

Diritto al compenso per la realizzazione riservato

Autori:

Abundo Ugo, Burgognoni Alessandro, Cuccioli Quirino, Di Lecce Michele, Pieravanti Paola, Saporito Salvatore Luciano, Venuto Angela

Titolo:

Progetto di Impianto e Processo per la produzione in massa, controllata
a richiesta, di Positroni ed Elettroni mediante conversione diretta di
energia nucleare in elettrica

RELAZIONE

Novità e utilità del processo e del relativo impianto

La disponibilità di energia è motore di sviluppo economico, e se l'energia è distribuita e alla portata di tutti i Popoli, essa è anche fonte di democrazia e progresso sociale.

Le caratteristiche dell'impianto progettato costituiscono esse stesse, ciascuna, il superamento di uno specifico problema presente nella tecnologia ad esso precedente.

L'impianto in oggetto permette di produrre energia controllata, da fusione nucleare di elementi leggeri, largamente diffusi sul pianeta Terra, fornendo così una fonte praticamente illimitata di energia, economica, senza utilizzo di combustibili fossili, senza emissione di CO₂, senza utilizzo di combustibili intrinsecamente radioattivi, senza produzione di elementi instabili dalla lunga vita radioattiva, senza necessità di alimentazione energetica esterna, con alta densità di energia prodotta (KWh prodotti/Kg di combustibile), basato su reazioni ben conosciute e verificate sia teoricamente che sperimentalmente nei più importanti laboratori di ricerca internazionali.

Altresì, detto impianto realizza la conversione diretta da energia nucleare ad elettrica, evitando le perdite di rendimento associate alla trasformazione tra tipi nucleare-termico-elettrico, ed evitando pertanto l'introduzioni di parti in movimento (soggette a maggior logoramento rispetto agli apparati allo stato solido).

Accanto alla generazione elettrica diretta, c'è cogenerazione di calore, da utilizzare tal quale per impieghi termici, o a sua volta da trasformare in elettricità ad esempio mediante convertitori termoelettrici.

Si specifica che detto impianto produce, a richiesta, quantitativi regolabili di Positroni, da utilizzare per scopi medicali, di ricerca, ma soprattutto per applicazioni industriali, vista la possibilità che

offre, di produrne massicci quantitativi, di separarli dagli elettroni coprodotti, di immagazzinarli per la durata di tempo necessario alla manipolazione. Il **rapporto di produzione** tra positroni ed elettroni viene controllato sia mediante la scelta del materiale-bersaglio che dello spessore di ciascuno strato e della disposizione degli stessi.

La disponibilità di neutroni prodotti dal presente processo consente di irraggiare materiale radioattivo prodotto da centrali nucleari convenzionali, stabilizzando gli elementi instabili, cioè accelerando il loro naturale decadimento radioattivo verso nuclidi stabili, privi di emissioni, nel contempo ottenendone calore utile.

La stessa disponibilità di elevati flussi neutronici permette di ottenere, per attivazione neutronica a partire da elementi largamente disponibili, particolari isotopi degli stessi, diversi elementi rari e/o fonti artificiali di radiazioni, per scopi medicali, di ricerca, industriali. Infatti, ad esempio nel campo PET (Tomografia ad Emissione di Positroni) sono presenti numerosi problemi superabili adottando il processo in oggetto: attualmente i nuclidi instabili da impiegare vengono preparati in località diversa dal luogo di utilizzo poiché la preparazione necessita di grandi apparati (acceleratori lineari o ciclotroni, disponibili solo in grandi strutture centrali, e non in quelle delocalizzate di effettivo utilizzo della PET) per **accelerare protoni** da inviare sul bersaglio e produrre l'isotopo emettitore richiesto. La scelta degli isotopi è limitata dalla necessità che durino in vita per il tempo sufficiente al trasporto, e vanno impiegati poi immediatamente. Per risolvere almeno parzialmente tale difficoltà, la tecnologia si sta orientando verso nuovi isotopi ad emivita più lunga (**quali ad esempio gli isotopi del rame**), o dalle migliori caratteristiche a riguardo della compatibilità biologica, ma sempre a preparazione centralizzata.

Il presente processo **risolve drasticamente** il problema, offrendo una **vastissima scelta** di isotopi (e relative caratteristiche di durata, emissività, idoneità biologica) che inoltre possono finalmente venire preparati **anche** in loco, con la tecnica dell'**irraggiamento neutronico**, utilizzando piccoli apparati "da tavolo", economici, sia scelti tra quelli commercialmente disponibili nella categoria dei "generatori portatili di neutroni", che adottando la prima parte del processo, per la generazione.

Detto impianto, fermi i principi basilari, può essere realizzato a diverse scale, per produzioni portabili da tavolo, su scala laboratorio, di piccolo e medio impianto, su larga scala industriale (fatti salvi i criteri, ben noti, di ingegnerizzazione relativi ai passaggi di scala).

Nel panorama attuale, non sono noti esempi di impianti con dette prestazioni, e nel corso della presente relazione verranno di volta in volta assunte a termine di paragone specifiche realizzazioni competitive con sole porzioni **parziali** dell'impianto.

Ad esempio, uno degli impianti di cui sia noto il progetto attualmente, l'**ITER**, che mira a soluzioni parziali rispetto al presente impianto, necessita del mantenimento di temperature dell'ordine dei **milioni di gradi centigradi**, con evidenti complicazioni.

I fondamentali **“meccanismi” alla base** del presente progetto sono:

- La moltiplicazione dei **neutroni** di attivazione del processo;
- la trasformazione dell'energia degli **elettroni** emessi da particolari reazioni nucleari, in energia elettrica;
- la produzione di **positroni**, la loro separazione dagli elettroni emessi, l'immagazzinamento temporaneo

Si farà nel seguito riferimento alla Domanda di Brevetto Italiano prot. n. 102016000004163 del 19/01/2016, stessi Autori, **“Apparato e metodo per la produzione diretta di energia elettrica da radiazione carica e cogenerazione di calore mediante attivazione neutronica controllata di reazioni nucleari da elementi leggeri”** (apparato nel seguito denominato **“HEE”**, cioè “Heat and Electricity Extractor”) a cui il presente Progetto apporta sostanziali soluzioni progettuali e di cui costituisce esempio di applicazione industriale.

Schema e funzionamento:

Quanto di seguito riportato è da intendersi riferito ai disegni acclusi nella sezione “Schemi”.

Obiettivi del processo in oggetto

Il processo mira alla cogenerazione di energia elettrica e termica da reazioni nucleari senza alimentazione di combustibile radioattivo nè produzione di rifiuti radioattivi a lunga emivita

Idoneità del processo per la stabilizzazione di rifiuti radioattivi

Il processo può abbattere la radioattività di rifiuti nucleari mediante attivazione neutronica

Innovazioni rispetto alle LENR convenzionali

Nelle LENR le reazioni coinvolte non sono ancora pienamente convalidate e necessitano di una energia in ingresso

Il processo comprende solo reazioni pienamente validate dalle attuali conoscenze scientifiche e non necessita di energia in ingresso (in regime continuativo)

Fasi coinvolte

- a) Irradiazione neutronica del Berillio con una sorgente di attivazione (ad es. Americio-Berillio, o Deuterio-Trizio, ecc.)
- b) Moltiplicazione neutronica per attivazione del Berillio
- c) Attivazione neutronica del Litio con emissione alfa per l'attivazione ciclica del Berillio
- d) Combustione del Trizio in bersaglio di Litio e Deuterio con emissione ciclica di alfa e neutroni
- e) Riflessione dei neutroni nella camera di reazione
- f) Cattura dei neutroni residui da parte del Boro
- g) Rimozione del calore da parte del fluido refrigerante, per impiego termico diretto e/o per conversione termoelettrica
- h) Conversione diretta dell'energia nucleare in elettricità
- i) Schermatura con Piombo, refrigerata

Tipo di energia prodotta

C'è cogenerazione di energia termica ed elettrica

COP previsto

La definizione di COP non è applicabile a quei casi, come per il presente processo, in cui c'è assenza di energia in ingresso, altrimenti la definizione ordinaria porterebbe ad un valore infinito. Lo si può sostituire con altri criteri, come la densità prevista di energia.

Densità teorica di energia

Supponendo che ogni grammo di Litio, nella composizione naturale, possa reagire con i neutroni, una combustione completa del campione di combustibile condurrebbe all'ordine di grandezza di quasi **10² MWh/grammo**, tenendo conto anche della resa della combustione del trizio.

(Peso atomico medio in composizione naturale = 6.925 e emissione media di energia dagli atomi di Litio = 16.56 MeV)

Una combustione parziale del 70% è ragionevole.

In tabella è mostrato il paragone tra le prestazioni del processo in oggetto e quelle delle pile al Plutonio, per quanto riguarda la sola estrazione di energia elettrica:

Table 1- typical expected values in the reactor

Output Power (electric)	Output Power (thermal)	Neutron rate	β rate	α rate
1 KW	1-2 KW ⁽¹⁾	$6 \times 10^{15}/\text{sec}$	$6 \times 10^{15}/\text{sec}^{(2)}$	$6 \times 10^{15}/\text{sec}^{(2)}$
10 KW	10-20 KW ⁽¹⁾	$6 \times 10^{16}/\text{sec}$	$6 \times 10^{16}/\text{sec}$	$6 \times 10^{16}/\text{sec}$

- (1). The optimal ratio between electric and thermal energy will be evaluated precisely during the R&D work. Moreover, it is also possible to get more electricity by converting the heat produced by the reactor with a solid state thermo-electric converter or with another kind of TE converter.
- (2) The estimated rate of neutrons, β and α is about the same.

Table 2- typical expected fuel consumption in the reactor (1 KW)

Service duration	Lithium consumption	Deuterium consumption	Target consumption
1 Year	20 grams	0.6 grams	32.5 grams
10 Years	200 grams	6 grams	325 grams

By comparing the expected performances of HEE against a typical Pu²³⁸ power generator on a **10 years** duration, with the goal of 1 KW power:

Power (electric)	Pu dioxide weight (radioactive)	Total HEE reactants (not radioactive)	Weight ratio (HEE reactants /Pu dioxide)
1 KW	50 Kilograms	about 530 grams	1 %

Nella tabella sopra riportata, estratta da un report sul Processo HEE di cui al brevetto citato, le prestazioni indicate dell'HEE sono le **massime teoriche**, pertanto va ancora tenuto conto di un rendimento, come già accennato, di circa il 20%, che porta la superiorità dell'HEE rispetto al caso del Plutonio, **a sole 20 volte**.

Reagenti e Prodotti coinvolti nelle reazioni

Il fascio di neutroni proveniente dalla sorgente di attivazione (ad es. Am-Be) trova in camera di reazione: Litio 6, 7 e in composizione naturale, Berillio 9, Titanio, isotopi di Nichel e Ferro, Trizio (inizialmente assente, prodotto dalle reazioni e poi bruciato internamente), Idrogeno, Deuterio, Acqua, Carbonio, Boro 10 e in composizione naturale, Elio, neutroni, elettroni, positroni, bersaglio a contenuto metallico (ad es. specifici isotopi o composizione naturale di Rame, Alluminio ecc.)

Eventuale radioattività naturale

Solo il Trizio, prodotto e bruciato internamente, è naturalmente radioattivo

Eventuali isotopi (reagenti o prodotti) con emivita lunga

Assenti

Eventuale necessità di concentrare il Litio 6 nella composizione del Litio

E' una possibile variante, ma non necessaria

Disponibilità dei reagenti sulla crosta terrestre

Tutti i reagenti sono largamente disponibili; solo il Trizio é indisponibile, ma é prodotto internamente e poi bruciato

Eventuale presenza di manipolazioni pericolose dei reagenti

Tutti i trattamenti sono di "grado industriale"

Eventuali emissioni radioattive durante l'operatività del reattore

Il reattore è progettato per funzionare intrinsecamente come un assorbitore di ogni tipo di radiazione e il processo è specificamente basato sulla stabilizzazione esoenergetica dei nuclei, evitando così intrinsecamente ogni possibilità di emissioni pericolose

Collocazione del processo nei riguardi del progetto ITER- DEMO

Il progetto ITER-DEMO comprende una prima sezione (**combustione Trizio-Deuterio**) nella quale un plasma di isotopi di Idrogeno a temperatura stellare reagisce producendo neutroni altamente energetici.

Nella seconda sezione (**mantello di assorbimento**) uno strato di Berillio modera i neutroni sia abbassando le loro energie mediante collisioni, che moltiplicando il loro numero per sopperire all'assorbimento da parte dei materiali strutturali e alle perdite nell'ambiente.

