

Fondamenti di energia nucleare

- Prospettive sull'utilizzo della fusione nucleare –

Ing. Giovanni Zurlo

Club Dirigenti Tecnici

28 Novembre 2025

Premessa

- La scoperta dell'energia nucleare è stata una delle principali conquiste scientifiche del Novecento scoprendo che nei nuclei degli elementi chimici si cela un'enorme quantità di energia.
- Le applicazioni tecnologiche si sono rivelate vantaggiose nei campi:
 - civile con generazione di elettricità dalla fissione nucleare e, in futuro, dalla fusione nucleare
 - sanitario con la diagnosi e la cura di diverse malattie con le radiazioni nucleari.
 - industriale con le radiografie di giunzioni e saldature
 - archeologico con la datazione dei reperti con il Carbonio 14.
- Ci sono state anche applicazioni distruttive con la creazione di ordigni bellici di enorme potenza

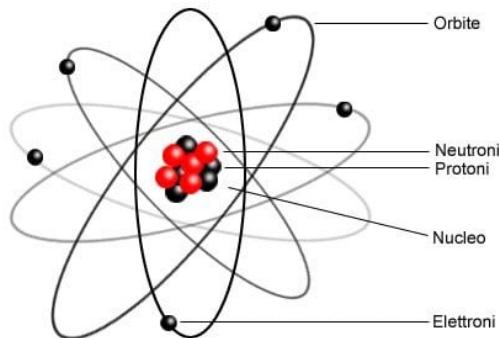
Premessa

Nella questione sull'impiego dell'energia nucleare si mescolano fattori tecnico-scientifici ed economici, come anche sociali e geopolitici: lasciando da parte questi ultimi abbiamo voluto dare un piccolo contributo al dibattito sul nucleare per comprendere meglio il ruolo che il nucleare potrà assumere nella transizione energetica e nella decarbonizzazione dei sistemi produttivi nonché esaminare le opportunità che la ***"Nuclear Supply Chain"*** può dare all'industria italiana.

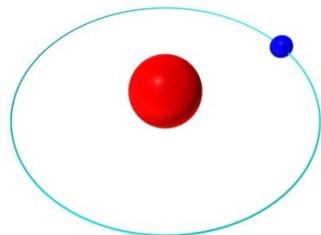
In questa prima relazione illustrerò alcuni concetti base su come si realizzano la fissione e la fusione nucleare, sperando con ciò di rendere più agevole la comprensione delle relazioni successive.

Cos'è l'energia nucleare ?

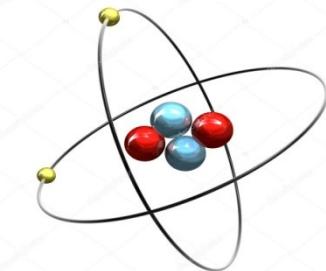
- Con energia nucleare s'intendono tutti quei fenomeni fisici in cui si produce energia grazie alla trasformazione dei nuclei atomici: è una “**fonte primaria**” ossia non derivata dalla conversione di altre forme di energia, come invece per l'energia elettrica.
- Fra fine Ottocento e inizio Novecento una serie di scoperte scientifiche hanno fatto comprendere la struttura interna degli atomi e le proprietà fisiche dei loro componenti essenziali: protoni, neutroni ed elettroni.



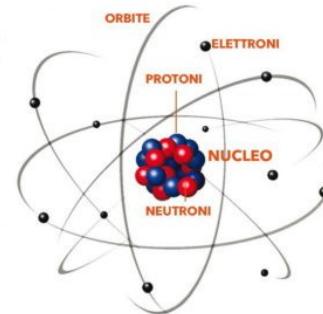
Atomi e radiazioni



H ==> N=1 Z=1



He ==> N=2 Z=4



U ==> N = 92 Z = 238

Fu scoperto il fenomeno naturale della radioattività per cui alcuni nuclei atomici sono instabili, ossia decadono spontaneamente in nuclei atomici più emettendo “particelle” subatomiche di varia natura indicate come “radiazioni”.

