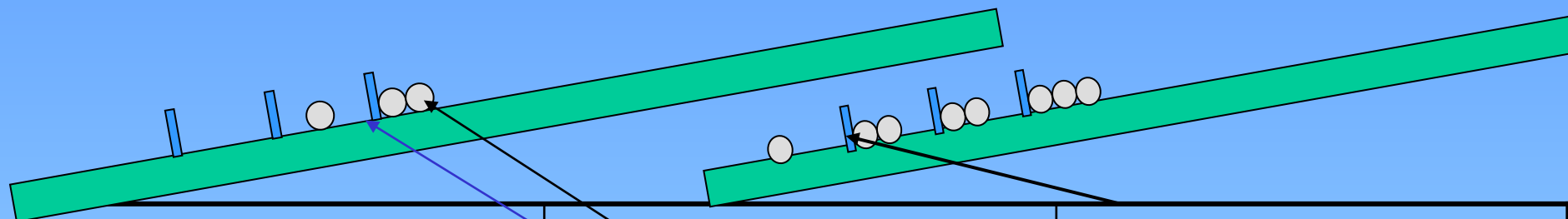
nello stato finale le sferette 1, 3 e 5 sono "molto legate", perché sono molto vicine al magnete



per staccarle infatti occorre spendere energia; l'energia che 1, 3 e 5 hanno perso è stata **trasferita** alla sferetta 7 e **trasformata** in **energia cinetica**

energia di legame magnetico ➡ *energia cinetica*

Conservazione dell'energia



	Lancio dal 3° magnete, biglia in posizione "2"	Lancio dal 1° magnete, biglie in posizione "2-2-3"
Distanza media dal 3° magnete raggiunta nel lancio	44 cm	61 cm
Variazione di energia meccanica	12 mJ	24 mJ
Energia di estrazione magnetica	11 mJ	25 mJ
Variazione totale di energia	23 mJ	49 mJ
Energia depositata dalla biglia incidente	24 mJ	72 mJ

È un caso curioso ma del tutto particolare?

No, una gran parte dell'energia che proviene dalle "fonti di energia" è

"energia di legame"!

Iniziamo dagli atomi

Gli atomi e la tabella di Mendeleiev

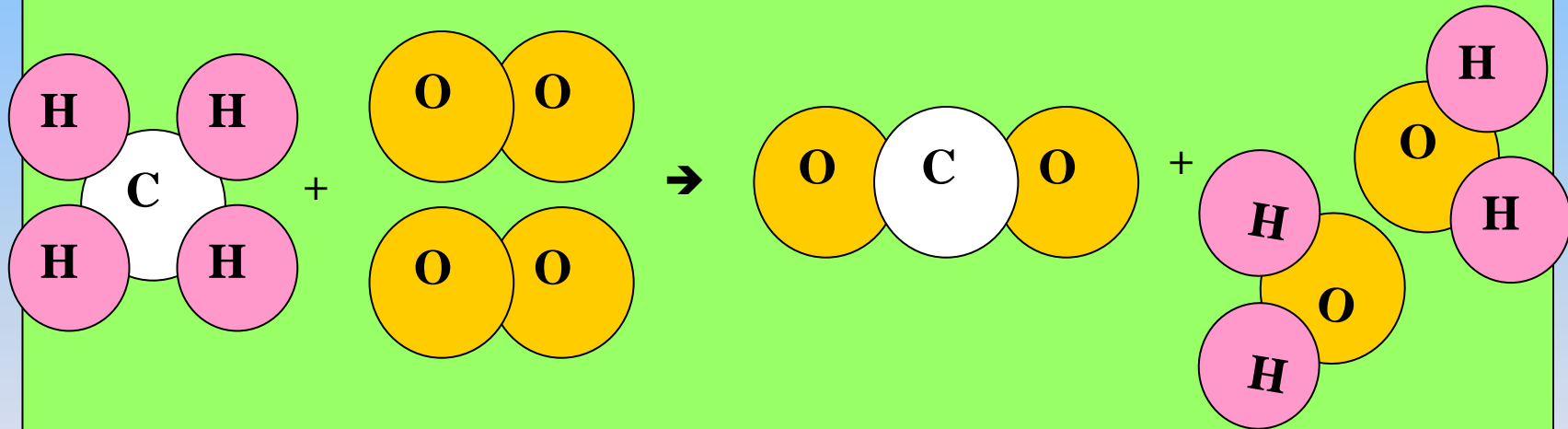
1	<i>numero atomico Z</i>	2
1,008	<i>numero di massa in u.m.a.</i>	4,003
H	<i>simbolo</i>	He
idrogeno	<i>nome dell'elemento</i>	elio

3	4	5	6	7	8	9	10
6,941	9,012	10,811	12,011	14,007	15,994	18,998	20,180
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
litio	berillio	boro	carbonio	azoto	ossigeno	fluoro	neon



Le reazioni chimiche

Combustione del metano. Il metano è formato da un atomo di carbonio e 4 atomi di idrogeno (formula chimica CH_4): in presenza di ossigeno (O_2), si forma anidride carbonica (CO_2) e acqua (H_2O)

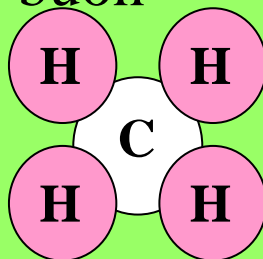


nessun atomo viene creato dal nulla ma neppure scompare

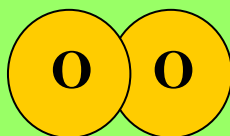
L'energia della reazione

prima della reazione:

i 4 atomi di H sono “poco legati” all’atomo di carbonio: il metano infatti è un buon combustibile perché cede facilmente i suoi atomi di H

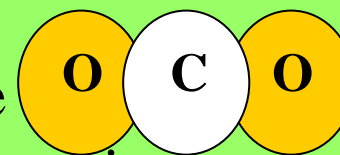


i 2 atomi di O nella molecola O₂ sono “poco legati”: l’ossigeno infatti è un gas molto attivo perché i suoi atomi si separano facilmente

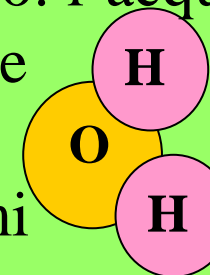


dopo la reazione:

i 2 atomi di O nella molecola CO₂ sono “molto legati”: l’anidride carbonica infatti è un gas inattivo perché è difficile separare i suoi atomi



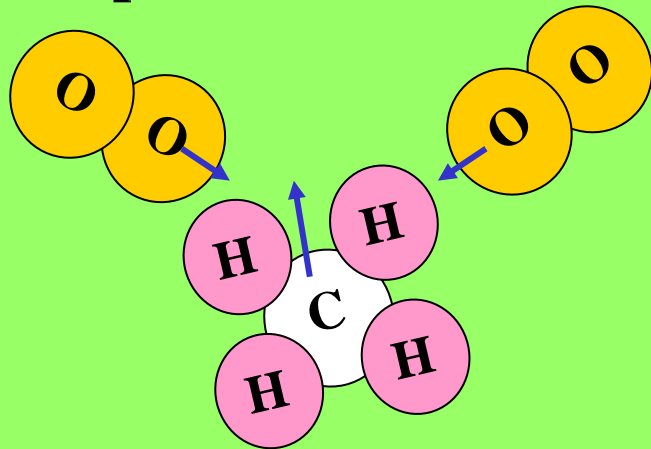
i 2 atomi di H nella molecola di acqua sono “molto legati” all’atomo di ossigeno: l’acqua infatti è molto stabile perché è difficile separare i suoi atomi



La trasformazione di energia nella reazione

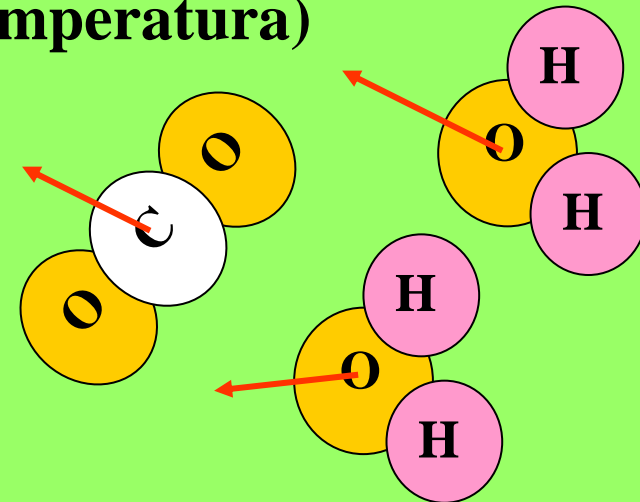
prima della reazione:

CH_4 e O_2 avevano poca
energia cinetica (bassa
temperatura)



dopo la reazione:

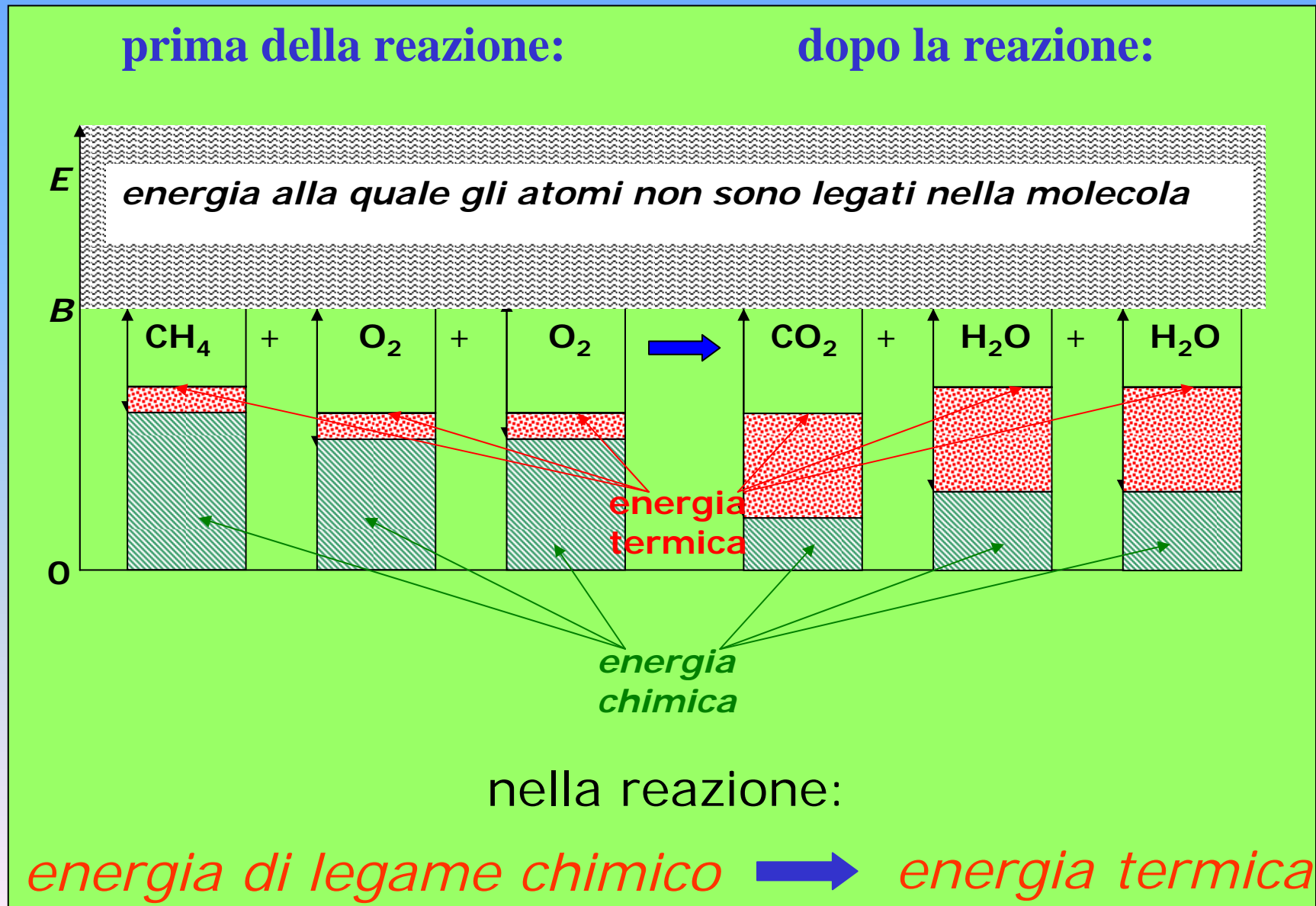
CO_2 e H_2O hanno molta
energia cinetica (alta
temperatura)



nella reazione:

energia di legame chimico \longrightarrow *energia termica*

Le forme di energia nella reazione



Il "bello" delle due forme di energia

L'energia chimica è

- è **immagazzinata** nelle molecole
- può essere **trasportata** sul posto di utilizzo
- può essere **trasformata** nella forma di energia che serve con una **reazione chimica**

L'energia termica

- è **direttamente utilizzabile**
- non occorre una reazione chimica per **trasferirla**, basta un semplice urto fra molecole
- non è facile **trasportarla** né **immagazzinarla**: va utilizzata sul posto

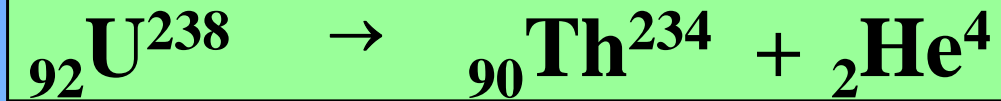
Le reazioni nucleari

*Una trasformazione di energia simile a quella
che avviene nelle reazioni chimiche avviene
anche nelle reazioni nucleari*

ma è molto più vistosa!

Vediamo perché

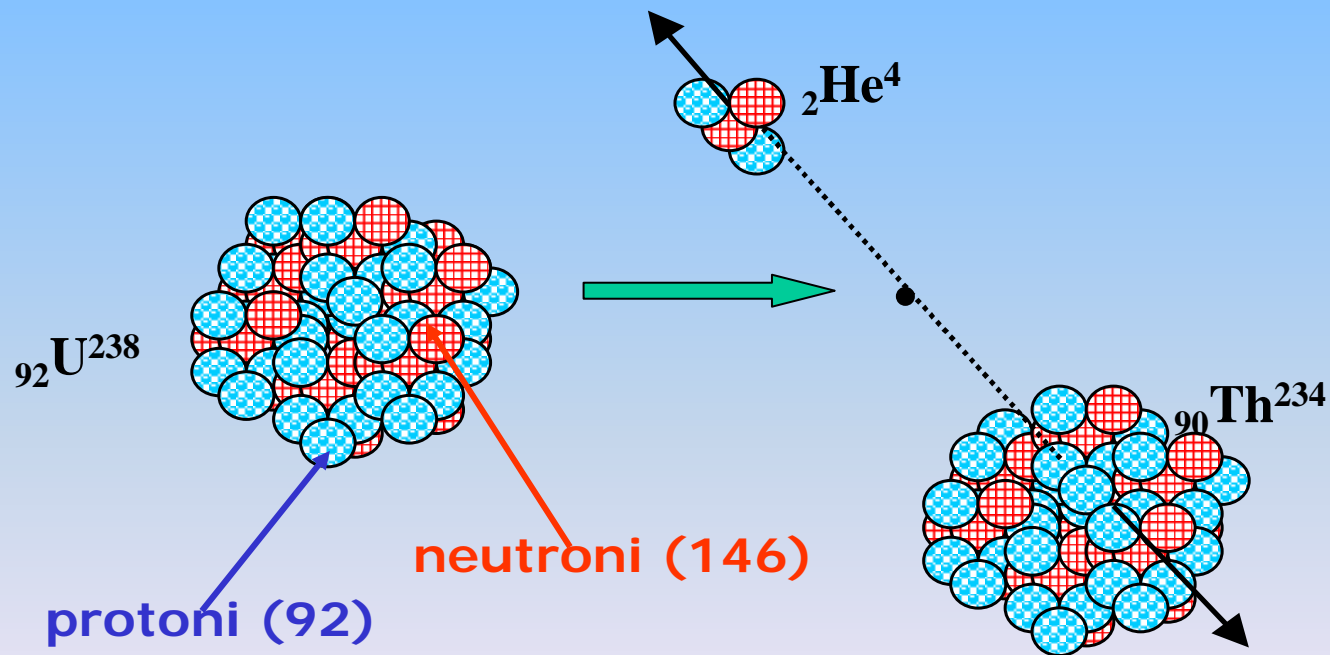
La prima reazione nucleare



prima

.....

dopo



nella reazione scompare l'atomo di uranio (U) e compaiono due nuovi atomi: elio (He) e torio (Th)

*da dove proviene
l'energia di moto di He e Th?*

*dalla trasformazione di
energia di massa
in
energia cinetica*

l'energia di massa:

una conseguenza della relatività di Einstein

$$**E = m c^2**$$

dove c è la velocità della luce (300000 km/s)

Il significato dell'energia di massa

*È l'energia che il corpo ha anche se è fermo
Se poi è in moto con velocità v , alla sua energia di
massa si aggiunge l'energia cinetica:*

$$***E = m c^2 + 1/2 m v^2***$$

La velocità v di un corpo che viaggia a velocità anche elevata è molto minore della velocità della luce c , quindi la sua energia è soprattutto energia di massa.