Nella terza sezione (***mantello di coltivazione***) uno strato di Litio (arricchito in Li^6) cattura esotermicamente i neutroni moderati, in modo da produrre Trizio da immagazzinare per futuro utilizzo come combustibile.

Il processo in oggetto presenta molte analogie e alcune fondamentali differenze rispetto all' ITER-DEMO:

- In entrambi, i fasci neutronici (originati, nel primo, da una piccola sorgente ad es. Am-Be o processo Deuterio-Trizio in un generatore portatile di neutroni e, nel secondo, dalla combustione del Trizio), collidono col Berillio per realizzare una fase di moderazione/moltiplicazione
- In entrambi, i neutroni moderati reagiscono col Litio per produrre energia e Trizio.
- In entrambi, gli strati di Litio e Berillio possono essere alternati
- Mentre, nell'ITER, sono impiegate enormi energie (continue) per l'attivazione della reazione Deuterio-Trizio, il presente processo può usare una sorgente neutronica priva di fabbisogno energetico dall'esterno, basata sull'accoppiamento tra una piccola sorgente spontanea di particelle alfa (Am^{241} , un rifiuto radioattivo delle centrali nucleari convenzionali) e Berillio, oppure un generatore portatile di neutroni, a modestissimo consumo (ordine delle decine di Watt), tra l'altro attivo solo in una fase iniziale di accensione dell'impianto
- Il presente impianto usa il Trizio prodotto, per la combustione interna, producendo così un'ulteriore grande quantità di energia (evitando nel contempo l'accumulo di un materiale radioattivo) e nuovi neutroni reindirizzabili al processo, realizzando in tal modo una moltiplicazione del fascio neutronico proveniente dalla piccola sorgente.
- Il presente è un processo intrinsecamente orientato verso la scala piccolo-media, particolarmente adatto ad una produzione distribuita di energia; ma non si presentano difficoltà nello scalarlo verso dimensioni maggiori, per una produzione centralizzata.

Le reazioni coinvolte

Nel seguito, le principali reazioni verranno esaminate una per una, in termini di reagenti, prodotti, loro spettri di energie, esotermicità globale, sezioni d'urto, soglie e rese, in dipendenza dai parametri di governo. (Per semplicità le reazioni verranno riportate senza evidenziare gli eventuali neutrini).

Livello di sezioni d'urto delle reazioni, da considerare idoneo per rese accettabili

Questo dipende da alcuni parametri principali, quali la densità atomica di nuclei nel bersaglio e le soglie energetiche di reazione.

Se le soglie energetiche di attivazione sono raggiungibili, un ruolo importante è giocato dalla densità atomica: infatti questa partecipa in modo proporzionale nel determinare la sezione d'urto *macroscopica*.

Così, in caso di bersaglio solido, una sezione d'urto bassa viene moltiplicata per un'alta densità atomica, rendendo idonea la sezione d'urto macroscopica.

Nel caso di bersaglio gassoso, questo deve venire assorbito in una matrice solida, per rendere alta la densità atomica.

In entrambi i casi, possiamo considerare idoneo un ordine di grandezza come quello del ^9Be , sperimentalmente stabilito come accettabile per l'impiego nel progetto ITER.

Come mostrato nella figura relativa alle sezioni d'urto, ^9Be ha una sezione d'urto di circa **0.5-0.6 barn**.

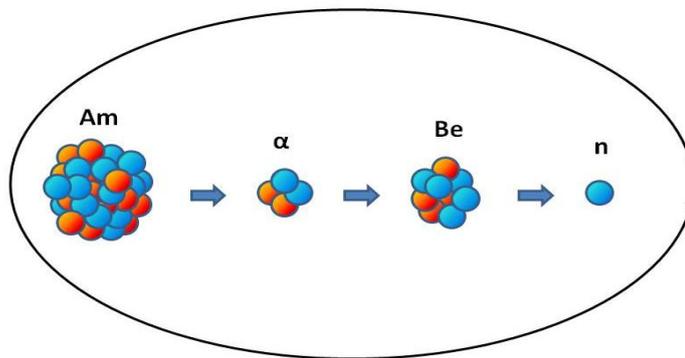
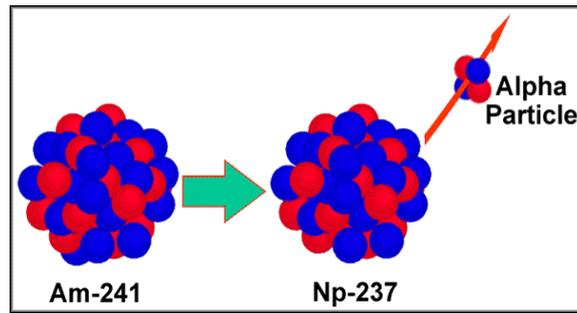
Nel seguito, questo valore sarà considerato come idoneo per qualsiasi reazione a bersaglio solido o a gas assorbito.

A proposito della sorgente radioattiva di neutroni "Americio-Berillio"

Coppia di reazioni Esotermiche combinate:

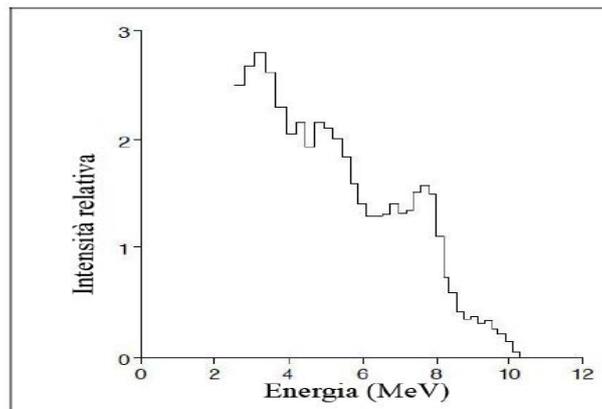


Schema:



Meccanismo:

Il ^{241}Am decade spontaneamente (emivita = 432 anni) in ^{237}Np emettendo una particella alfa energetica (e raggi gamma); il ^9Be , il solo isotopo stabile, ha un neutrone debolmente legato (1.66 MeV) che può essere espulso se il nucleo è colpito da una particella α con almeno 1.7 MeV (*energia di soglia*), con un tipico spettro di emissione, come in figura (estratto da: [http://www.bo.infn.it/nucl-ex/TESI TOMMASO MARCHI.pdf](http://www.bo.infn.it/nucl-ex/TESI_TOMMASO_MARCHI.pdf))



Sezioni d'urto e rese:

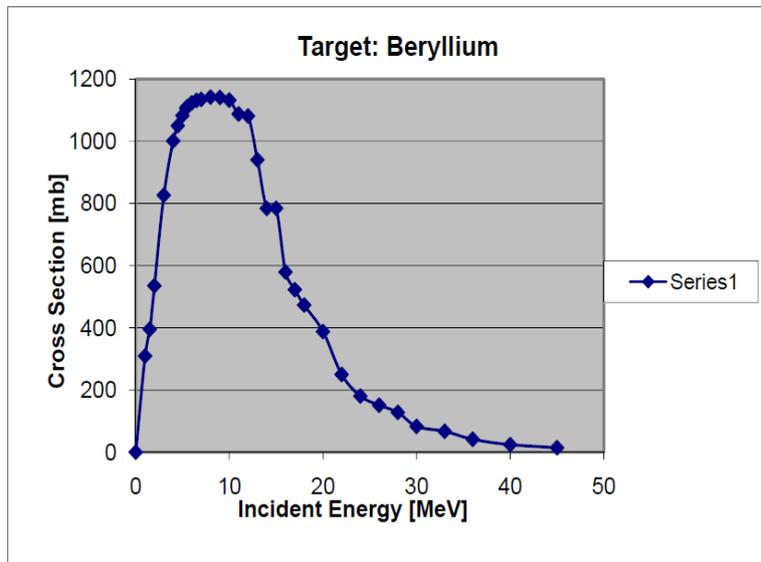


Fig. 1. Cross section variation of ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ in terms of incident energy

(from: *STUDY OF NEUTRON YIELD FOR THE ${}^{241}\text{Am}$ - ${}^9\text{Be}$ SOURCE*, T. KAKAVANDI et al.

http://www.sid.ir/en/VEWSSID/J_pdf/10012009A308.pdf)

Sarà utile, nel seguito, notare dal grafico che la sezione d'urto per α (2MeV) da Litio 6 è di circa **0.5 barn**.

La resa é fortemente influenzata dalla vicinanza tra Am e Be, in particolare dipende dalla densità atomica N :

$$\text{Neutron Yield} = N \int_0^{E_0} \frac{\sigma(E)}{dE / dX} dE$$

perciò la composizione chimica del composto del Berillio é molto importante, come mostrato nella tabella: paragonando le rese dell'ossido e dell'idruro (la migliore), si evidenzia un fattore di **un ordine di grandezza**, rendendo interessante preparare leghe Am-Be per via della massima vicinanza possibile tra i rispettivi atomi.

Table 2. Neutron yield measurements for Beryllium chemical combinations

Target	Stopping power) MeV/mm(Computed neutron yield
Beryllium Acetate	9.03E+01	336.163×10^{-7}
Beryllium Acetylacetonate	8.87E+01	169.62×10^{-7}
Beryllium Carbide	1.38E+02	1511.184×10^{-7}
Beryllium Hydride	6.31E+01	4397.992×10^{-7}
Beryllium Hydroxide	7.42E+01	976.609×10^{-7}
Beryllium Oxide	2.11E+02	595.299×10^{-7}
Beryllium Sulfate	1.26E+02	149.053×10^{-7}

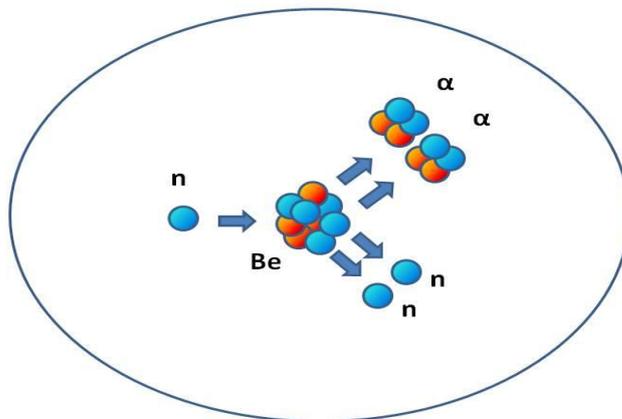
Così, in https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:36007965) si descrive un interessante metodo per preparare una lega (**composto Am Be 13**)

Riteniamo infine che grande importanza vada attribuita alla disposizione degli strati e alle loro proprietà chimico-fisiche, alle leghe e ai composti emettitore-bersaglio.

A proposito della reazione di moltiplicazione di neutroni da parte del ⁹Berillio



Schema:

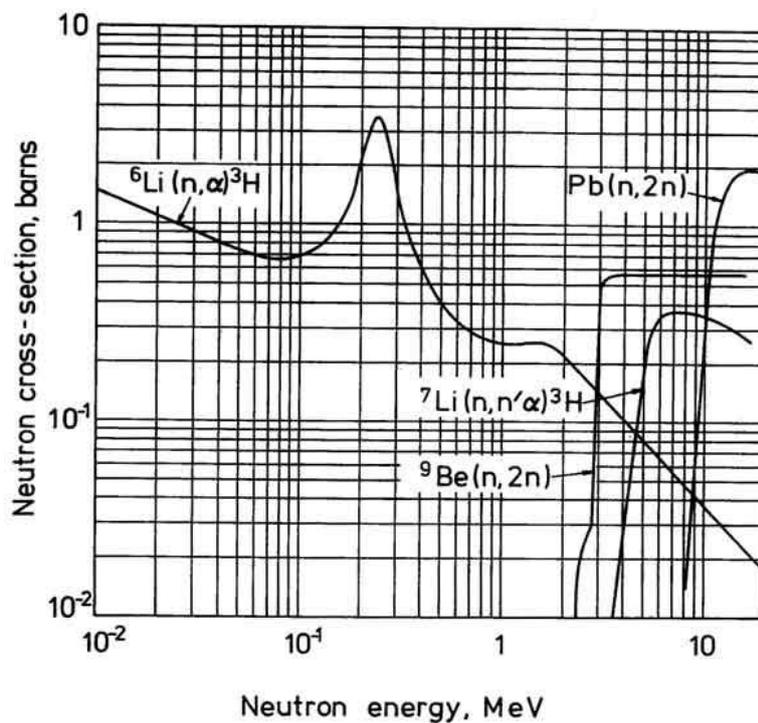


Meccanismo:

Quando il ${}^9\text{Be}$ è colpito da un neutrone energetico (soglia = 2.3 MeV), vengono emessi due particelle α e due neutroni. Questa proprietà è utile per moltiplicare il numero dei neutroni.