Agli inizi del Novecento si scoprì che l'uranio emetteva spontaneamente radiazioni in modo assolutamente non modificabile e poco tempo dopo si verificò che le radiazioni emesse da vari elementi erano di tre tipi:

Alfa (2 protoni + 2 neutroni) poco penetranti e coincidenti con un nucleo di elio

Beta (1 elettrone) mediamente penetranti

Gamma (onde elettromagnetiche) frequenza > dei raggi X e molto penetranti



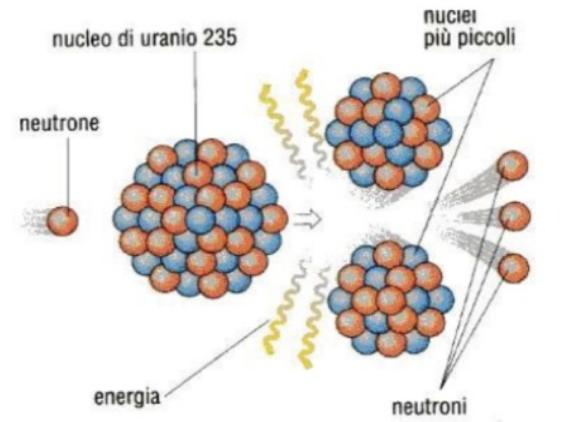
Atomi e radiazioni



- Il problema delle scorie radioattive deriva dal fatto che non si può modificare con nessun mezzo frequenza e intensità delle radiazioni emesse dal combustibile “esausto” e l'unica cosa che si può fare è aspettare che si “esaurisca” con i tempi di dimezzamento che gli sono propri e che dipendono dalla tipologia dei prodotti della fissione dell'uranio o del plutonio usati come combustibile
- Perché le radiazioni sono biologicamente dannose? Perché ionizzano atomi e molecole strappando uno o più elettroni, causando la rottura dei legami chimici e danneggiando quindi i tessuti.
- Paradossalmente è per lo stesso motivo che le radiazioni si possono utilizzare anche in modo terapeutico nella cura dei tumori in quanto le cellule malate sono meno efficienti di quelle sane nella riparazione del DNA ionizzato dalle radiazioni e quindi si “auto-eliminano” dall'organismo.
- In campo industriale si utilizzano per verificare l'integrità di componenti meccanici

La fissione nucleare

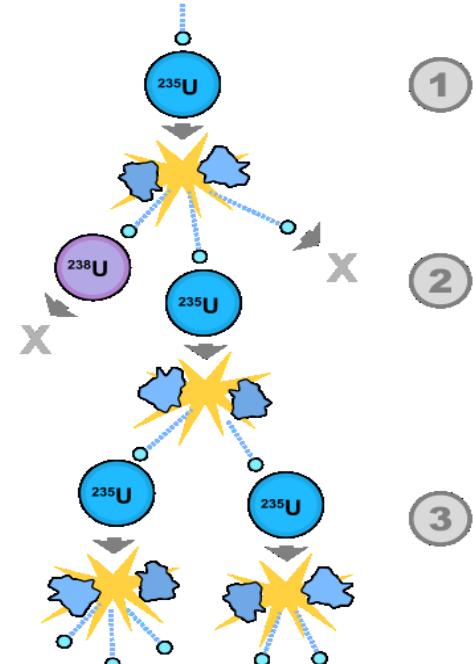
La fissione nucleare consiste, schematizzando, nella rottura (scissione) tipicamente di Urano-92, Plutonio-94, Torio-90, ad opera di un neutrone che impatta sul nucleo spezzandolo in due frammenti, ossia due atomi più piccoli la cui massa complessiva è minore di quella dell'atomo iniziale il che, per la celebre equazione di Einstein $E=mc^2$, libera l'energia in cui si è trasformata la massa “scomparsa”



La reazione a catena

Schema di una tipica reazione nucleare a catena:

- 1) Un nucleo di Uranio-92/235 viene "bombardato" da un neutrone e avviene la fissione che spezza il nucleo in due atomi (ad es. Kr-36/Z1 e Ba-56/Z2) con $Z_1+Z_2=235-3 \rightarrow$ isotopi radioattivi di Kr e Ba liberando tre neutroni + l'energia detta prima
- 2) Uno di questi tre neutroni è assorbito ad esempio da un altro nucleo di Uranio-92/238 ed è perso nel bilancio della fissione. Un secondo neutrone può fuggire dal sistema o essere assorbito da un elemento che non continua la reazione. Il terzo neutrone collide con un nucleo di uranio-235 che si spezza in due liberando due neutroni e dell'energia
- 3) I due neutroni liberati si scontrano con due nuclei di uranio-235 e ogni nucleo libera da uno a tre neutroni (in media 2,4) che fanno continuare la reazione a catena.