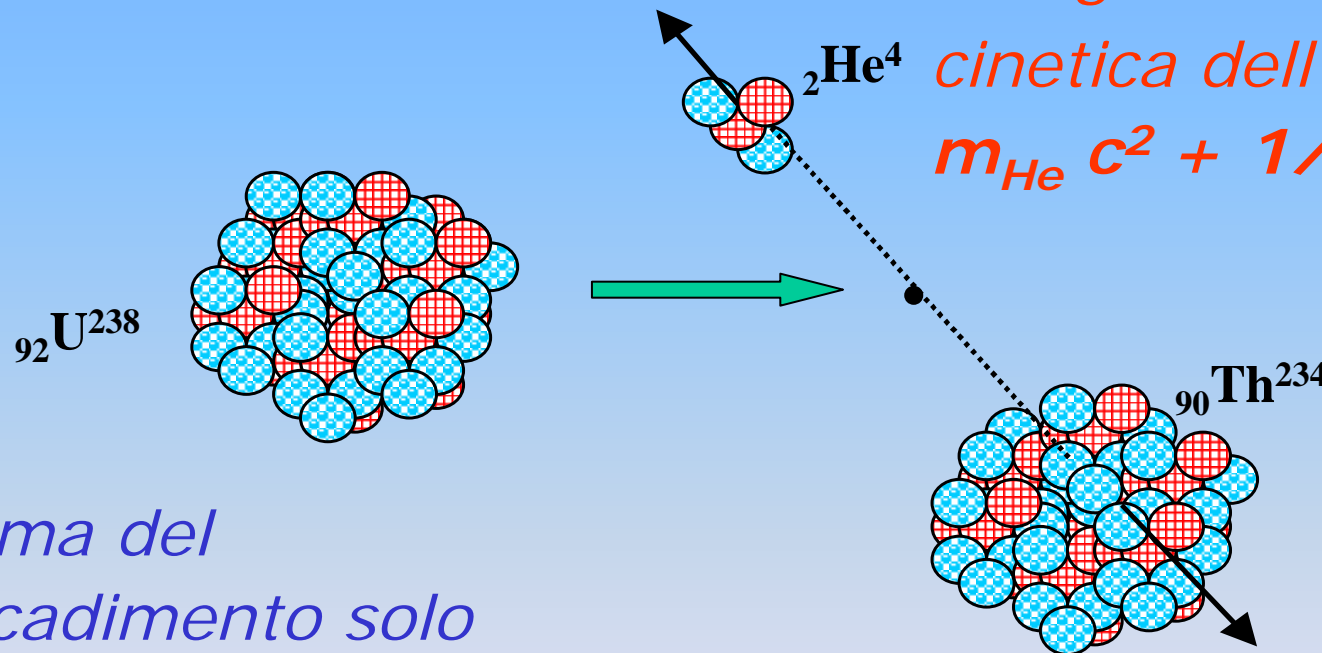
Qualche conto: la velocità di un concorde che viaggia a 3000 km/h (circa 1 km/s) è circa 100.000 volte minore della velocità della luce, quindi l'energia cinetica è meno di un miliardesimo dell'energia di massa!

Le trasformazioni dell'energia di massa

*Mentre è facile trasformare energia cinetica in altre forme di energia, non è facile trasformare l'energia di massa, perché la massa di un corpo è concentrata nei nuclei dei suoi atomi e solo le **reazioni nucleari** riescono a spezzare i nuclei e **trasformare l'energia di massa in energia cinetica***

*È ciò che avviene appunto nel decadimento
dell'uranio*

La trasformazione di energia nel decadimento di ${}_{92}\text{U}^{238}$



*prima del
decadimento solo
energia di massa
dell'uranio: $m_{\text{U}} c^2$*

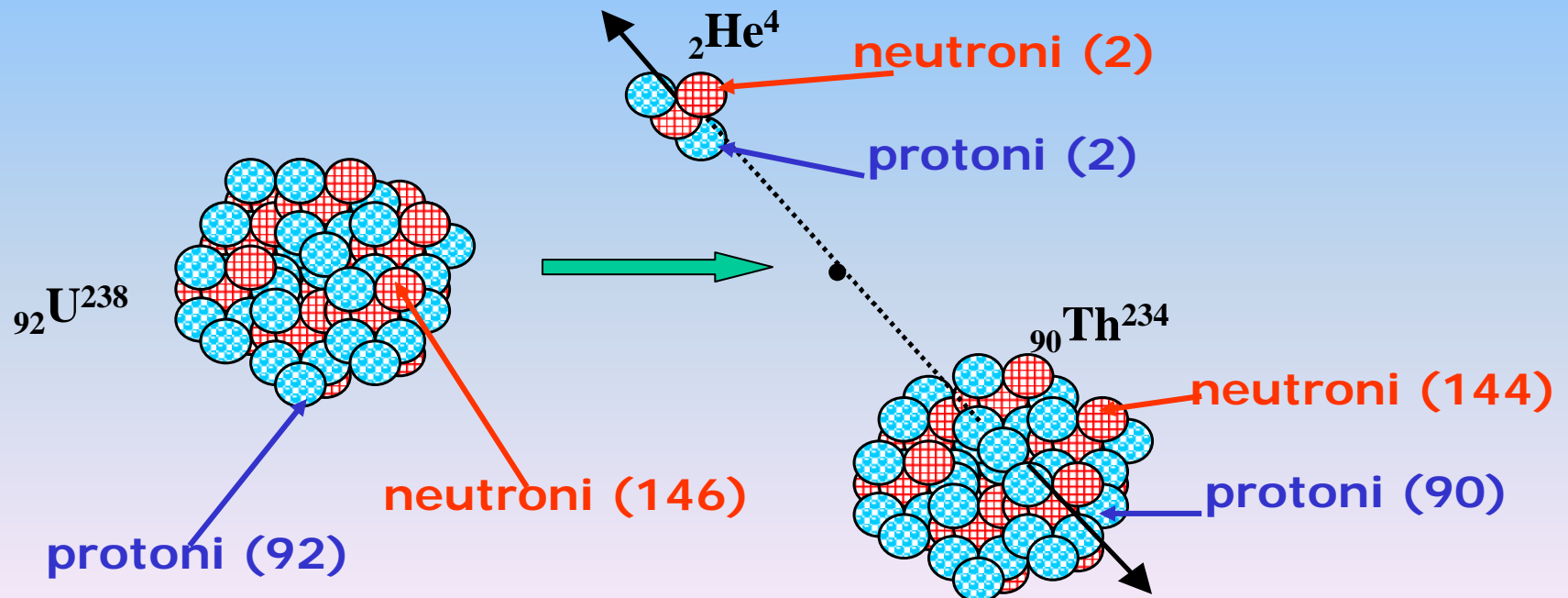
*dopo il decadimento
energia di massa e
cinetica dell'elio:
 $m_{\text{He}} c^2 + 1/2 m_{\text{He}} v'^2$*

*energia di massa e
cinetica del torio:
 $m_{\text{Th}} c^2 + 1/2 m_{\text{Th}} v'^2$*

Il "difetto di massa"

Nel decadimento è andata perduta un po' di energia
di massa! $m_U c^2 > m_{He} c^2 + m_{Th} c^2$