Sezione d'urto e Resa:

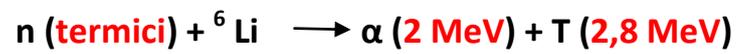
(estratto da: http://www.kayelaby.npl.co.uk/atomic_and_nuclear_physics/4_7/4_7_2.html)



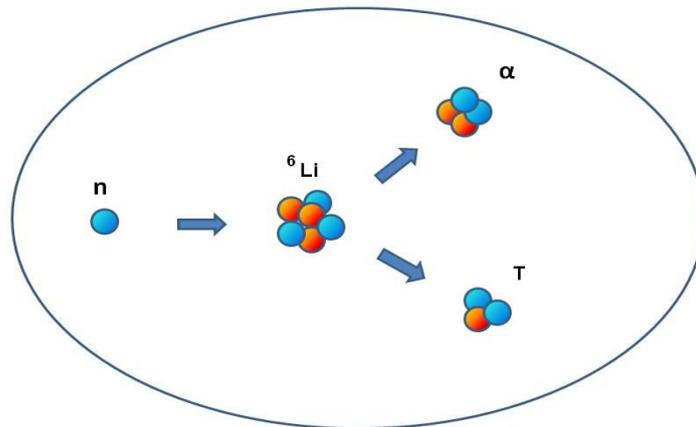
Come mostrato in figura, all'energia del neutrone incidente di **3 MeV**, la sezione d'urto è di circa **0.6 barn**.

A proposito della reazione dei neutroni col ⁶ Litio

Reazione Esotermica:



Schema:

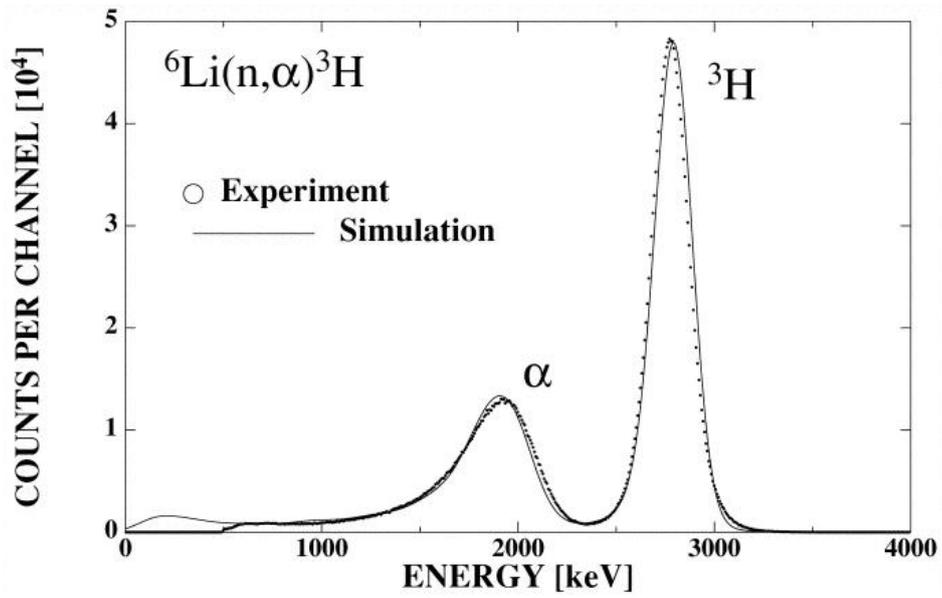


Meccanismo:

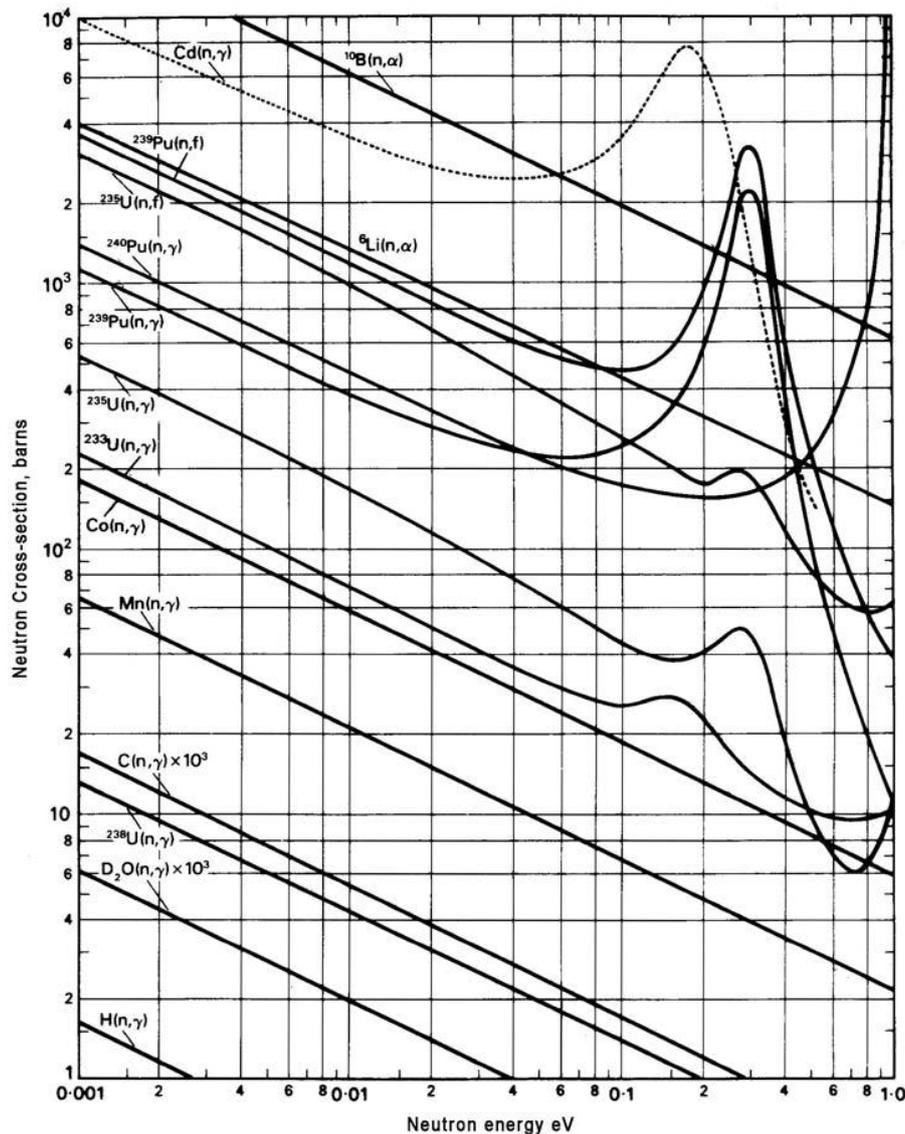
Quando il ⁶Li è colpito da un neutrone termico, vengono emessi una particella α e un nucleo di Trizio

Sezione d'urto e Resa:

(estratto da: <http://iopscience.iop.org/article/10.1086/306367/fulltext/>)



(estratto da: http://www.kayelaby.npl.co.uk/atomic_and_nuclear_physics/4_7/4_7_2.html)



Come mostrato in figura, la sezione d'urto per neutroni termici e freddi è molto alta, ben maggiore di **1000 barn**

Fattore globale di moltiplicazione neutronica calcolato per il progetto ITER-DEMO

Nell'accoppiamento $^9\text{Be} - ^6\text{Li}$ (il principale componente della miscela di isotopi di Litio arricchita, nel progetto ITER), il fattore di moltiplicazione di neutroni è stato valutato in funzione dello spessore degli strati, della loro disposizione, composizione, sia **sperimentalmente** che con comparata **simulazione** calcolata.

Nel seguito, vengono mostrati i principali risultati, riferiti anche alla capacità del "mantello di coltivazione del Trizio" di riprodurlo.

In realtà, ciascun Trizio iniziale reagente nella camera a plasma produce un neutrone, questo attiva la moltiplicazione da parte del Berillio, i neutroni emessi attivano il ⁶Litio, ciascun Litio attivato emette un Trizio; così, il rapporto "Trizio prodotto/neutroni che raggiungono il mantello" può essere un indice significativo per il fattore di moltiplicazione.

(estratto da: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a196877.pdf>)

AD-A 196 877

UNCLASSIFIED

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE (When Data Entered)

DTIC FILE COPY

REPORT DOCUMENTATION PAGE		READ INSTRUCTIONS BEFORE COMPLETING FORM
1. REPORT NUMBER AFIT/CI/NR 88- 59	2. GOVT ACCESSION NO.	3. RECIPIENT'S CATALOG NUMBER
TITLE (and Subtitle) NEUTRON MULTIPLICATION IN BERYLLIUM		5. TYPE OF REPORT & PERIOD COVERED MS THESIS
AUTHOR(s) RICHARD STEVEN HARTLEY		6. PERFORMING ORG. REPORT NUMBER
PERFORMING ORGANIZATION NAME AND ADDRESS AFIT STUDENT AT: UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN		8. CONTRACT OR GRANT NUMBER(s)
CONTROLLING OFFICE NAME AND ADDRESS		10. PROGRAM ELEMENT, PROJECT, TASK AREA & WORK UNIT NUMBERS
		12. REPORT DATE 1988

TABLE V
LEAKAGE MULTIPLICATION FOR DT NEUTRONS(5,6,9,14,17,19)

Experiment	4.6 cm	7 cm	7.9 cm	9.4 cm	12 cm	13.8 cm	19.9 cm
CALCULATED:							
Cloth					2.043		
Basu			1.79		2.03		2.25
Nargundkar *							1.54
Perkins (Basu)			1.705		1.901		
(Wong)	1.312						
Doyle (Basu)*			1.57		1.71		
(Cloth)*					2.13		
(LLNL Bulk)							2.19
Wong	1.132					1.64	1.89
MEASURED:							
LLNL Bulk							1.93
Cloth					1.725		
Basu			1.35		1.58		1.62
Nargundkar *							1.19
Wong	1.31					1.802	1.948

* - Values represent apparent multiplication only and are not corrected for leakage out of the polyethylene or reflection from the polyethylene back into the beryllium. These values are not directly comparable with the leakage multiplication values listed in table. Values for Nargundkar are for BeO.

(estratto da: <https://www-nds.iaea.org/fendl2/validation/benchmarks/bombay/report.txt>)

Table I

Experimental and calculated apparent leakage multiplication

Geometry Description				Apparent Multiplication		
Multiplier	Thickness	Outside Dimension (cm)	Inside Channel Dimension (cm)	Calc.	Expt.	Expt/Calc
Be metal	8 cm	65 X 54 X 54	65 X 38 X 38	1.64 (0.01)	1.33 (0.05)	0.81
Be metal	12 cm	65 X 38 X 38	65 X 14 X 14	2.03 (0.01)	1.70 (0.05)	0.84
Be metal	20 cm	65 X 54 X 54	65 X 14 X 14	2.07 (0.01)	1.68 (0.20)	0.81
BeO	20 cm	60 X 55 X 55	60 X 15 X 15	1.54 (0.01)	1.19 (0.05)	0.77
Pb	10 cm	60 X 35 X 35	60 X 15 X 15	1.55 (0.01)	1.53 (0.03)	0.99

TABLE XVI
 COMPARISON OF EXPERIMENTAL VALUES
 FOR SAME BERYLLIUM ASSEMBLIES

Inner Radius (cm)	Shell Thickness (cm)	Multiplication	
		PRESENT RESEARCH	WONG ET AL. RESULTS
8.00	4.6	1.43(.09)	
8.00	13.8	1.50(.09)	1.80(.180)
8.00	19.9	1.52(.09)	1.95(.195)

The numbers in parentheses represent one standard deviation in the measurement uncertainty.

TABLE XX

COMPARISON OF CALCULATED VERSUS EXPERIMENTAL (C/E)
LEAKAGE MULTIPLICATION FOR BERYLLIUM SHELLS WITH DT NEUTRONS*

Inner Radius (cm)	Shell Thickness (cm)	Multiplication				
		EXPERIMENT	**		***	
			B-IV	C/E	B-V	C/E
8.00	4.6	1.43(.09)	1.28	0.90	1.32	0.92
3.17	6.99	1.50(.09)	1.41	0.94	1.46	0.98
20.06	7.87	1.56(.09)	1.52	0.97	1.55	0.99
3.17	9.43	1.46(.09)	1.55	1.06	1.61	1.10
8.00	13.8	1.50(.09)	1.83	1.22	1.84	1.23
8.00	19.9	1.52(.09)	2.09	1.38	1.97	1.30

The numbers in parentheses represent one standard deviation in the measurement uncertainty.

