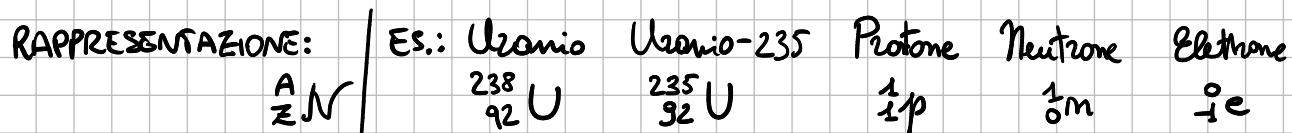


REAZIONI NUCLEARI

Mentre le reazioni chimiche comportano trasformazioni della struttura elettronica degli atomi, le reazioni nucleari comportano trasformazioni dei nuclei atomici dei reagenti in nuclei di natura diversa, con alterazioni del numero atomico Z - che rappresenta la quantità di protoni nel nucleo - e del numero di massa A - che rappresenta la quantità di particelle (protoni e neutroni) presenti nel nucleo. Questo, come vedremo, comporterà anche una "violazione" della legge di conservazione della massa, in quanto registreremo un deficit di massa nei prodotti rispetto ai reagenti.



Cosa causa una reazione nucleare?

Semplicemente, non tutti i nuclei di tutti gli elementi esistenti sono stabili. Una condizione di stabilità è dettata proprio dal numero di particelle che compongono il nucleo, mettendo in funzione il numero atomico con il numero di neutroni. Ad esempio, il trizio (T o $3H$) è instabile a differenza dell'idrogeno puro e del deuterio, che posseggono entrambi un solo protone e - rispettivamente - 0 e 1 neutrone, e decade producendo elio-3 ($3He$) e un elettrone (decadim. beta).

Quando un nucleo è instabile, tenderà appunto a decadere, portando alla formazione di un nuovo elemento completamente diverso, più vicino alla "fascia di stabilità", oppure perdendo uno o più neutroni fino all'equilibrio.

Il decadimento radioattivo è un insieme di processi che portano alla trasmutazione di un elemento, con l'espulsione dallo stesso di particelle e di elevata energia. In base alla natura di questa energia, classifichiamo i decadimenti:

- ▷ DECADIMENTO α : $\frac{A}{Z} N \rightarrow \frac{A-4}{Z-2} N + \alpha$, con $\alpha \equiv {}^4_2\text{He}$ ($2n+2p$)
- ▷ DECADIMENTO β : $\frac{A}{Z} N \rightarrow \frac{A}{Z+1} N + e^- + \bar{\nu}_e$ (antineutrino)
- ▷ DECADIMENTO μ

α solo per elementi pesanti ($Z > 83$); β per elementi con neutroni in eccesso
Il decadimento può essere naturale o indotto (bombardando l'elemento).

ELEMENTI ARTIFICIALI

L'elemento naturale con il massimo numero atomico è l'Uranio. Gli elementi artificiali, o transuranici, sono ottenuti attraverso il bombardamento di atomi pesanti. Tra questi, il Plutonio riveste un ruolo importante sia per le applicazioni belliche sia per quelle civili (reattori autofertilizzanti).

DEFICIT DI MASSA

Per il bilanciamento di una reazione nucleare valgono le regole di conservazione del numero di massa totale e del numero atomico totale: prodotti e reagenti devono avere uguali le somme di tutti i numeri di massa e di tutti i numeri atomici. Queste leggi si sostituiscono alla legge di conservazione della massa di Lavoisier, che non vale più in reazioni come quelle nucleari che presentano un deficit (o un surplus) di massa nei prodotti rispetto ai reagenti.

Infatti, nelle reazioni nucleari una piccola ma rilevante percentuale di massa è annichilita, trasformandosi in energia secondo la legge di Einstein.

$$E = mc^2 \rightarrow \text{Teoricamente, annichilendo 1 kg di massa:}$$

con $c \approx 2,99 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

$$E = 1 \cdot (2,99 \cdot 10^8)^2 \approx 89,9 \cdot 10^{15} \text{ J}$$

Si ha un deficit di massa in TUTTE le reazioni che comportano uno sviluppo di energia. Tuttavia:

REAZIONE	DEFICIT	
Fissione	0,05%	} → Si applica il principio di conservazione della massa/energia
Fusione	0,7%	
Combustione	$\sim 10^{-10}$	→ Si applica il principio di conservazione della massa (Lavoisier)

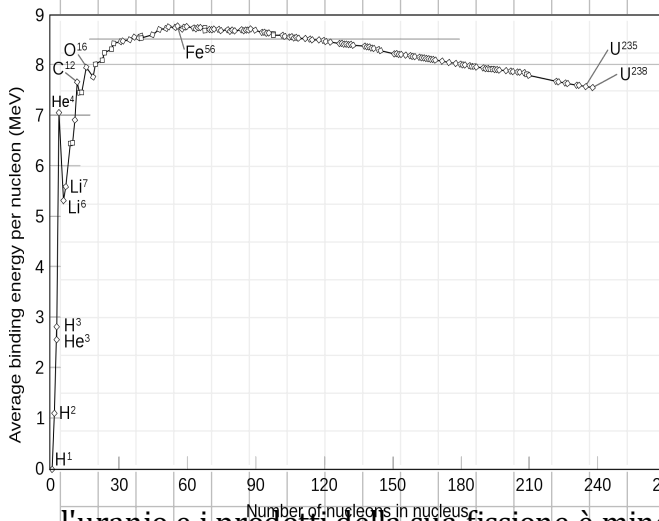
L'ENERGIA DI LEGAME

La massa di un atomo non è esattamente uguale alla massa delle particelle di cui è formato.

Vediamo l'esempio dell'atomo di ossigeno:

$$8p^+ + 8n + 8e^-: m_{\text{tot}} = 16,131920 \text{ una} - m_{\text{(O)}} = 15,994910 \text{ una} = \text{DEF. } 0,137010 \text{ una}$$

Alla differenza di massa legata alla formazione di un singolo atomo di ossigeno corrisponde, per l'equazione di Einstein, lo sviluppo di una energia pari a 127.6 eV, detta energia di legame. L'energia in gioco nei legami chimici è invece dell'ordine di pochi eV.



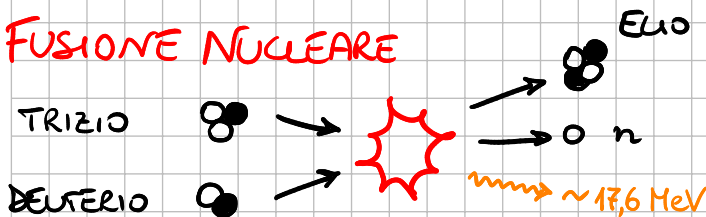
Il diagramma a lato riporta l'energia di legame media per nucleone dei vari elementi.

Questa energia assume il massimo valore per gli elementi, come ferro e nichel, più stabili e più diffusi sulla Terra.

Le trasformazioni nucleari che danno luogo alla formazione di elementi con energia di legame maggiore comportano uno sviluppo di energia. Naturalmente, fissione e fusione ricadono in questa categoria.

È bene notare che la differenza di energia di legame tra l'uranio e i prodotti della sua fissione è minore rispetto al salto energetico che invece si ha tra l'idrogeno e il prodotto della sua fusione (elio). Non sorprende sapere che la fusione nucleare ha infatti una densità energetica molto maggiore.

FUSIONE NUCLEARE



Mettiamo subito in chiaro una cosa: due nuclei di idrogeno sono entrambi carichi positivamente e tenderanno a respingersi con una forza tanto maggiore quanto minore è la distanza.

Ecco quindi il primo problema della fusione nucleare: l'elevata energia di attivazione.

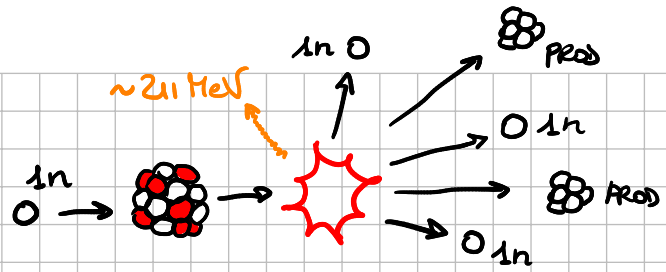
Se riusciamo in qualche modo a portare i due nuclei entro una certa distanza, avranno il sopravvento gli "strani" principi della meccanica quantistica, e potrà avere luogo il processo di fusione nucleare. La fusione dell'idrogeno richiede il raggiungimento di una temperatura interna del fluido di milioni di gradi. Nel Sole - alimentato interamente da questo processo - la fusione è mantenuta attiva dalle estreme condizioni di pressione e temperatura del nucleo. Qui sulla Terra, la situazione è leggermente più complicata...