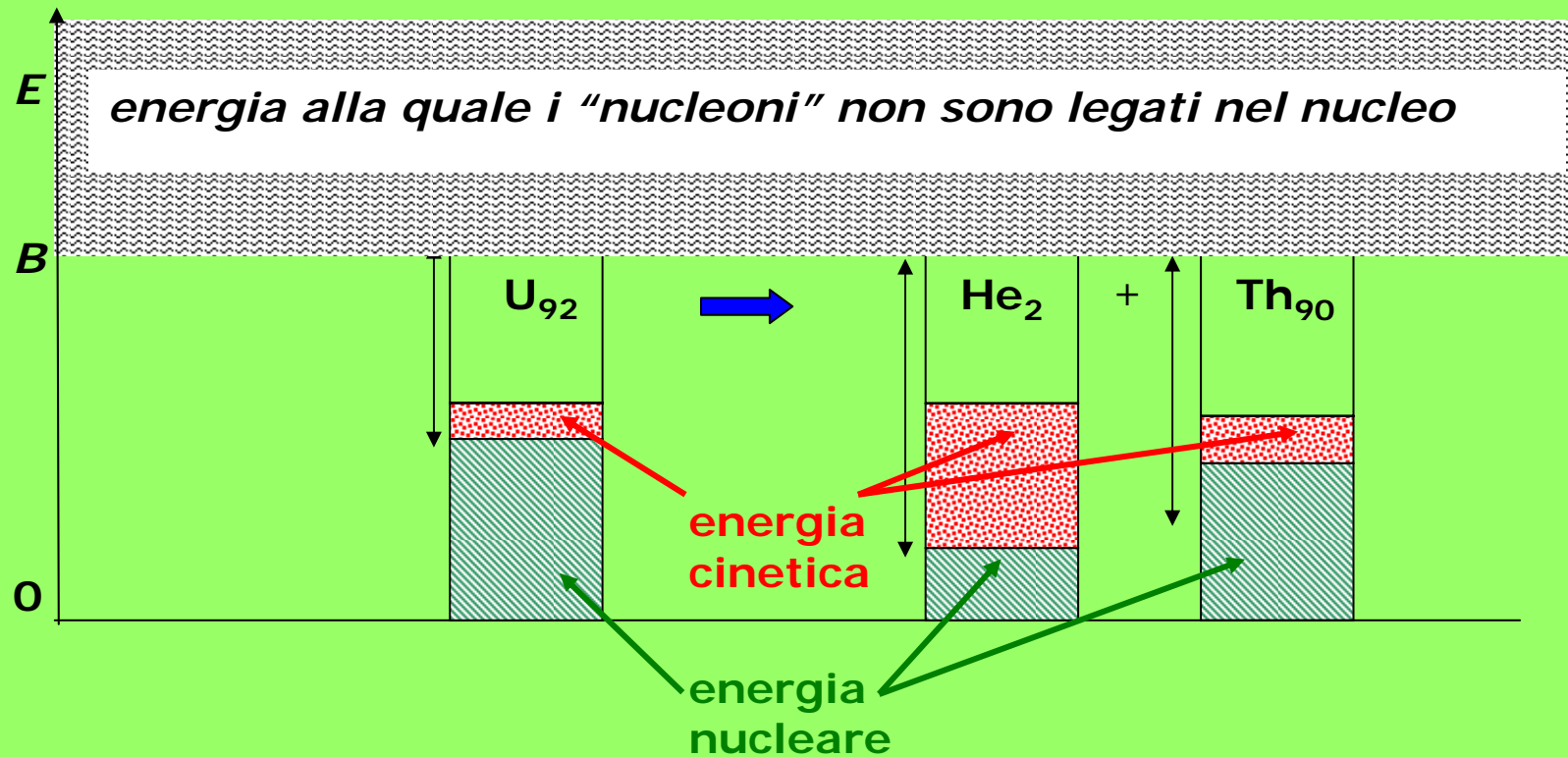
I protoni e i neutroni ci sono ancora tutti, ma
nell'uranio avevano minore *energia di legame*
che nel torio e nell'elio



Le forme di energia nella reazione

prima della reazione:

dopo la reazione:

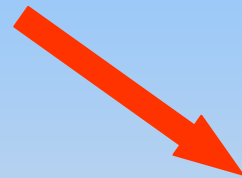


nella reazione:

energia di legame nucleare \longrightarrow *energia cinetica*

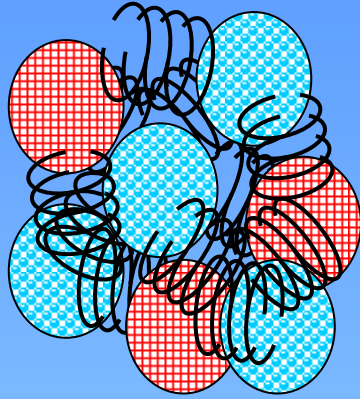
I rivelatori di radiazione nucleare

L'energia delle particelle che vengono prodotte nella reazione è così elevata che può essere rivelato il passaggio della singola particella!