The Bonner detector consists of a 4mm x 4mm diameter cylindrical ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ crystal-photomultiplier combination placed inside moderating polyethylene spheres (5.08 cm, 7.62 cm, 12.70 cm, 20.32 cm, 25.40 cm, 30.48 cm, and 45.72 cm diameter). Neutrons are detected by the reaction ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ which has a Q-value of 4.78 MeV. This large Q-value allows excellent discrimination against gamma-ray interactions in the crystal. Approximately 80% of the thermal neutrons incident on the crystal are absorbed in the first millimeter of the crystal so thermal neutron detection is essentially a surface effect, whereas the response to gamma-rays and high energy neutrons are proportional to the volume of the detector. By using a small crystal with a large surface-to-volume ratio, the proportion of counts not due to thermal neutrons is minimized.⁽³⁰⁾ Gamma-rays were subtracted using a linear background subtraction on a multichannel analyzer.

Le tabelle rendono conto di **fattori di moltiplicazione** da parte del Berillio fino a circa **1.7-1.9**, e una resa di circa l'**80%** già nel primo millimetro di ${}^6\text{Litio}$, dimostrando così che le sezioni d'urto coinvolte nei processi di attivazione sono idonee per la cattura e l'utilizzo di quasi tutti i neutroni incidenti, ai fini della produzione di Trizio da parte della catena Be-Li, quando sia disponibile un opportuno spessore degli strati.

L'indice globale "da Trizio a Trizio" può quindi essere assunto almeno pari a **1.36-1.52**, rendendo così il processo ben **sovracritico**, sotto attivazione neutronica.

I dati sperimentali dell' ITER confermano questa prevista resa "da Trizio a Trizio"

TABLE VII.1-2 INBOARD RADIAL BLANKET CONFIGURATION WITH ONE BREEDER ZONE AT THE MIDPLANE AND THE END OF THE BLANKET

ZONE	MATERIAL (DF)	THICKNESS (cm)	
		0.884 MW/m ² Z = 0	0.325 MW/m ² Z = ± 3.4 m
First Wall			
Tile ^(a)	C	2.0	2.0
First wall	steel	0.5	0.5
Coolant	H ₂ O	0.4	0.4
Back wall	steel	0.5	0.5
Blanket			
Multiplier	Be (0.65)	3.3	9.0
Clad	steel	0.1	0.1
Breeder	Li ₂ O (0.80)	1.0	1.0
Clad	steel	0.1	0.1
Multiplier	Be (0.65)	4.6	6.5
Coolant channel/shield	steel	0.2	0.2
Coolant	H ₂ O	0.2	0.2
Total first wall/blanket thickness		10.9	18.5
Local tritium breeding ratio		0.755	0.895

- a - The carbon tile is used only in the physics phase analyses and it is not included in the total first wall/blanket thickness.
- b - A 2.6 cm of the steel in this zone is a part of the bulk shield and it is not included in the total first wall/blanket thickness.

Breeder	Li ₂ O (0.80)	0.8	0.8	0.8	0.8
Clad	steel	0.1	0.1	0.1	0.1
Multiplier	Be (0.65)	7.1	11.6	11.6	15.2
Coolant channel	steel	0.2	0.2	0.2	7.2 ^(b)
Coolant	H ₂ O	0.2	0.2	0.2	0.2
Total first wall/blanket thickness		26.5	37.1	37.1	58.5
Local tritium breeding ratio		1.375	1.461	1.356	1.310

- a - The carbon tile is used only in the physics phase analyses and it is not included in the total first wall/blanket thickness.
- b - A 7.0 cm of the steel in this zone is a part of the bulk shield and it is not included in the total first wall/blanket thickness.

Infatti, nelle tabelle sopra riportate, sono mostrati gli spessori di progetto per il blanket ITER necessari per ottenere un TBR (Rapporto di Coltivazione del Trizio= “reazioni del Li / neutroni in arrivo”) > 1.3 nel blanket esterno, e 0.9 in quello interno (rapporto IAEA)

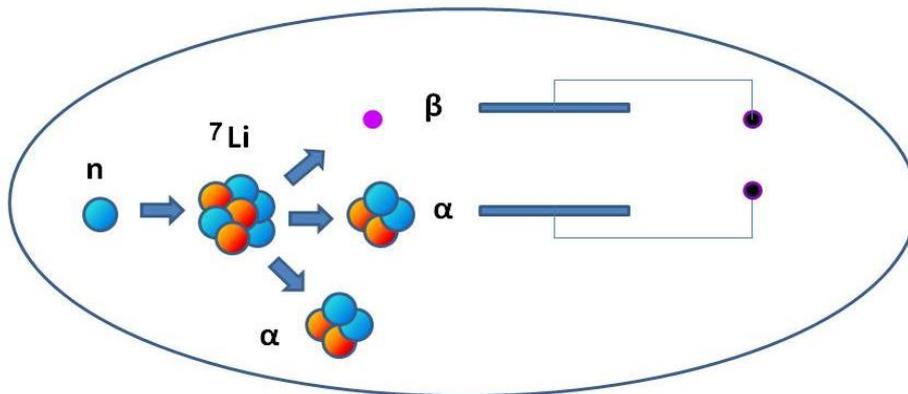
A proposito delle reazioni dei neutroni con il ⁷Litio

Sono possibili due principali reazioni:

1. Reazione Esotermica:



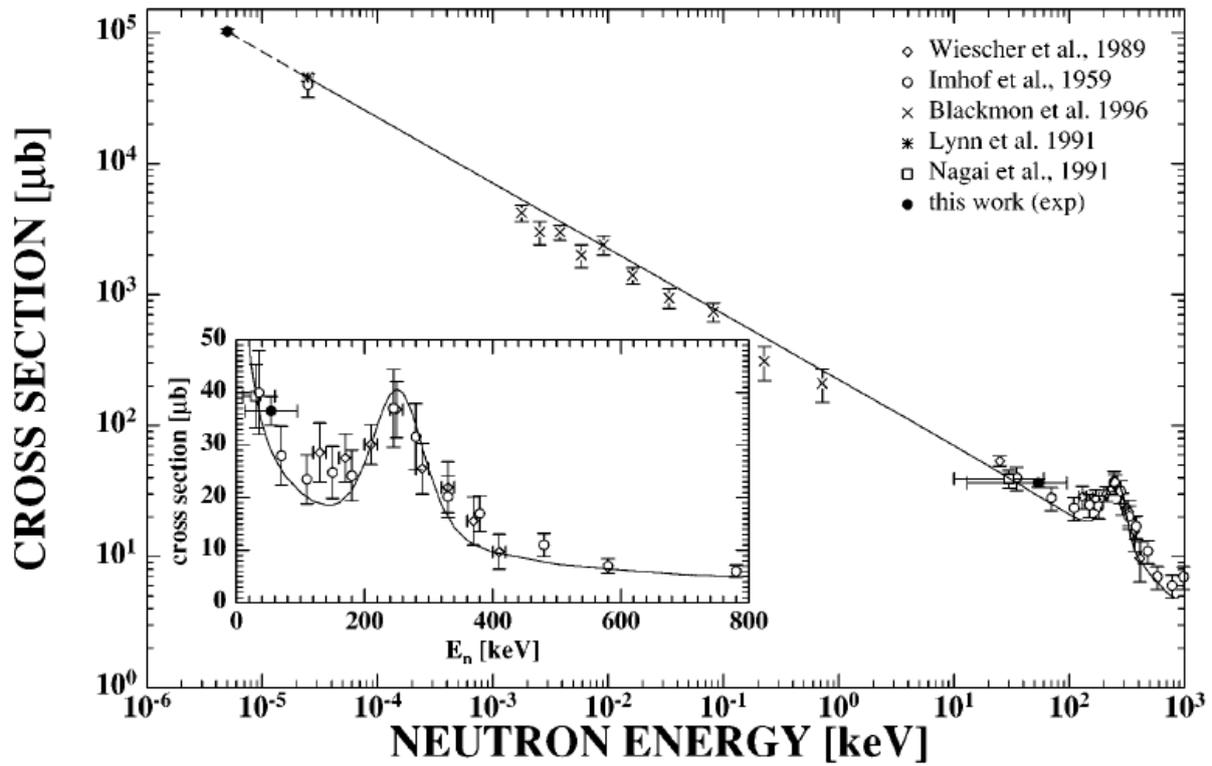
Schema:



Sezione d'urto e resa:

(estratto da: <http://iopscience.iop.org/article/10.1086/306367/fulltext/>)

(n, γ) CROSS SECTION OF ^7Li

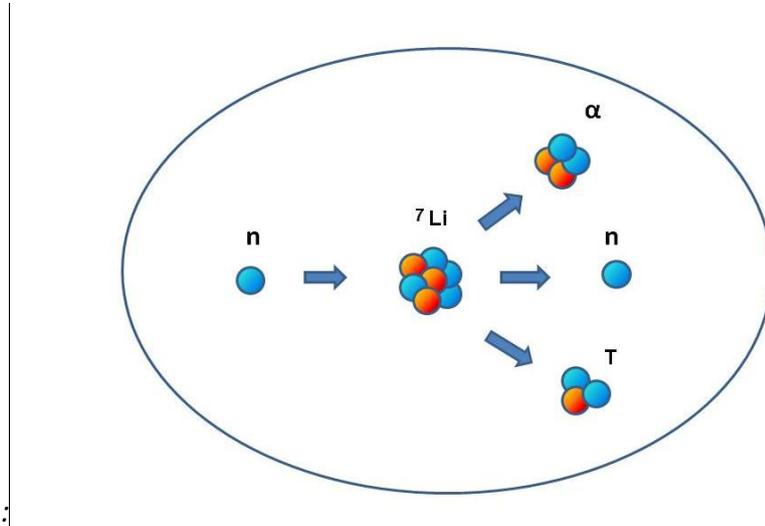


Il grafico mostra una **bassa** sezione d'urto di circa **0.1 barn** per neutroni di **bassissima** energia, e **0.045 barn** per neutroni termici.

2. Coppia di reazioni:

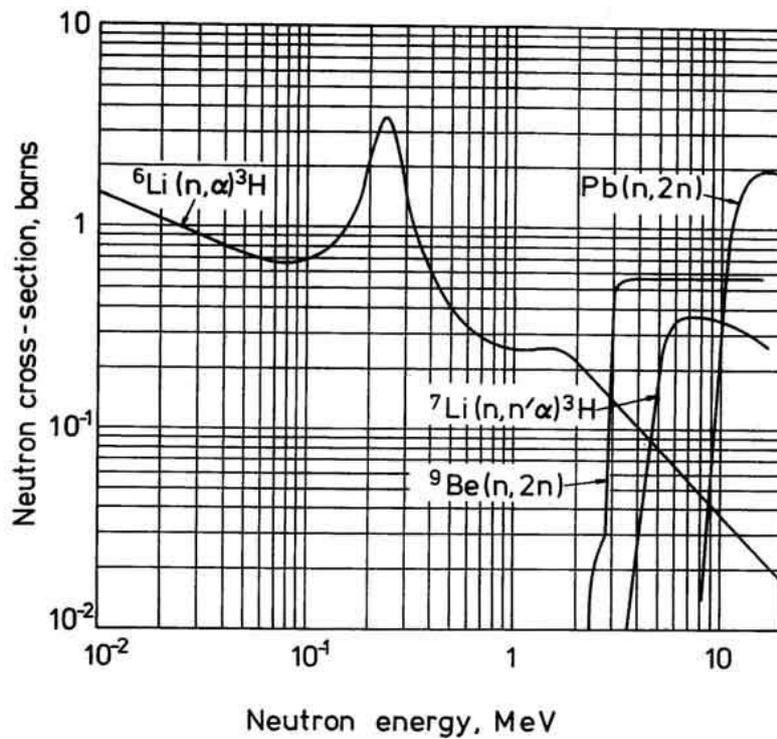


Schema:



Sezione d'urto e resa:

Ad energia dei neutroni di **6 MeV** il grafico mostra una sezione d'urto di **0.35 barn**



A proposito della cosiddetta “Super-resa del Castle-Bravo” (test nucleare sull’atollo di Bikini, 1954) attribuita alla imprevista reazione del ⁷Litio

(estratto da: https://en.wikipedia.org/wiki/Castle_Bravo)

Test nucleare nell'atollo di Bikini, nel 1954

“La resa di 15 megaton fu tre volte quella di 5 megaton prevista dai suoi progettisti. La causa della maggiore resa fu un errore teorico fatto dai progettisti dell'apparato ai Laboratori Nazionali di Los Alamos. Loro considerarono solo l’isotopo Litio 6 nel Deuterio di Litio, come reagente; l’isotopo Litio 7, presente nel 60% della composizione, fu assunto essere inerte. Ci si aspettava che il Litio 6 avrebbe assorbito un neutrone dalla fissione del Plutonio e avrebbe emesso una particella alfa e Trizio nel processo, il secondo dei quali si sarebbe fuso col Deuterio e avrebbe incrementato la resa in maniera prevedibile. In effetti, il Litio 6 reagì in questo modo.