Il processo di fusione è stato riprodotto nelle bombe a idrogeno, alcuni degli ordigni più potenti mai realizzati, nei quali tuttavia il processo è avviato usando come innesco una bomba a fissione.

I vantaggi rispetto alla fusione sono importanti: parliamo di una maggiore densità energetica, maggiori rendimenti, disponibilità quasi illimitate di materia prima e produzione di scorie non radioattive. I soli problemi del contenimento del fluido e dell'energia di attivazione rendono questa tecnologia inutilizzabile al giorno d'oggi, e forse per i prossimi 50 anni (stima che ormai rimane invariata da più di 50 anni...

FISSIONE NUCLEARE

Il processo di fissione nucleare è innescato da un neutrone dotato di opportuna energia, liberato da processi di radioattività naturale o artificialmente.



I combustibili nucleari impiegati sono generalmente l'uranio arricchito al 3,6%, oppure Uranio-233 e Plutonio-239, prodotti entrambi tramite reazione nucleare a partire dal Torio e dall'Uranio-238. Esaminiamo la fissione del ^{235}U .



AVVIO, "BOMBARDAMENTO" \rightarrow Nucleo intermedio (fortem. instab.) \rightarrow PRODOTTI + 2 NEUTRONI

I 2 neutroni possono generare una reazione a catena!

Ad ogni modo, ogni fissione libera 211 MeV di energia.

$$211 \text{ MeV/atomo} \approx 8,8 \cdot 10^3 \text{ J/kg} \quad \text{Per paragone: } H_i(\text{benzina}) = 47 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$$

$$\text{Dunque: } \frac{E(u)}{E(b)} = \frac{8,8 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}_u}}{47 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}_b}} \approx 1,87 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}_b}{\text{kg}_u} \rightarrow 1 \text{ kg URANIO} \approx 1870 \text{ t BENZINA}$$

LA REAZIONE A CATENA

DEFINIZ.: k , "COEFF. DI MOLTIPLICAZIONE" $\rightarrow k = \frac{\text{numero di neutroni in una generazione}}{\text{numero di neutroni nella generazione precedente}}$

k è simile al coefficiente di contagio di un virus. Dunque se: \rightarrow

- $\triangleright k > 1$: la reazione aumenta
- $\triangleright k < 1$: la reazione si estingue
- $\triangleright k = 1$: la reazione si mantiene stabile

La probabilità che un neutrone incontri un altro nucleo di uranio dipende dalla massa e dalla disposizione geometrica del materiale fissile. Quando la massa fissile supera la "massa critica", si innesca una reazione a catena che, se non controllata, può diventare esplosiva. È necessario quindi imporre del materiale che "moderi" la reazione a catena assorbendo una parte dei neutroni al posto dell'uranio. Qui entrano in gioco cadmio, boro e afnio. NOTA: da non confondere con i "moderatori".

MODERATORI

I MODERATORI veri e propri sono ben altra cosa.

Iniziamo spiegando che i neutroni prodotti da una fissione possono presentare un ampio spettro di velocità - e quindi di energia. I neutroni lenti (detti "termici", per energie cinetiche inferiori ai 0.025 eV) sono più facilmente assorbiti dai nuclei di materiale fissile, ed è quindi opportuno rallentare eventuali neutroni "veloci": questo avviene allocando dei moderatori nel volume occupato dal combustibile.

Per questo ruolo sono impiegate tipicamente sostanze dal basso peso molecolare, come berillio, idrogeno e carbonio (sotto forma di grafite), le quali rallentano i neutroni prodotti dalla fissione, assorbendone idealmente il minor numero possibile.

REATTORI AUTOFERTILIZZANTI

Un reattore autofertilizzante è un reattore a fissione progettato per lavorare con una conversione media di fissili in rapporto maggiore di uno con la quantità fissionata, cioè progettato per produrne più di quanti ne consumi durante la vita di una carica.