il contatore
geiger

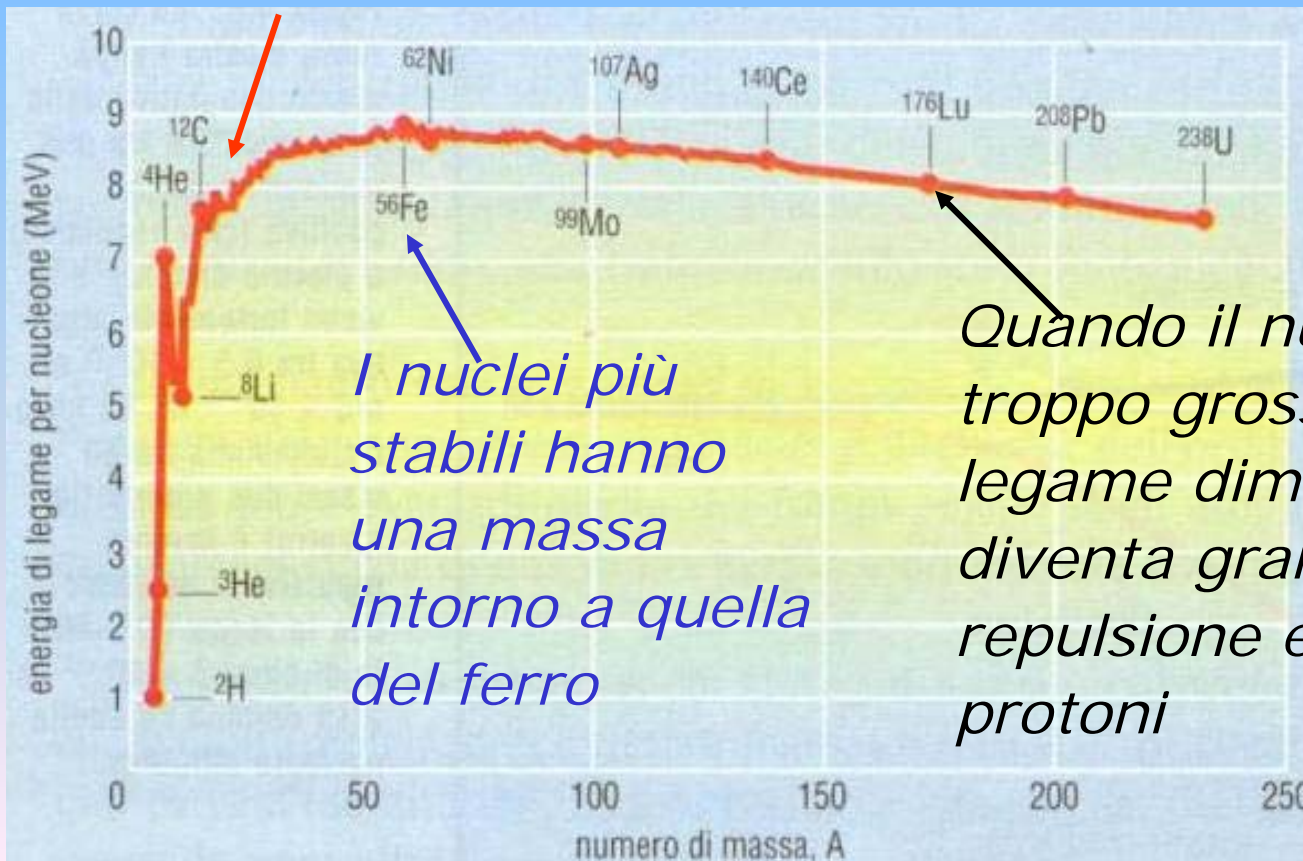




L'energia di legame nucleare

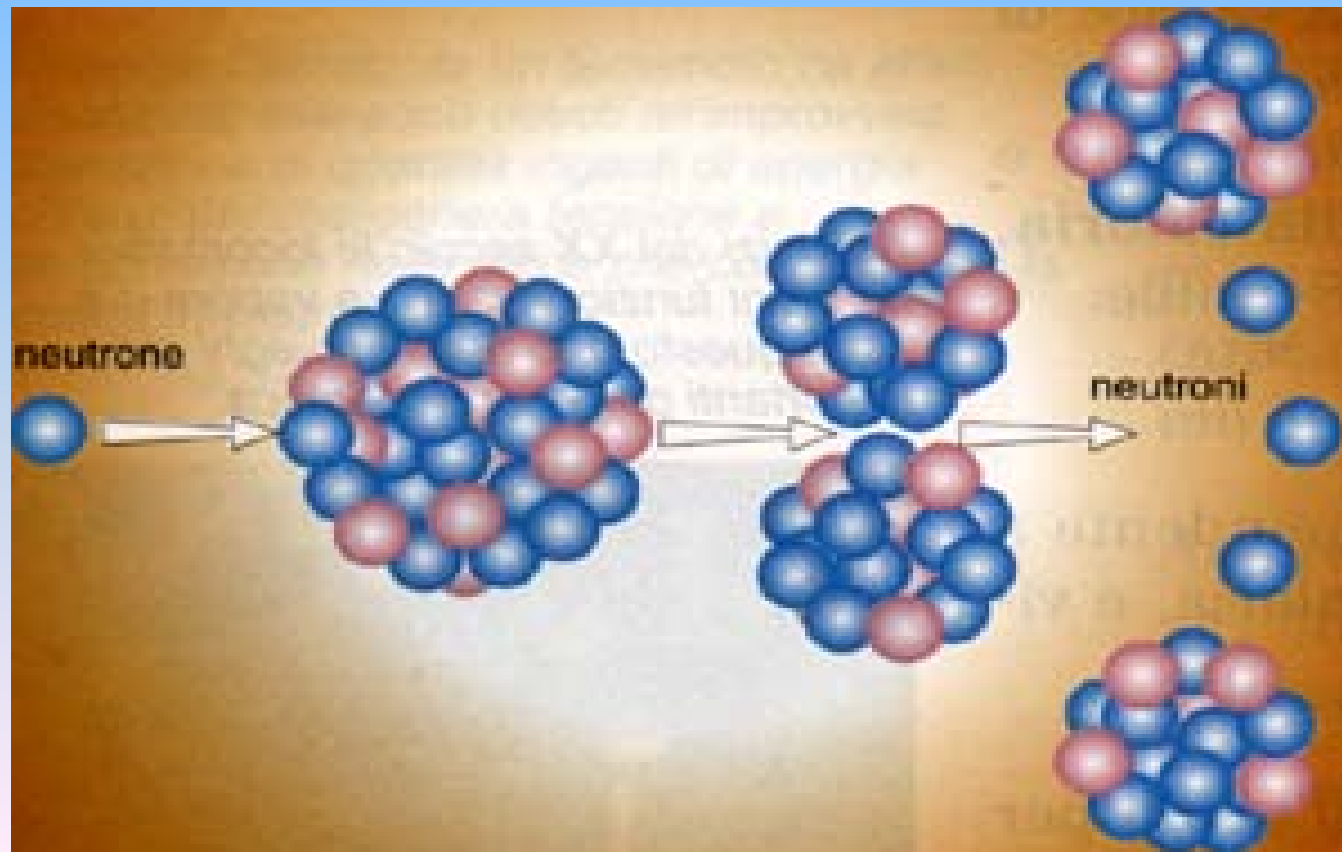
È dovuta alle forze nucleari, che tengono legati fra di loro protoni e neutroni dentro il nucleo

Nei nuclei piccoli, aggiungendo un protone o un neutrone, l'energia di legame aumenta, perché si creano nuovi legami



Una reazione nucleare per "produrre" energia

Una tipica reazione di fissione indotta:



Una reazione nucleare per "produrre" energia



un neutrone induce la fissione dell'uranio 235, che si spezza in due frammenti – il **rubidio 93** e il **cesio 141 (o 140)** – e **due (o tre) neutroni liberi**.

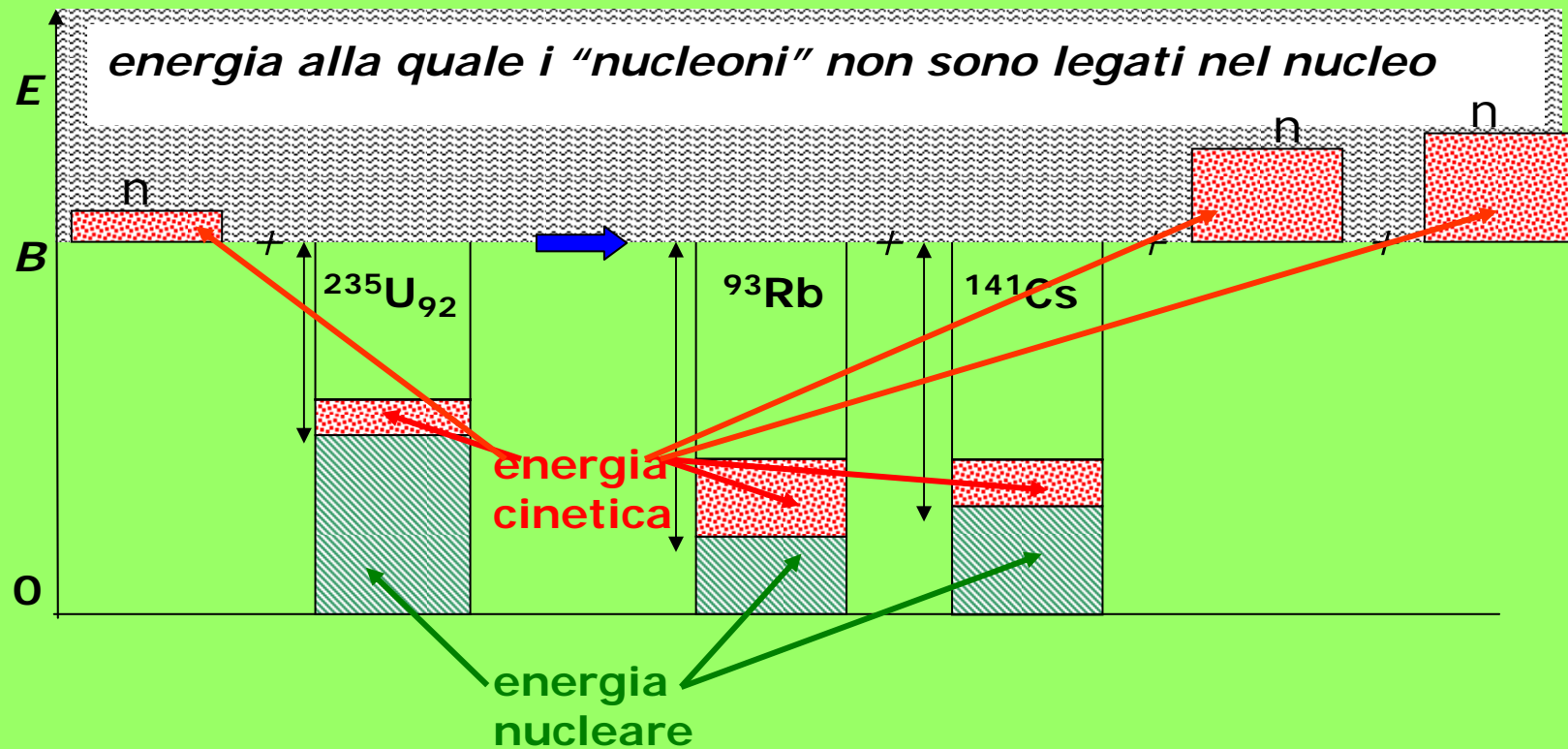
La reazione di fissione è sempre accompagnata dal rilascio di una notevole quantità di energia, pari alla differenza tra le masse dei reagenti e le masse dei prodotti.