Fu assunto che il Litio 7 assorbisse un neutrone, producendo Litio 8 che decade (attraverso il Berillio 8) in una coppia di particelle alfa su una scala temporale di secondi –grandemente più lenta della scala di una detonazione nucleare. Tuttavia, quando il Litio 7 è bombardato da neutroni energetici, piuttosto che assorbire semplicemente un neutrone, lo cattura e decade quasi istantaneamente in una particella alfa, un nucleo di trizio, e un altro neutrone. Come risultato, si produsse molto più Trizio di quanto previsto; il Trizio in più, fondendosi col Deuterio, produsse altri neutroni. I neutroni addizionali prodotti dalla fusione del Trizio e quelli addizionali rilasciati dal decadimento del Litio 7, produssero un flusso neutronico molto maggiore. Il risultato fu una maggiore fissione dell’uranio e un grande aumento di resa.

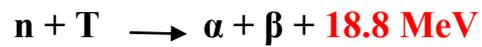
Questo risultante combustibile addizionale contribuì grandemente alle reazioni di fusione e di produzione di neutroni, e in tal modo incrementò grandemente l’esposizione dell’apparato. Il test usò Litio con una grande percentuale di Litio 7 solo perché il Litio 6 era a quell’epoca scarso e costoso; il successivo test Castle Union usò Litio 6 quasi puro. Se il Litio 6 fosse stato sufficientemente disponibile, l’impiegabilità del comune Litio 7 probabilmente non sarebbe stata scoperta.

Così, la reazione del Litio 7 per la produzione sia di Trizio addizionale che neutroni aggiuntivi, viene qui assunta come fondamentale per la moltiplicazione neutronica e il conseguente aumento della resa.

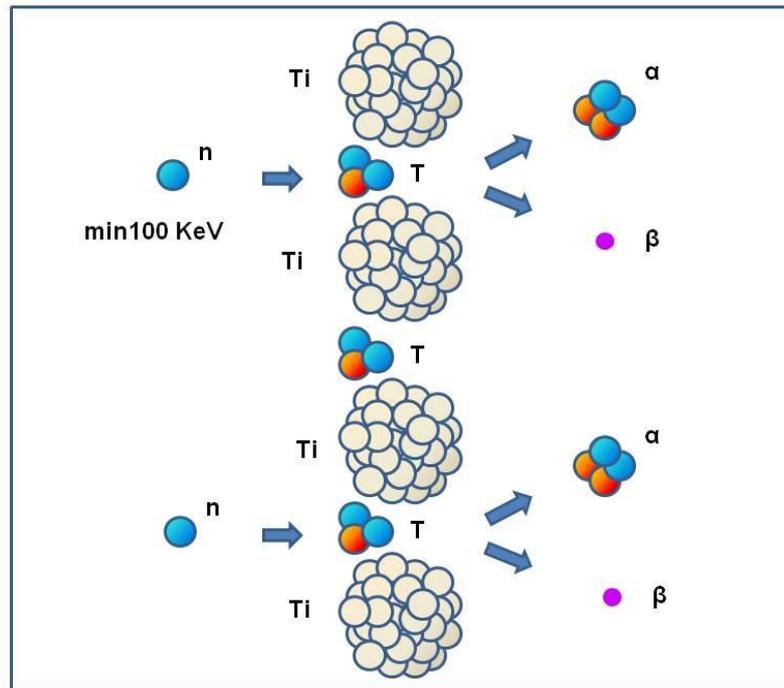
A proposito dell’ effetto di fusione del Trizio incidente su differenti bersagli (dall’Idrogeno al Deuterio, e così via)

a) In primo luogo, il Trizio può essere assorbito su un metallo come il Titanio, rendendo così elevata la sua densità, e colpito da neutroni con emissione di una particella alfa, un elettrone ed energia, secondo la reazione seguente.

Reazione:



Schema:



Sezione d'urto e resa:

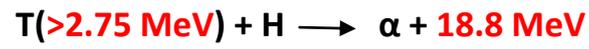
(da : **Lawrence Livermore Laboratory**:

<http://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.22.384>)

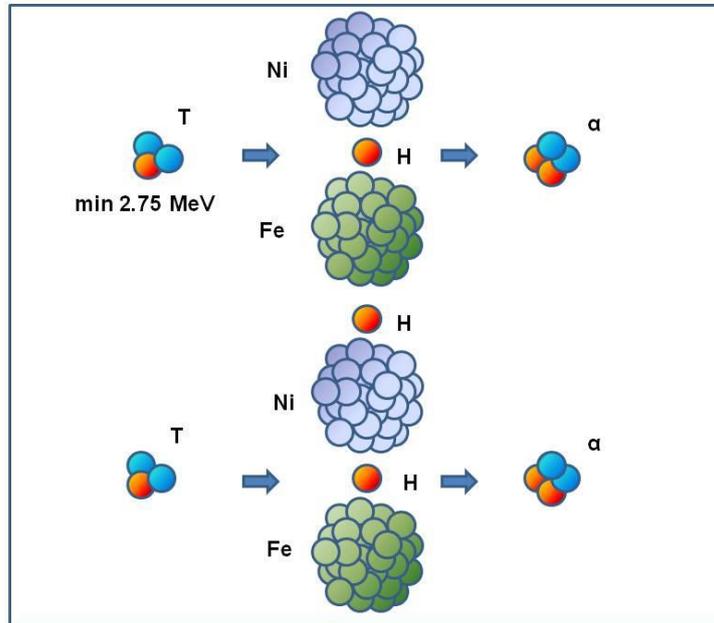
La sezione d'urto del Trizio, estrapolata ad energia zero, è stata valutata in **1.70±0.03 barn** (comprendente la percentuale di scattering)

b) il Trizio può essere scagliato contro un bersaglio di **Idrogeno**, assorbito su un catalizzatore Ni-Fe per organizzarlo in uno stato ultradenso (vedere: <http://www.hydrobetatron.org/files/The-Role-of-Lithium-in-LENR.pdf>) secondo i lavori di L. Holmlid.

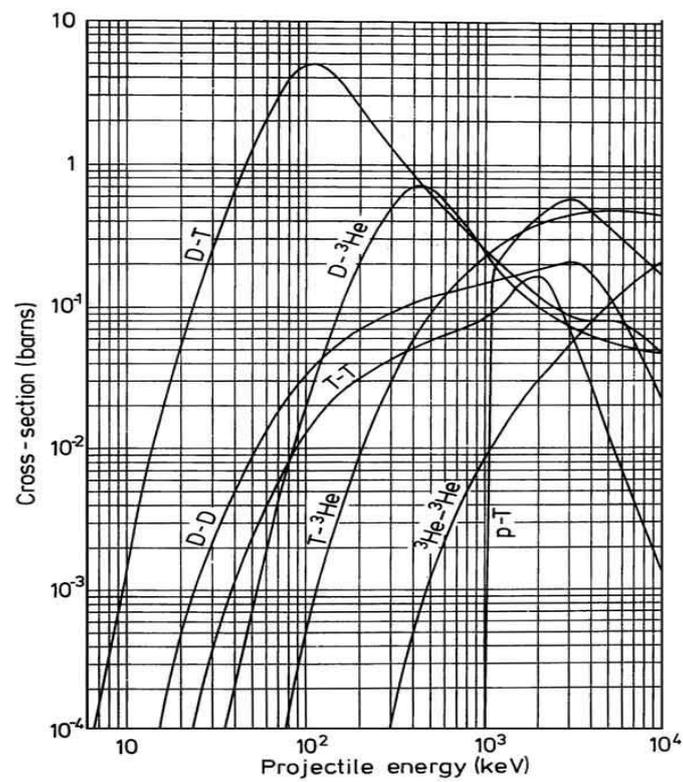
Reazione:



Schema:



Sezione d'urto e resa:



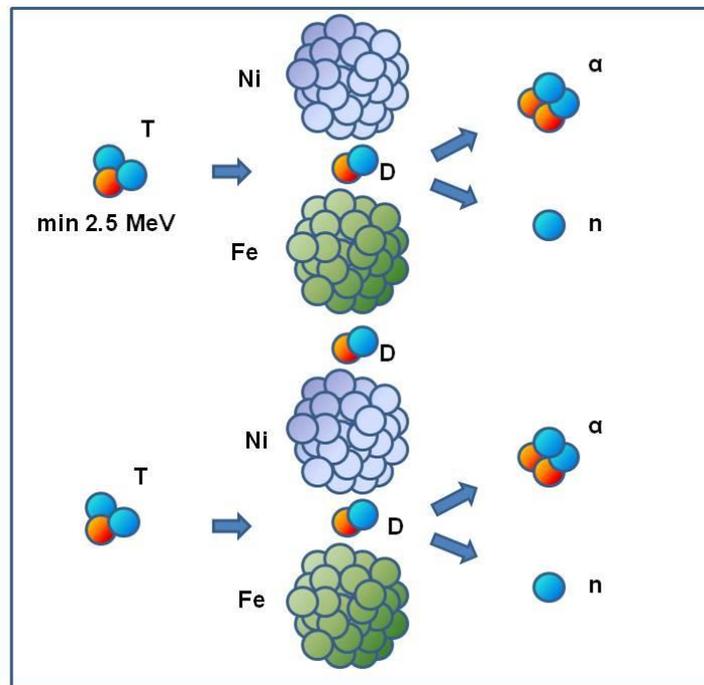
Il grafico mostra una sezione d'urto di **0.6 barn**.

c) il Trizio può essere scagliato contro un bersaglio di **Deuterio**, assorbito su un catalizzatore Ni-Fe per organizzarlo in uno **stato ultradenso** (vedere: <http://www.hydrobetatron.org/files/The-Role-of-Lithium-in-LENR.pdf>) secondo i lavori di L. Holmlid.

Reazione:



Schema:

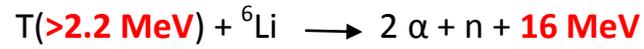


Il grafico mostra una sezione d'urto di 5 barn.