I neutroni prodotti dalla fissione sono assorbiti da nuclei di Uranio-238 che diventa Uranio-239 (instabile), salvo poi decadere beta fino a diventare Plutonio-239 (fissile).

La propagazione della reazione a catena è dovuta prevalentemente ai neutroni veloci, che permettono elevatissimi flussi termici (con notevoli problemi di controllo). Bisogna inoltre ricordare che il Plutonio-239 non è presente in natura, ed è estremamente pericoloso a causa della notevole radioattività: se anche non è sufficiente a causare un'esplosione dell'ordine di un ordigno atomico, il raggiungimento della massa critica causa comunque la fissione spontanea del materiale, con emanazione di dosi massicce e letali di radiazioni. La forma geometrica del materiale è molto rilevante, e andrebbero evitate forme compatte (come quella sferica). Il plutonio metallico, inoltre, reagisce con idrogeno e ossigeno formando idruro di plutonio, che si infiamma spontaneamente nell'aria.

FLUSSI TERMICI IN UN REATTORE NUCLEARE

Un fluido refrigerante ha il compito di asportare il calore prodotto da una reazione nucleare.

Vi è però una limitazione alla temperatura massima raggiungibile dal fluido (e quindi alla temperatura di funzionamento dell'impianto), che si aggira intorno ai 300-400°C e che è dovuta ai seg. fattori:

► TRASFORMAZIONE ALLotropica: URANIO- α \rightarrow URANIO- β (667°C)
Meno denso \rightarrow Più fragile ⚠

► Povera conduzione del calore nell'Uranio

Il calore è generato all'interno del materiale, e deve arrivare in superficie per conduzione!

$$\lambda_{ur} = 27,6 \text{ W/mK} \quad (\text{Per paragone: } \lambda_{Fe} = 80,4 \text{ W/mK} \approx 3 \lambda_{ur})$$

Come conseguenza, il rendimento termodinamico di un impianto nucleare è minore del rendimento di un impianto termoelettrico a vapore.

E quale ordine di grandezza raggiungono esattamente i carichi termici in un reattore nucleare?

CALDAIA:	C.C. TURBINE A GAS FISSE:	C.C. TURBINE A GAS AVIO:	NOCCIOLLO REATTORE:
500 ~ 5000 kW/m ³	10 ~ 30 MW/m ³	50 ~ 150 MW/m ³	100 ~ 600 MW/m ³ (Da 20 a 120 volte una grande caldaia)

RAFFREDDAMENTO DEI REATTORI NUCLEARI

LWR - Reattore ad acqua leggera (light water)

- PWR - Reattore ad acqua pressurizzata (pressurized water)

- BWR - Reattore ad acqua bollente (boiling water)

HWR - Reattore ad acqua pesante (heavy water, ossigeno e deuterio)

- Nel PWR l'acqua del circuito primario che è direttamente in contatto con il nocciolo del reattore è posta in condizioni di pressione tali da impedirne l'evaporazione anche ad elevate temperature. Quest'acqua primaria è usata come fluido di scambio intermedio per riscaldare acqua in un circuito secondario: quest'ultima PUÒ invece evaporare e quindi espandere in turbina - producendo lavoro meccanico. Ovviamente ciò comporta maggiori perdite termiche e quindi minori rendimenti, nonché maggiori costi e complessità d'impianto. D'altro canto, si rivela più sicuro rispetto al BWR.
- Nel BWR, infatti, all'acqua è permesso di bollire, diventando vapore, per poi espandere direttamente in turbina, senza scambi energetici intermedi - e dunque con un maggior rendimento. Il problema è che il vapore prodotto direttamente nel circuito primario, essendo stato in contatto diretto con il nocciolo, porta con sé la radioattività del combustibile; in caso di danni all'impianto, si avrebbero perdite di vapore radioattivo, con un maggior potere di penetrazione e con una maggiore difficoltà di contenimento rispetto all'acqua primaria del PWR.
Delle pompe di ricircolo sono usate nel recipiente del nocciolo per migliorare lo scambio convettivo.
- Nel PHWR è impiegata acqua pesante (D₂O) pressurizzata, che di fatto migliora "l'economia dei neutroni" del reattore eliminando la necessità di impiegare combustibile arricchito. Di contro, questo tipo di reattore impiega acqua pesante (costosa) e consuma una maggior quantità di combustibile [Wikipedia EN].