Per la reazione scritta sopra, la quantità di energia liberata è di circa **200 MeV**, cioè circa **10 milioni di volte quella di una tipica reazione chimica**.

Le forme di energia nella reazione

prima della reazione:

dopo la reazione:



nella reazione:

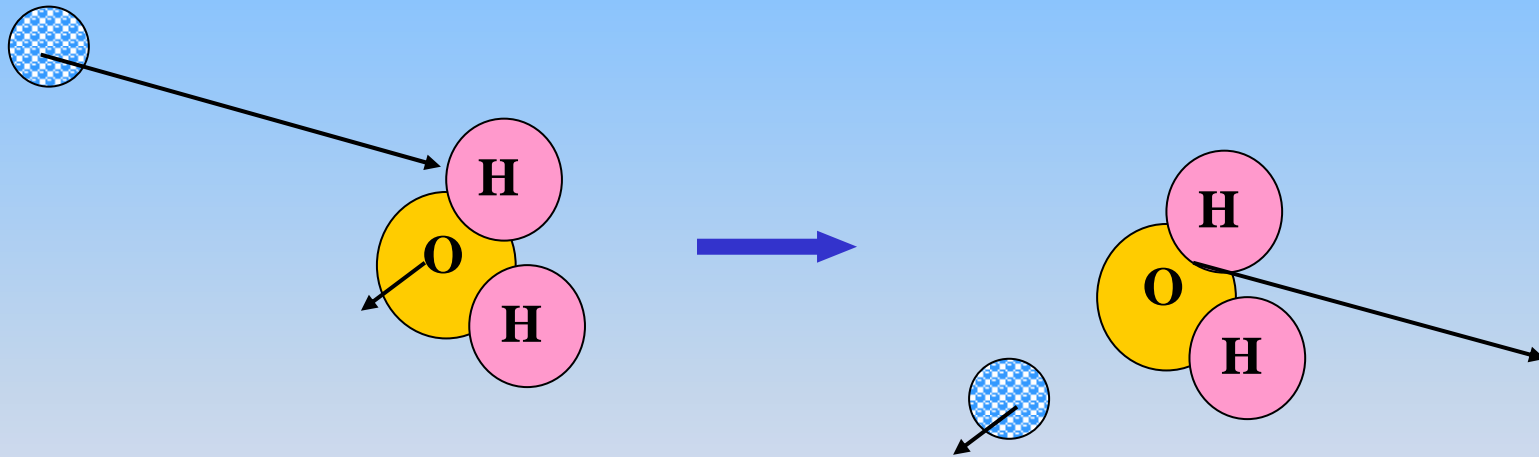
energia di legame nucleare



energia cinetica

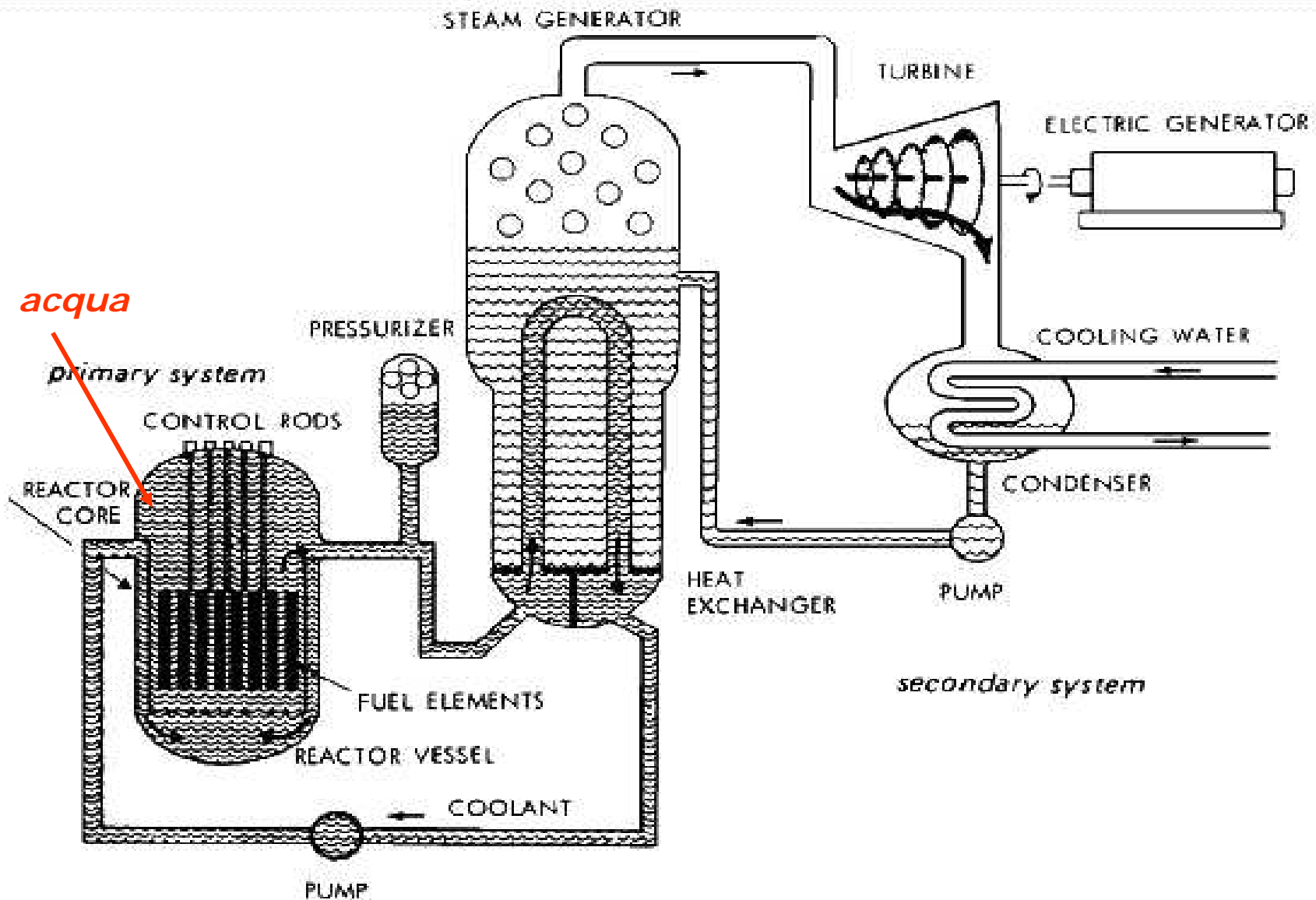
Il "bello" dell'energia cinetica

Non occorre una reazione nucleare per trasferirla, basta un semplice urto con una molecola di acqua!



Il neutrone cede parte della sua quantità di moto all'acqua, che, a sua volta, può cederla attraverso urti ad altre molecole di acqua

Un reattore nucleare



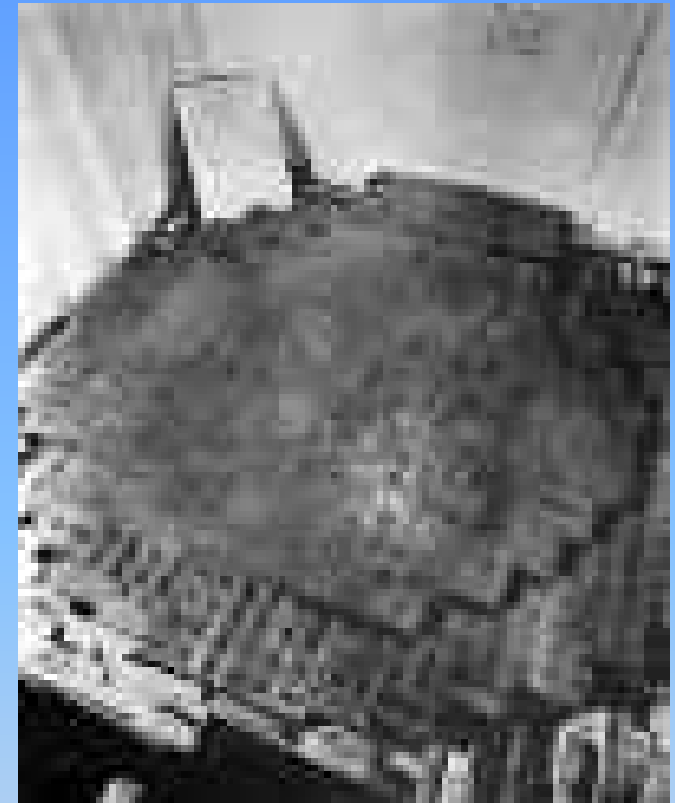
Un po' di storia.....