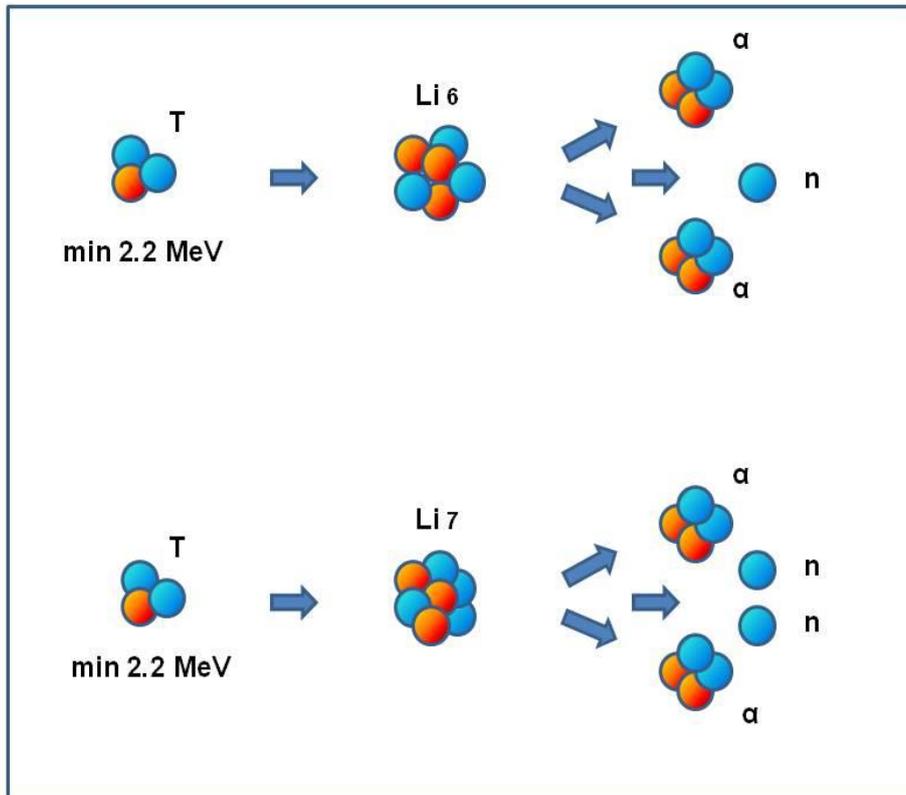
Recentemente (agosto 2015) la Compagnia Lockheed-Martin ha annunciato il progetto per un apparato compatto di fusione (<http://www.lockheedmartin.com/us/products/compact-fusion.html>) basato sulla stessa interazione tra **Trizio e Deuterio Ultradenso**.

d) il Trizio può essere scagliato contro un bersaglio di Litio

Reazioni:



Schemi:



Sezioni d'urto e rese:

(estratto da: <http://link.springer.com/article/10.1007%2F01591264#page-1>)

per T - ${}^6\text{Li}$ = **0.3 barn**

per T - ${}^7\text{Li}$ = **1.3 barn**

Composti o leghe di particolare interesse per le reazioni suesposte

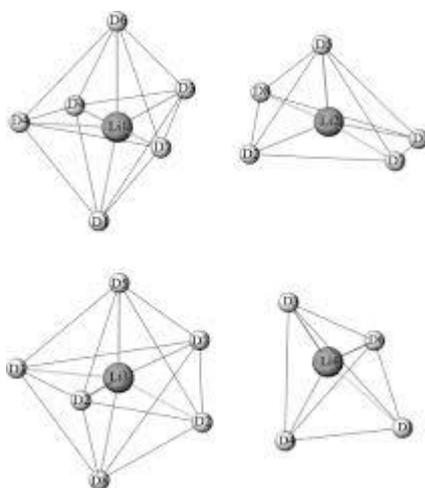
Il **Deuteruro di Litio** (LiD) è il composto più interessante perché mostra **entrambi i comportamenti** dei bersagli Litio e Deuterio, uniformemente distribuiti in intimo contatto, presentando un'alta densità di Deuterio.

Il **Deuteruro di Berillio** (BeD₂)

(<http://iopscience.iop.org/article/10.1070/QE2002v032n01ABEH002120/meta;jsessionid=F14250EA6D5466AF4D005B4B0F423DA9.c3>)

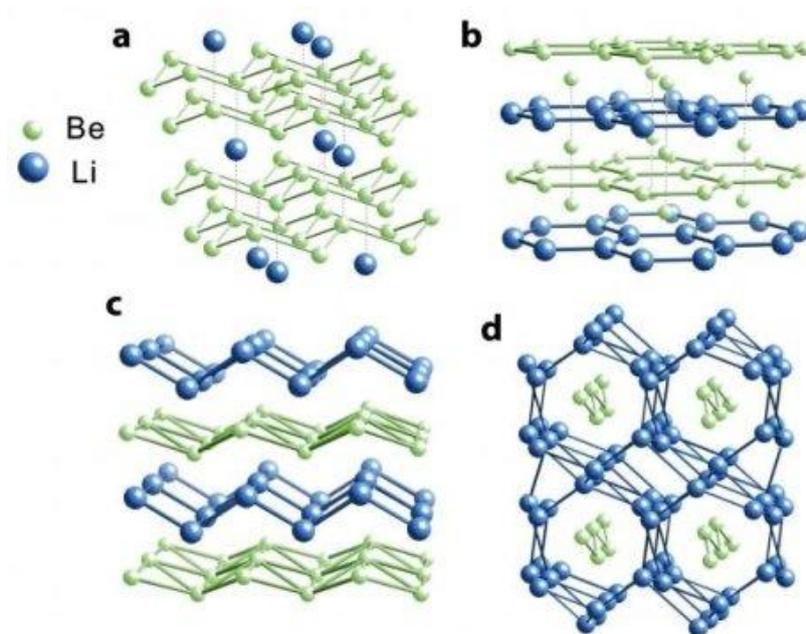
e il **Deuteruro di Litio e Berillio** (Li₂BeD₄)

(<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15446886>)



offrono un'alta densità di Deuterio, insieme ad una disponibilità locale di Berillio per moltiplicare rapidamente i neutroni prodotti.

Inoltre, la lega **Litio-Berillio** (da: <https://www.sciencedaily.com/releases/2008/01/080128113356.htm>)



Offre una elevata vicinanza tra Litio e Berillio per permettere che le particelle alfa provenienti dal Litio attivino il Berillio con maggiori rese.

A proposito del meccanismo di moltiplicazione dei neutroni

Con riferimento all'allegata figura 1) *Meccanismo di moltiplicazione neutronica (schema e toroide)*, **l'Amplificazione della Moltiplicazione neutronica** si ottiene mediante un ciclo in cui la sezione in alto a destra, di combustione del Trizio, può essere costituita da uno qualsiasi tra gli schemi precedenti b), c), d) (Trizio-Idrogeno, Trizio-Deuterio, Trizio-Litio).

Ciascun neutrone di attivazione, raddoppiato dal Berillio, attiva il Litio; le particelle alfa emesse sollecitano il Berillio ad emettere ulteriori neutroni; il Trizio prodotto, colpisce il bersaglio per produrre energia, alfa e ulteriori neutroni da raddoppiare col Berillio.

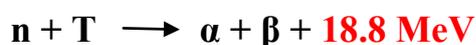
Uno schermo per neutroni (ad es. Carburo di tungsteno) confina i neutroni nella zona d'interesse; quelli che inevitabilmente sfuggono, vengono catturati dal Boro con produzione di calore e radiazioni, infine schermate da uno strato di Piombo.

A proposito della estrazione diretta di Elettricità dall' Energia Nucleare

Alcune reazioni **esotermiche** coinvolte, come la:

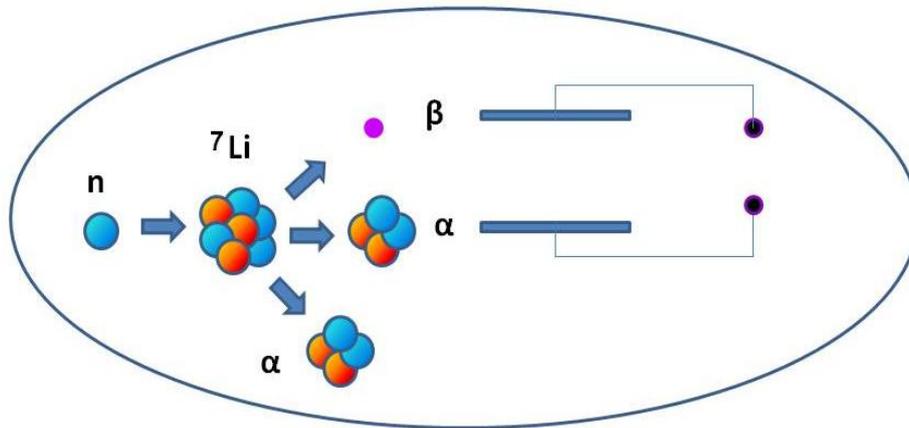


e la:



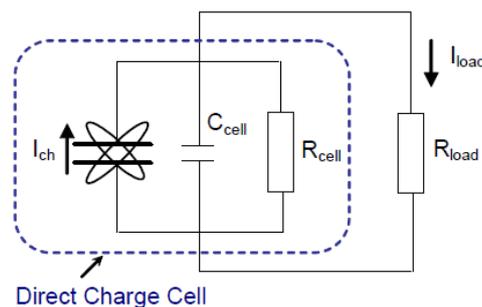
emettono particelle α e β , da raccogliere sulle armature di un supercondensatore, per essere ulteriormente trasformate in una corrente a voltaggio medio-basso, ed alta intensità, attraverso la ben consolidata tecnologia chiamata **“Betavoltaic”**

In Figura 4) **“Applicazione tecnologia Betavoltaic per la produzione di elettricità”** si riporta una schematizzazione di quanto detto.



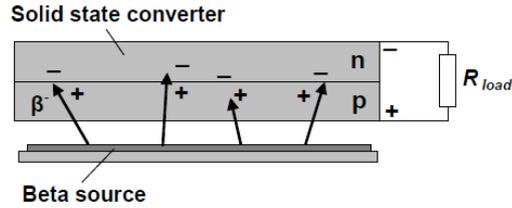
Tale tecnologia impiega essenzialmente due metodi: il primo, come detto, caricando il collettore, nel vuoto (in accoppiamento eventuale con una griglia intermedia acceleratrice a potenziale positivo regolabile), con un basso flusso di elettroni, ma ciascuno di questi portante un’elevata energia cinetica capace di vincere una differenza di potenziale di alcune centinaia di KiloVolt.

Le armature allora si dispongono ad una tensione relativa elevatissima, ed un meccanismo di prelievo ciclico delle cariche offre un’onda pulsata ad un trasformatore che converte, a parità di potenza, l’elevata tensione in elevata corrente.



(tratto da : Galina Nikolayevna, *“Nuclear batteries with tritium and Promethium 147 radioactive sources”*)

Un secondo metodo impiega un collettore a semiconduttore (es. carburo di silicio), nel vuoto, per assorbire l’elevata energia cinetica delle poche cariche e produrre uno sciame di molte particelle cariche, a ridotta energia cinetica.



(tratto da : Galina Nikolayevna, "Nuclear batteries with tritium and Promethium 147 radioactive sources")

La tecnologia "Betavoltaic" usualmente impiega isotopi Beta-emettitori naturali, dalla vita non molto breve, per permettere una idonea durata dell'apparato che concettualmente va assimilato ad una cella elettrica (o batteria di celle).

La scelta dell'isotopo naturalmente radioattivo da impiegare, va fatta prendendo in considerazione diversi parametri, i principali dei quali sono l'emivita dell'isotopo, l'energia media degli elettroni emessi.

Durata e potenza della cella sono obiettivi in competizione, poiché evidentemente una lunga durata (lunga emivita) è alternativa ad un alto flusso Beta emesso.

Nella tabella che segue (tratta da : Galina Nikolayevna, "Nuclear batteries with tritium and Promethium 147 radioactive sources"), vengono confrontate le prestazioni relative a diversi isotopi emettitori di radiazioni cariche, anche di tipo Alfa.

Table 1.1. Half-life, chemical compound-carrier, specific activity of the chemical compound for tritium, Pm-147, Ni-63, Sr-90, Pu-238, and power density and energy density nuclear batteries used these isotopes

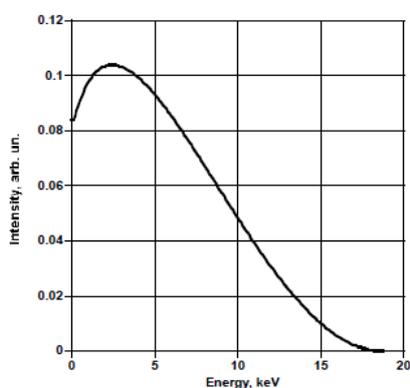
Parameter	Isotope				
	Tritium	Pm-147	Ni-63	Sr-90	Pu-238
Half-life of isotope, $T_{1/2}$, yr ¹³	12.32	2.62	100.1	28.9	87.7
Chemical compound of isotope	Ti ³ H ₂ Sc ³ H ₂	¹⁴⁷ Pm ₂ O ₃	⁶³ Ni	⁹⁰ Sr(NO ₃) ₂	²³⁸ PuO ₂
Specific activity of the chemical compound, A_{sp} , Ci/g	1100	800	57	116	15
Specific power of isotope, P_0 , μ W/Ci ⁵	34	367	103	6700	32000
Power density of battery, $P(0)$, W/kg	3.4	30	0.6	78	50
Energy density of battery, E_D , W·hr/kg	$2.9 \cdot 10^5$	$4.9 \cdot 10^5$	$3.7 \cdot 10^5$	$1.4 \cdot 10^7$	$2.8 \cdot 10^7$

Per ovviare alla detta competizione tra durata e potenza della cella, differentemente dal consueto utilizzo di un elemento **naturalmente radioattivo**, nel presente processo si adotta la seguente **innovazione**: alla stregua delle due reazioni ad attivazione neutronica suindicate, si utilizza un

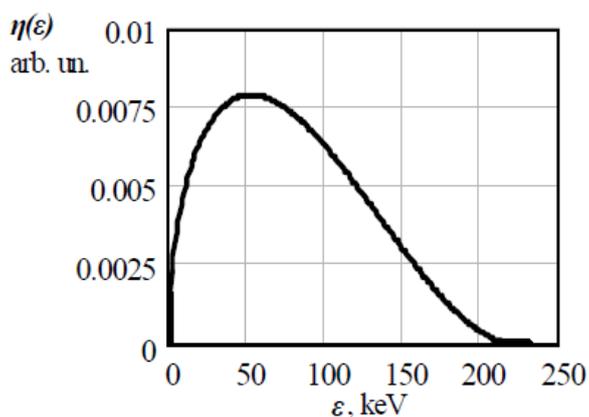
materiale-bersaglio (anche diverso dagli indicati Litio⁷ e Trizio) capace, sotto bombardamento neutronico, di **trasformarsi** in un isotopo radioattivo a vita breve, fortemente Beta-emettitore, da scegliersi tra quelli a maggiore energia dei Beta emessi.