Neutroni “lenti” e neutroni “veloci”

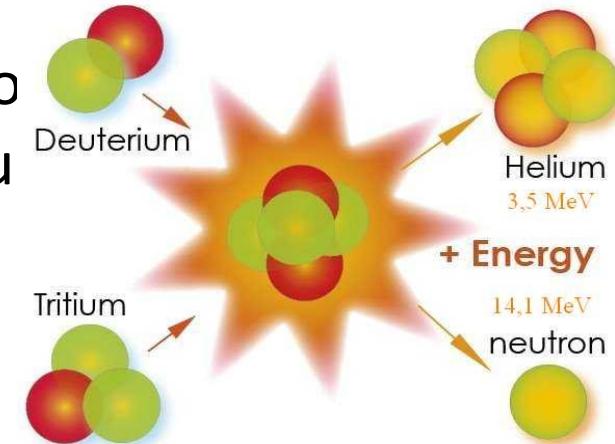
- La prima reazione a catena bombardando uranio naturale (miscela di U-92/238 al 99,3 % e U-92/235 allo 0,7 %) con neutroni fu ottenuta da Fermi nel 1934 a Roma insieme con i suoi collaboratori noti come “I ragazzi di Via Panisperna” e con neutroni fu ottenuta da Fermi nel 1934
- Senza scendere in dettagli tecnici basti sapere che “l’efficienza” di una reazione a catena dipende sia dal materiale bombardato che dalla velocità dei neutroni che impattano sul nucleo-bersaglio fissionandolo: i principali isotopi fissili sono, con i neutroni lenti ($E = 0,025 \text{ eV}$): U-92/233, U-92/235, Pu-94/239; con i neutroni veloci: Th-90/232, U-92/238

Neutroni “lenti” e neutroni “veloci”

- L’U-92/238 si dice anche “fertile” perché assorbendo un neutrone ed emettendo successivamente due elettroni si trasforma in Pu-94/239, che è fissile con i neutroni lenti
- La varietà di materiali fissile/fertile e neutroni lenti/veloci spiega, anche se solo in parte, le diverse tipologie di reattori nucleari che vi saranno illustrate dai relatori successivi
- In ultimo cito il “fattore di moltiplicazione” K - rapporto fra il numero di neutroni di una “generazione” e quello della generazione precedente - che determina se la reazione a catena si mantiene ($K=1$) , si estingue ($K<1$) o diverge ($K>1$): le barre di controllo mobili, spesso di boro o cadmio che sono dei forti assorbitori di neutroni, possono essere inserite o estratte nel “nocciolo” del reattore e in questo modo si può variare K]

La fusione nucleare

Nelle reazioni di fusione nucleare due nuclei di atomi leggeri si fondono generando un nucleo di elementi più pesanti, ma di massa minore della loro somma e liberando l'energia determinata anche in questo caso da $E=mc^2$.



Questo processo è quello che genera l'energia irraggiata dalle stelle, ma per attivarsi richiede di fare avvicinare due nuclei fino a fare prevalere la forza nucleare di attrazione a corto raggio su quella di repulsione elettrostatica fra i protoni dei nuclei (ad esempio *Deuterio* e *Trizio*, isotopi dell'idrogeno): è necessaria una temperatura di più di 100 milioni di gradi mantenuta per un tempo sufficiente ad attivare la fusione.

La fusione nucleare

L'energia liberata è enormemente superiore a quella generata dalle reazioni chimiche di combustione ed è anche nettamente superiore, **a parità di materiale coinvolto**, a quella di fissione: nella reazione di un grammo di *Deuterio-Trizio* si libera la stessa energia ottenuta bruciando 11 tonnellate di carbone, senza immettere nell'atmosfera una sola molecola di CO₂.