- a partire dal 1930 il gruppo di **Enrico Fermi** a Roma realizza una serie di reazioni nucleari bombardando l'uranio con neutroni
- nel 1938 Enrico Fermi vince il premio Nobel
- nel 1939, due fisici tedeschi, **Otto Hahn** e **Fritz Strassmann**, riescono a ottenere la prima fissione di un nucleo di uranio bombardandolo con dei neutroni
- poco dopo **Lise Meitner** dà la prima interpretazione teorica
- nel 1944 Otto Hahn vince il premio Nobel

a Lise Meitner non venne mai dato un riconoscimento per il suo contributo fondamentale!

due eventi storici.....

nel dicembre 1942,
Enrico Fermi realizza il
primo reattore
nucleare, all'università
di Chicago



nell'agosto 1945 scoppia la
prima bomba nucleare, sulla
città giapponese di Hiroshima

I problemi legati all'energia nucleare

Vantaggi:

- dalla singola reazione si ottiene un'enorme quantità di energia
- non si consumano combustibili fossili come il petrolio e il metano
- non si producono "gas serra" come CO₂ che sono invece prodotti in abbondanza nella combustione di combustibili fossili

Svantaggi:

- **sicurezza**: occorre uno stretto controllo del reattore perché la reazione non sfugga al controllo
- **scorie**: nella reazione si producono delle scorie radioattive di lunga vita media
- **proliferazione**: nella reazione si producono elementi come il plutonio usati per costruire armi nucleari
- **inefficienza e costi**: solo una piccola parte dell'energia nucleare disponibile nell'uranio viene utilizzata

Sicurezza, scorie, proliferazione, ecc.

Tutti i problemi originano dall' ^{235}U e dalla necessità di mantenere la "reazione a catena"

Perché una tipica reazione nucleare come



si mantenga, occorre:

- che **almeno 1** dei 2 neutroni giunga a colpire un altro nucleo di ^{235}U e dare origine a una nuova fissione prima di essere assorbito,
- che questo numero **non sia maggiore di 1**, altrimenti le reazioni si moltiplicano a valanga, e il reattore esplode (in questo regime lavora una bomba nucleare!),
- che **non sia minore di 1**, altrimenti si spegne!

1° problema:

la **sicurezza** del reattore dipende dalla capacità di mantenere questo delicato rapporto

Uranio 235 e uranio 238

L' ^{235}U è un *isotopo* molto raro dell'uranio naturale, circa lo 0,7%

L'isotopo più abbondante dell'uranio è l' ^{238}U , che non dà reazioni di fissione. Quando viene colpito da un neutrone, lo assorbe e si trasforma in ^{239}U



Il risultato è che l' ^{238}U assorbe i neutroni prodotti nella reazione di fissione dell' ^{235}U e quindi tende a "spegnerla".

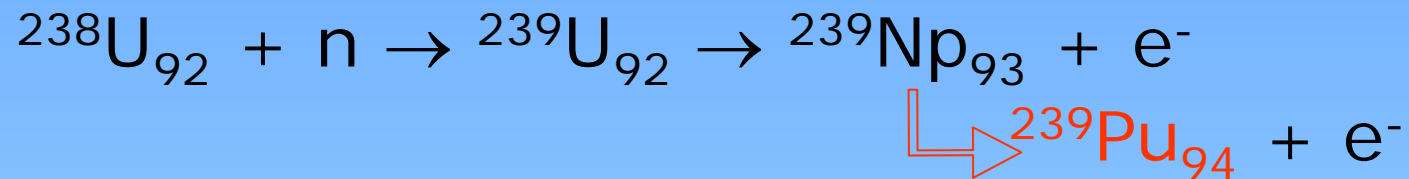
Per mantenere in funzione il reattore, occorre "**arricchire**" l'uranio, portando la percentuale di ^{235}U almeno al 3%:

2° problema:

arricchire l'uranio costa, l'uranio "impoverito" è inutilizzabile,
la sua energia nucleare è sprecata

Il plutonio e la proliferazione delle armi nucleari

Dall'uranio al plutonio nel reattore:



Il ${}^{239}\text{Pu}_{94}$ dà una reazione di fissione, proprio come l' ${}^{235}\text{U}_{92}$ però, a differenza dell' ${}^{235}\text{U}_{92}$ è difficile controllarla: basta meno di 1 kg di plutonio per costruire una **bomba nucleare!**

La bomba lanciata su Nagasaki era costruita con ${}^{239}\text{Pu}$

Si stima che oggi ci siano circa **1000 tonnellate** di ${}^{239}\text{Pu}$ prodotto da reattori nucleari conservate in vari depositi sparsi nel mondo!

3° problema:

Il plutonio, e altri nuclei prodotti nel reattore nucleare, favoriscono la **proliferazione delle armi nucleari**

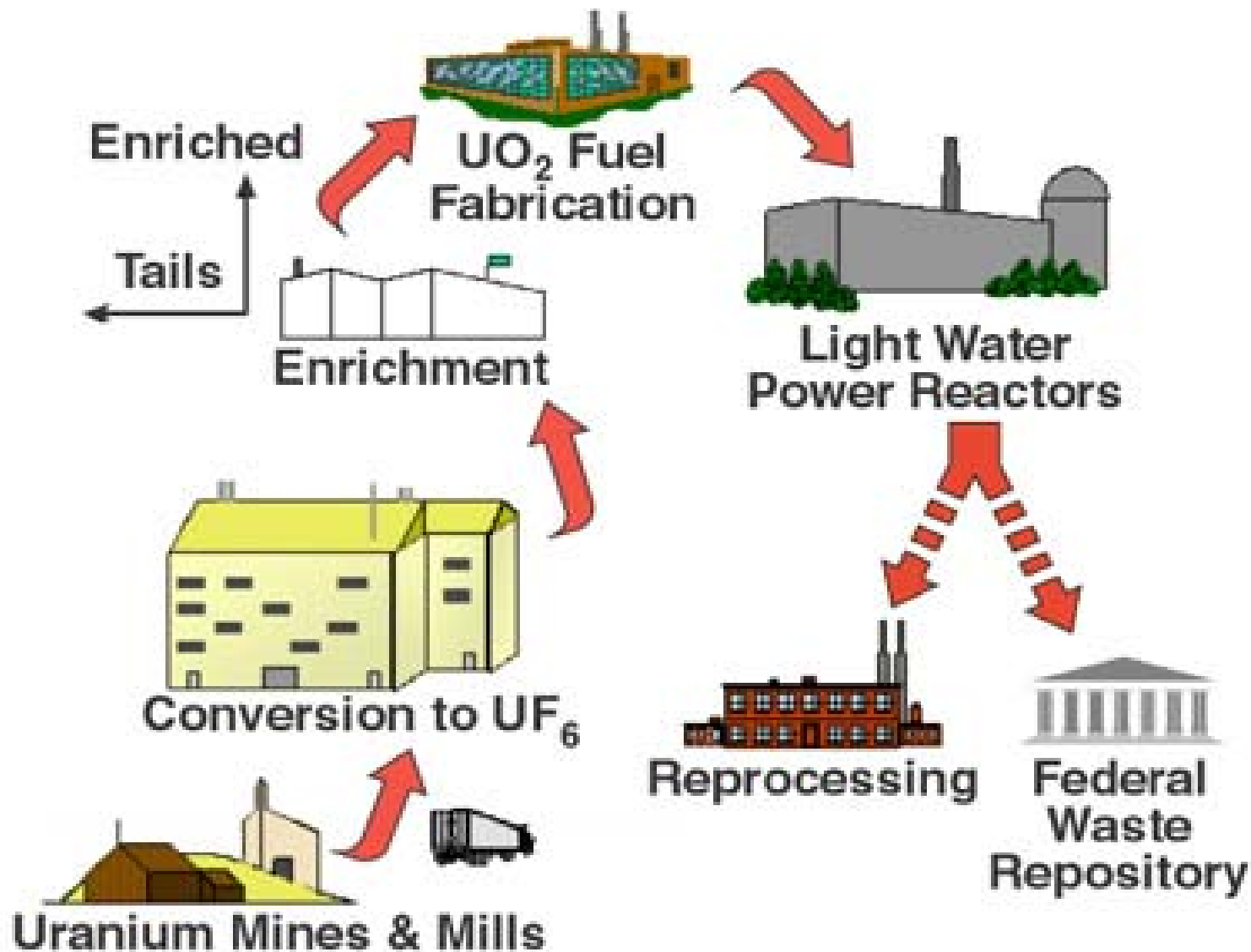
Gli "attinidi" e il problema delle scorie nucleari