In tal modo, bombardando continuamente il bersaglio, l'isotopo emettitore, in decadimento, viene continuamente rinnovato, permettendo così di coniugare alta emissione con durata, **spezzandone l'antagonismo.**

Si è detto dell'importanza dell'energia dei Beta emessi; a titolo di esempio si confrontano gli spettri di emissione Beta dei detti Trizio e Prometeo, così come riportati in : ***Galina Nikolayevna, "Nuclear batteries with tritium and Promethium 147 radioactive sources"***, lavoro in cui si indica anche il range di rese di efficienze di conversione tipiche , del **15 – 20%**



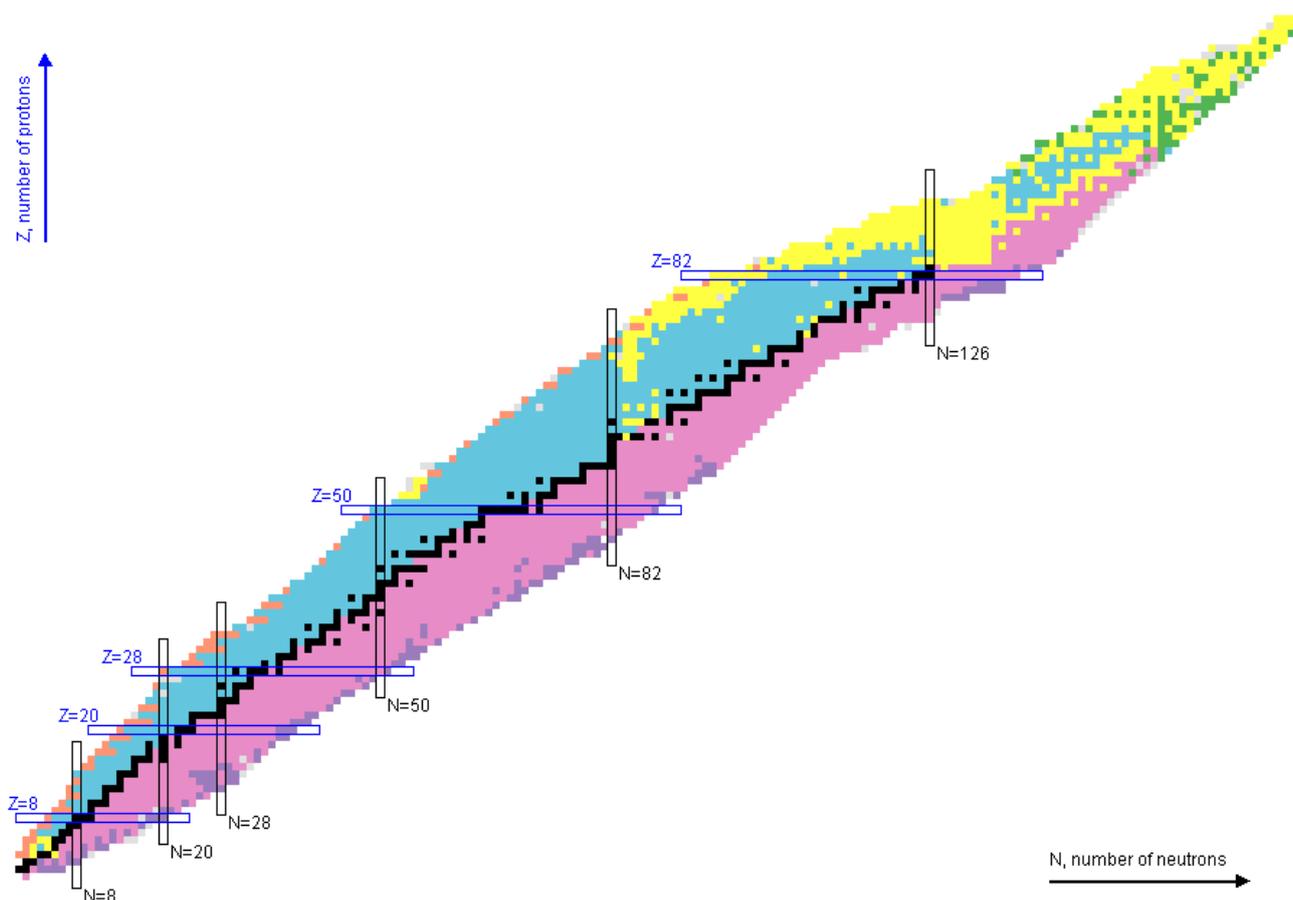
Spettro Beta del Trizio



Spettro Beta del Pm147

Col metodo della attivazione neutronica si possono ottenere energie dei Beta, scegliendo opportuni bersagli che conducano ad interessanti radioisotopi, dell'ordine di diverse centinaia di KiloelettronVolt, molto superiori a quelle di picco (rispettivamente 2.5 e 60 KeV) di Trizio e Prometeo.

Come si dettaglierà più avanti, il presente processo, e relativo impianto, permettono una ***elevata flessibilità di scelta***, praticamente su tutto l'insieme della "***Carta dei Nuclidi***", a riguardo dell'elemento da attivare, contenuto nel bersaglio.



Nella Carta, le colorazioni adottate indicano:

- in nero, gli isotopi stabili, con un proporzionato numero di protoni e neutroni nel nucleo;
- in rosa, gli isotopi instabili contenenti un eccesso di neutroni, con tendenza al decadimento β^- con conseguente trasformazione di un neutrone in un elettrone, emesso, e un protone che sposta il nucleo di un posto a destra nella tavola degli elementi;
- in celeste, gli isotopi instabili contenenti un eccesso di protoni, con tendenza ad equilibrare il nucleo spostandolo di un posto a sinistra nella tavola degli elementi, mediante uno dei due processi alternativi: ***cattura elettronica***, cioè annullamento di una carica positiva nel nucleo mediante, appunto, la cattura di un elettrone delle orbite interne, oppure ***decadimento β^+*** con produzione di un neutrone ed emissione di un ***Positrone***.

Tale ultimo processo è possibile solo in un limitato numero di casi, quando l'energia della transizione consente la creazione di massa conseguente al decadimento Beta positivo.

Riassumendo, mediante la scelta del bersaglio da attivare mediante fascio neutronico, è possibile regolare la tipologia e le energie di emissione: tipicamente, l'aggiunta di un neutrone al nucleo stabile del bersaglio dà luogo ad un isotopo β^- -emettitore; ma particolari elementi, che hanno diversi isotopi stabili, possiedono alla destra di uno di essi sulla Carta, una ridotta zona celeste: questi, se hanno l'energia sufficiente nel decadimento, possono emettere Positroni (modalità β^+), spesso accanto alla modalità β^- se nella composizione naturale dell'elemento sono presenti anche isotopi stabili prospicienti la zona rosa.

A proposito della resa prevista per l'estrazione di elettricità

Le reazioni sopra riportate possiedono una sezione d'urto per cattura neutronica molto bassa.

La reazione del ⁷Litio mostra un valore della sezione d'urto, per neutroni termici, di **0.045 barn**, così il ⁷Li non è il miglior candidato.

La sezione d'urto per la cattura neutronica da parte del Trizio nella regione termica è spesso citata essere circa nulla, e da una recente stima (**Lawrence Livermore Laboratory**, estratto da : <http://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.22.384>)

La **sezione d'urto del Trizio** estrapolata ad energia nulla è trovata pari a **1.70±0.03 barn**, comprensiva del contributo di dispersione.

Così, il Trizio può essere impiegato per la reazione sopra riportata nella regione termica solo in uno stato molto denso per innalzare la densità atomica e la sezione d'urto macroscopica.

L. Holmlid relaziona su una fase ultradensa di Trizio, nel suo brevetto EP2680271A1:

(<http://www.sifferkoll.se/sifferkoll/wp-content/uploads/2014/02/EP2680271A1.pdf>)

The formation of ultra-dense protium has also been reported elsewhere. It is expected that a target made of such ultradense hydrogen (protium, deuterium or tritium) should require considerably less irradiated energy for ignition than the currently used deuterium-tritium ice pel-

Nel settore delle reazioni *pycnonucleari*,

(da: http://w3.pppl.gov/~fisch/fischpapers/Son_Chain_react.pdf) L. Holmlid relaziona su un esempio che coinvolge una miscela Trizio-Deuterio a densità molto alta:

example, if we consider a D-T plasma with $n_D = n_T$ and $\rho = 1.4 \times 10^6 \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$, then $s = 0.249$,

Inoltre, gli isotopi di Idrogeno (H,D,T) mostrano differenze di comportamento molto piccole in stati *semplicemente densi* a densità di 10, 50, 100 g/cm³.

Per quanto a conoscenza attuale degli autori, non c'è alcuna prova sperimentale diretta di un tale *stato ultradenso* per il Trizio (invece ben dimostrato per il Deuterio), così un limite cautelativo di densità verrà assunto pari a 100 g/cm³.

Invece dello stato di plasma quantistico ad alta densità per il Trizio, si può impiegare un metodo di assorbimento per raggiungere una certa alta densità di Trizio.

I principali metalli assorbenti Trizio sono Uranio, Zirconio, lega Lantanio-Nichel-alluminio.

(https://books.google.it/books?id=7FzmCAAQBAJ&pg=PA33&lpg=PA33&dq=tritium+absorption+metals&source=bl&ots=s-ypx-wgQ8&sig=9QLji099JBDJiie5LpOg_0hkS5g&hl=it&sa=X&ved=0ahUKEwis69D8wYLMaAhXEORQKHbz6C-oQ6AEIVjAF#v=onepage&q=tritium%20absorption%20metals&f=false)

(http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/26/045/26045388.pdf)

Comparison with LANA (La-Ni-Al) and Uranium

The advantages and disadvantages of using titanium, LANA.85 (LaNi_{4.15}Al_{0.85}) or uranium for long term tritium storage have been briefly compared before in Reference 15. A more complete comparison is given in Table 4. The comparison clearly shows that titanium is the better choice for tritium long term storage. Another low pressure hydride, the zirconium hydride, has a very low hydrogen pressure, about 1,000 times lower than that of titanium hydride. Tritium stored in zirconium will require a much higher temperature to desorb, and therefore not desirable.

Nota: sebbene lo Zirconio non sia il metallo più adatto per il rilascio del Trizio dopo l'immagazzinamento, esso può essere considerato ben idoneo per il solo immagazzinamento.

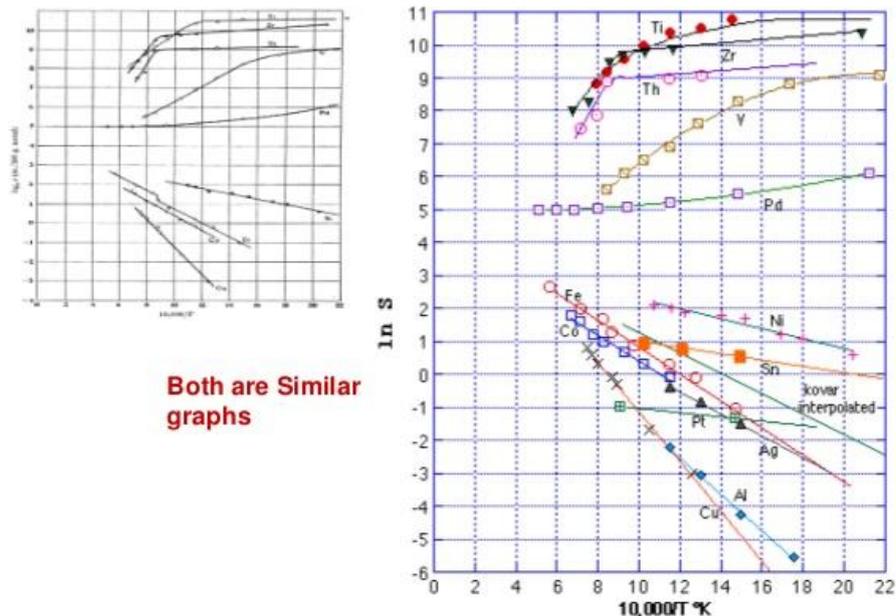
Table 4. Comparison of Titanium, LANA.85 and Uranium for Long Term Tritium Storage.