- Per chi volesse approfondire gli aspetti più tecnici della fusione nucleare, questo sito dell'ENEA è accurato ed esaustivo:
- <https://www.enea.it/it/attivita-internazionali/relazioni-con-unione-europea/euratom-eurofusion.html?highlight=WyJmdXNpb25IiwiZGlmZnVzaW9uZSIslmVuZXJneWV1cm9mdXNpb24iLCJldXJvLWZ1c2lvbilsImV1cm9mdXNpb24iLCJmdXNpb24iLCJudWNsZWFrZSIslmVsZXR0cm9udWNsZWFrZSIslm51Y2xIYXJpliwbnVjbGVjbyJd>

La fusione nucleare

- Produrre energia elettrica da fusione si è rivelata impresa molto più difficile di quanto si pensasse, ma potrebbe risolvere la maggior parte dei problemi energetici mondiali:
- La fonte di energia sarebbe praticamente inesauribile, senza emissione di inquinanti nocivi o di *gas serra*
- le scorie radioattive sarebbero bassissime perché il prodotto principale della fusione è ${}^4\text{He}$: gas inerte e non radioattivo
- Le difficoltà sono di ordine tecnologico: la fusione nucleare è ben nota dal punto di vista scientifico, ma con le temperature dell'ordine dei milioni di gradi, deuterio e di trizio esistono solo come plasma (gas completamente ionizzato): deve essere confinato in uno spazio ristretto mediante campi magnetici.
- Per giunta anche il meccanismo di asportazione del calore deve essere coerente con le temperature suddette.

La fusione nucleare

- Queste difficoltà, prolungatesi nel tempo ben di più di quanto fosse prevedibile, fanno pensare che la generazione commerciale di energia elettrica da fusione nucleare non sia ancora dietro l'angolo: poiché già negli anni '80 si diceva ottimisticamente che mancavano "poco più di venti anni" se ne conclude che l'orizzonte temporale della fusione nucleare si è spostato finora con la stessa velocità del trascorrere del tempo...
- Da alcuni anni c'è stata tuttavia un'accelerazione significativa dei progetti tesi a realizzare centrali-prototipo entro tempi contenuti, sia sul versante pubblico con consorzi internazionali sia attraverso iniziative finanziate da investitori privati

ITER



Attualmente il progetto più promettente appare essere ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) il cui reattore è attualmente in costruzione a Cadarache, nel Sud della Francia. Il progetto è sostenuto da un consorzio internazionale del quale fanno parte l'Europa, con Euratom, che partecipa per il 45% e, con quote di poco più del 9% ciascuno, USA, Russia, Cina, Giappone, India e Corea del Sud.

ITER



Fig.3 Interno di ITER: l'anello toroidale di confinamento del plasma Deuterio-Trizio

Obiettivo di ITER, che dovrebbe essere operativo dal 2030, è lo sviluppo di una tecnologia che dimostri l'effettiva possibilità di ottenere la fusione nucleare controllata in grado di produrre continuativamente più energia di quanta ne occorra per innescare e sostenere il processo stesso, ossia ottenere un fattore di guadagno Q, maggiore di 1.

ITER



A conclusione di questa panoramica sulla fusione nucleare suggerirei di prendere col beneficio d'inventario gli articoli e i comunicati che si avvicendano su Internet dandola per imminente o quasi e ricordare che il direttore dei programmi di EuroFusion Tony Donné ha dichiarato che da parte delle società private coinvolte nella realizzazione della fusione nucleare sono fatte spesso affermazioni **estremamente ottimistiche** sui tempi previsti “essenzialmente per attirare gli investimenti”



Informo che è stato recentemente pubblicato lo Standard ISO 19443, estensione della ISO 9001 al Settore Nucleare, richiesta per la certificazione delle imprese che intendono fare parte della **Nuclear Supply Chain** fornendo prodotti/servizi “Importanti per la Sicurezza Nucleare”
(ITNS – Important To Nuclear Safety)

Per “**sicurezza nucleare**” così come espressa dallo Standard s'intende la prevenzione di situazioni anomale, quali guasti o incidenti, che possano sfociare nel Rilascio, all'interno o all'esterno della centrale, di radiazioni potenzialmente dannose ed è richiesto di condurre analisi del rischio per identificare le modalità con cui eventuali malfunzionamenti dei prodotti o carenze dei servizi forniti possono impattare sulla sicurezza nucleare mettendo in atto quanto necessario per prevenirli.