Esaurita la carica di ^{235}U , le barre del reattore debbono essere estratte e sostituite, ma sono ancora piene di ^{238}U , ^{239}Pu , ^{229}Th , ^{231}Pa , e molti altri nuclei radioattivi della famiglia dei nuclei instabili che inizia con l'attinio. Le catene di decadimento radioattivo di questi nuclei impiegano migliaia di anni per esaurirsi!

4° problema:

Le **scorie nucleari** estratte dal reattore debbono essere conservate in serbatoi sicuri per almeno 30000 anni!

La filiera dell'energia nucleare



Quale speranza per l'energia nucleare del futuro?

Due strade principali:

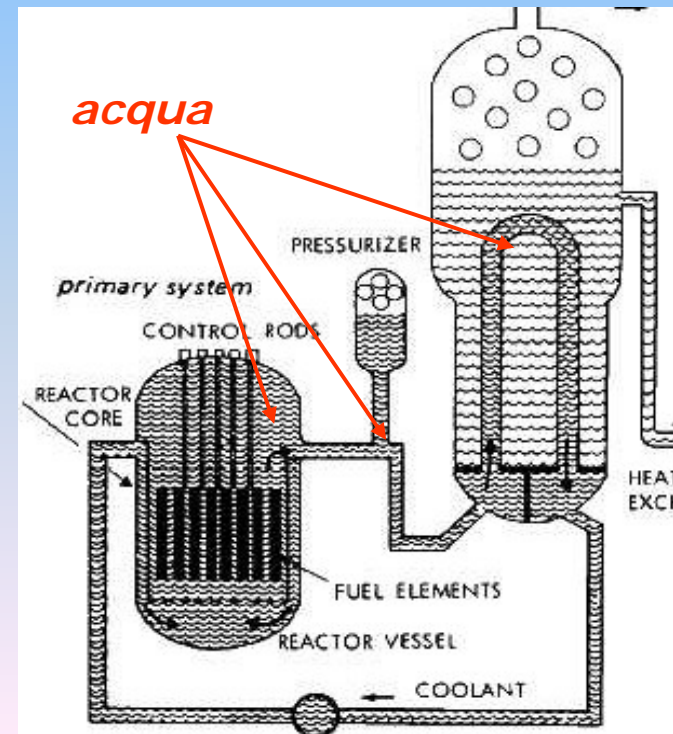
- il reattore a fissione "veloce"
- la fusione nucleare

Il reattore "veloce"

I neutroni prodotti nella reazione di fissione dell' ^{235}U hanno energia molto elevata, mentre occorre che essi siano molto più lenti perché la reazione possa avvenire.

I neutroni vengono perciò rallentati dagli urti contro l'acqua del reattore: i nuclei della molecola di acqua sono leggeri, quindi l'energia viene trasferita rapidamente.

Nel reattore nucleare l'acqua è anche il fluido che trasporta l'energia fuori dalla cella di reazione



I neutroni veloci

Il neutrone veloce è in grado di produrre la fissione direttamente dell' ^{238}U e anche di quasi tutti i nuclei radioattivi della serie degli attinidi che si formano dentro il reattore.

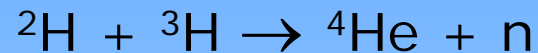
Evitando di rallentare i neutroni si hanno perciò molti vantaggi:

- 1) **non è necessario arricchire l'uranio**, perché si usa direttamente ^{238}U : il reattore diventa più efficiente e si spreca meno energia
- 2) **si produce molto meno plutonio** e quindi si evita il problema della proliferazione
- 3) **si riducono fortemente le scorie**, perché anche i nuclei radioattivi che si formano nella reazione primaria subiscono la fissione e quindi si spezzano in nuclei stabili

Problema: quale fluido usare per portare fuori l'energia sviluppata nella reazione nucleare? Sodio fuso? Piombo fuso? Acqua pesante?

La fusione nucleare

È la reazione nucleare alla base dell'energia solare:



- è "pulita", non produce scorie né nuclei che possano essere usati per armi nucleari
- non richiede di estrarre minerali radioattivi né di lavorarli

Il grosso problema: come realizzarla in condizioni controllate?

Finora la fissione è stata realizzata artificialmente solo nella "bomba a idrogeno": innescata la reazione, con una fissione nucleare dell' ${}^{235}\text{U}$, si è mantenuta la valanga fino all'esplosione!

A un "reattore a fusione" stanno lavorando grossi laboratori in Europa, America e Giappone ma le prospettive sono ancora lontane nel futuro!

Sorgenti di radiazione e unità di misura “dosimetriche”

Sorgenti naturali di radiazione:

- raggi cosmici*
- radionuclidi presenti nell'ambiente (uranio, radon)*
- radionuclidi presenti nel corpo (^{40}K , ^{14}C)*

Unità dosimetriche:

Sono state introdotte per valutare gli effetti sul un corpo dell'assorbimento di energia dovuta alle radiazioni di origine nucleare (“ionizzanti”).

Unità di misura:

- “attività” → **bequerel (Bq)**: numero di particelle ionizzanti che colpisce il corpo*
- “dose assorbita” → **gray (Gy)**: energia depositata per kg di peso; $1\text{Gy} = 1\text{J/kg}$*
- “dose equivalente” → **sievert (Sv)**: dose assorbita per il “fattore di qualità” della radiazione (alto per neutroni e nuclei pesanti, =1 per elettroni e gamma)*

Qualche dato

Tipicamente

- la radiazione cosmica è circa 0,3 mSv/anno al livello del mare (circa il doppio a 1000 m)*
- i radionuclidi presenti nel corpo umano sono circa 0,3 mSv/anno*
- la radioattività ambientale varia molto da zona a zona*

Radioattività ambientale in alcune città italiane

Ancona	0.85	Napoli	2.13
Aosta	0.49	Palermo	0.90
Bari	0.83	Perugia	0.86
Bologna	0.80	Potenza	1.31
Cagliari	0.86	Reggio Cal.	1.28
Campobasso	0.69	Roma	1.58
Firenze	0.77	Torino	0.86
Genova	0.75	Trento	0.84
L'Aquila	0.82	Trieste	0.76
Milano	0.82	Venezia	0.7

*Limite raccomandato di massima esposizione:
15 mSv/anno*

Dose "letale": 2,5 - 3 Sv

Un po' di conti

Per i contatori geiger che verranno usati si può stimare:

- una massa di circa 1 g nella zona sensibile*
- energia media depositata dalla singola particella circa 10^{-13} J (0,5 MeV)*
- fattore di qualità circa 1 (i nuclei pesanti vengono bloccati dalla finestra di protezione del tubo geiger)*

Per passare da Bq (conteggio medio al secondo) a mSv/anno:

$1 \text{ Bq} \approx 10^7 \text{ conteggi/anno}$ (1 anno = 365 giorni * 24 h/giorno * 3600 s/h)

$1 \text{ conteggio nel contatore} \rightarrow 10^{-13} \text{ J}/10^{-3} \text{ g} = 10^{-10} \text{ Sv}$

$10^7 \text{ conteggi/anno} \rightarrow \approx 10^{-3} \text{ Sv/anno} \approx 1 \text{ mSv/anno}$

→ quindi un conteggio/secondo è ben al di sotto del limite raccomandato!