	Titanium	LANA.85	Uranium
Cost, \$/kg	10	400	50
Tritium capacity			
g-mole/kg	19	5.2	6.3
atom ratio T/M	(1.8)	(0.7)	(3)
Helium retention			
He/Ti	0.3	>0.2	0.16
Years @ full capacity	4	>6	1
Years @ reduced capacity	>4	>6	>1
Storage pressure			
Tritium pressure @ 100 °C, torr	1E-6	600	0.014
Charging conditions			
Temperature, °C	25	25	25
Pressure, torr	>1	>500	>1
Discharging conditions			
Temperature, °C	600	>150	450
Pressure, torr	<40	<800	<700
Exchange required	yes	yes	maybe
Safety			
Fresh powder ignition temperature in air, °C	420	~50	20
Temperature excursion when air leaks into vessel, °C	<1	<10	<100

Un rapporto tra gli atomi di circa **due** é riportato tra Trizio e Titanio, che conduce a circa **10²³ atomi di Trizio /cm³** (come lo stato solido), adatto per innalzare la sezione d'urto macroscopica.

Inoltre, la solubilità degli isotopi di Idrogeno è riportata nei grafici sotto:

(<http://www.rebresearch.com/H2sol2.htm>)



A Theoretical Formula for the Solubility of Hydrogen in Metals, R. H. Fowler and C. J. Smithells, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, V160, 1937, p. 37

R.Ganesh Narayanan, IITG

Ora, si considera una nuova estrapolazione del precedente approccio, con una sezione d'urto intrinsecamente molto alta e densità da stato solido.

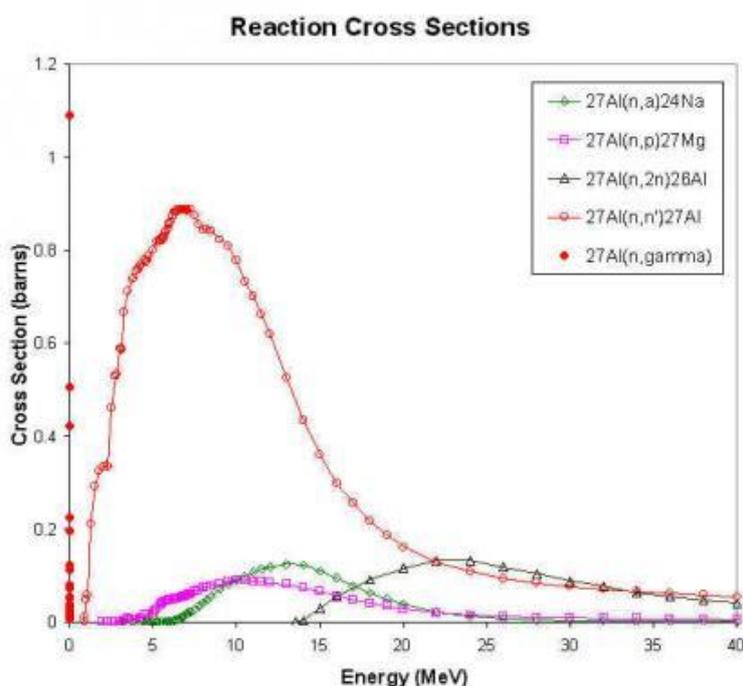
Un fascio neutronico può essere spillato dalla sezione di produzione di neutroni, e come precedentemente anticipato, usato per colpire atomi contenuti in un adatto strato di metallo, per promuovere un decadimento β attivato da neutroni, che porta ad una estrazione regolabile di elettricità, mediante il citato sistema di conversione diretta da nucleare ad elettrico, semplicemente proporzionale al numero di neutroni disponibili che si è scelto di estrarre.

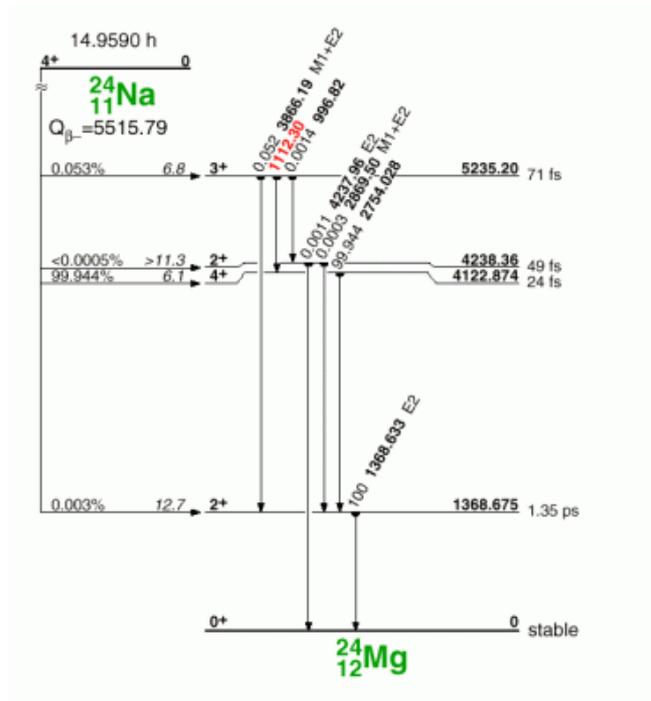
Come $^7\text{Litio}$ e Trizio , quando un atomo che porta nel nucleo troppi neutroni rispetto al suo numero di protoni viene colpito da neutroni, può avvenire una interazione debole, risultante in una cattura neutronica seguita da un decadimento di un neutrone in un protone, un elettrone e un antineutrino; l'atomo slitta a destra nella tavola periodica degli elementi.

Ulteriori nuovi candidati, rispetto a $^7\text{Litio}$ e Trizio , vengono identificati negli atomi di Alluminio e Rame, scelti qui a titolo di esempio illustrativo; essi risultano ben idonei allo scopo proposto ma, come si è sottolineato, il presente processo presenta la flessibilità di permettere la scelta del miglior bersaglio rispetto all'obiettivo produttivo a cui si vuole adibire l'impianto.

Consideriamo l'Alluminio per primo.

(Da: <http://www.geneseo.edu/nuclear/aluminum-activation-results>) il ^{27}Al ha una sezione d'urto per la cattura di neutroni (14 MeV) di **0.1 barn** (curva verde), che porta ad un ^{24}Na altamente radioattivo, con decadimento β^- e semivita di solo **15 ore**, insieme ad ulteriori modi di decadimento.





Infine, consideriamo il **Rame**.

La sua abbondanza naturale é circa 70 % ^{63}Cu e 30 % ^{65}Cu (isotopo preferibile).

Sono disponibili diversi metodi di arricchimento isotopico: apparati di centrifugazione, diffusione, elettromagnetici.

Così, gli isotopi arricchiti sono commercialmente disponibili: <http://www.trading-metalli.it/component/content/article/69-prezzo-rame/137-copper-65-isotopo.html>

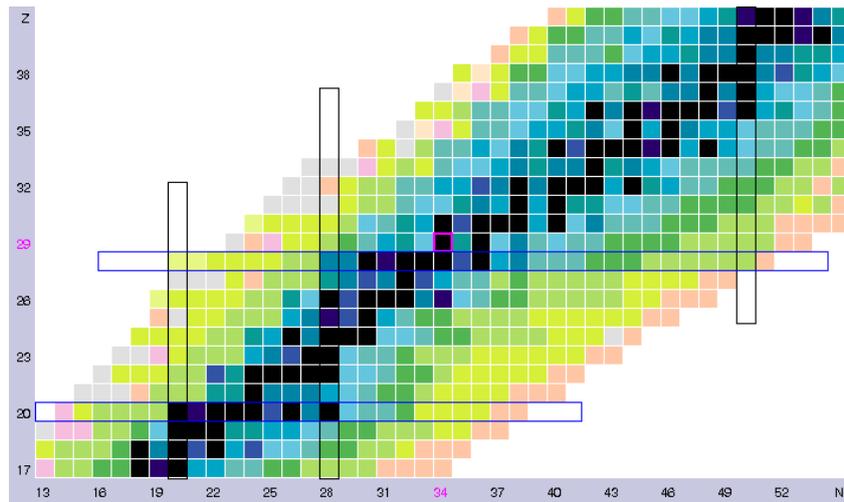
Per attivazione neutronica, questi possono slittare verso atomi di Cu più pesanti, come ^{64}Cu (semivita 12.7 h), ^{67}Cu (semivita 61.8 h) e altri isotopi con **semivita più breve**.

^{64}Cu decade (60%) a ^{64}Ni (β^+ , Q-value ≈ 1.6 MeV) e (40%) a ^{64}Zn (β^- , Q-value ≈ 0.6 MeV), rendendolo idoneo per un processo con separazione elettrica o magnetica delle cariche emesse, per creare una differenza di potenziale elettrica impiegabile su un carico.

^{67}Cu decade solo a ^{67}Zn con un processo β^- (0.14 MeV di elettroni emessi).

Gli isotopi più interessanti sono tuttavia quelli con minore emivita, così molto più altamente radioattivi, come mostrato dalla **Carta interattiva dei nuclidi**:

<http://www.nndc.bnl.gov/chart/reCenter.jsp?z=29&n=35>



Alcuni comportamenti degli isotopi del Cu verranno comparati qui di seguito

Dataset #1:

Author: Balraj Singh Citation: Nuclear Data Sheets 108, 197 (2007)

Parent Nucleus	Parent E(level)	Parent π	Parent $T_{1/2}$	Decay Mode	GS-GS Q-value (keV)	Daughter Nucleus	
$^{64}_{29}\text{Cu}$	0.0	1+	12.701 h 2	ϵ : 61.5 3 %	1675.03 20	$^{64}_{28}\text{Ni}$	Decay Scheme ENSDF file

Beta+:

Energy (keV)	End-point energy (keV)	Intensity (%)	Dose (MeV/Bq-s)
278.21 9	653.03 20	17.60 % 22	0.0490 6

Mean beta+ energy: 278 keV 5, total beta+ intensity: 17.60 % 22, mean beta+ dose: 0.0490 MeV/Bq-s 10

Electrons:

	Energy (keV)	Intensity (%)	Dose (MeV/Bq-s)
Auger L	0.84	57.7 % 5	4.85E-4 4
Auger K	6.54	22.51 % 24	0.001472 16

Gamma and X-ray radiation:

	Energy (keV)	Intensity (%)	Dose (MeV/Bq-s)
XR I	0.85	0.489 % 24	4.15E-6 20
XR α 2	7.461	4.74 % 24	3.54E-4 18
XR α 1	7.478	9.3 % 4	7.0E-4 3
XR β 1	8.265	1.12 % 5	9.3E-5 4
XR β 3	8.265	0.58 % 3	4.76E-5 23
Annihil.	511.0	35.2 % 4	
	1345.77 6	0.475 % 11	0.00640 15

Dataset #2:

Author: Balraj Singh Citation: Nuclear Data Sheets 108, 197 (2007)

Parent Nucleus	Parent E(level)	Parent J^π	Parent $T_{1/2}$	Decay Mode	GS-GS Q-value (keV)	Daughter Nucleus	
$^{64}_{29}\text{Cu}$	0.0	1+	12.701 h 2	β^- : 38.5 3 %	579.4 7	$^{64}_{30}\text{Zn}$	Decay Scheme ENSDF file

Beta-:

Energy (keV)	End-point energy (keV)	Intensity (%)	Dose (MeV/Bq-s)
190.70 27	579.4 7	38.5 % 4	0.0734 8

Mean beta- energy: 191 keV 3, total beta- intensity: 38.5 % 4, mean beta- dose: 0.0734 MeV/Bq-s
14

Dataset #3:

Authors: Huo Junde, Huang Xiaolong, J.K. Tuli Citation:Nuclear Data Sheets 106, 159 (2005)

Parent Nucleus	Parent E(level)	Parent π	Parent $T_{1/2}$	Decay Mode	GS-GS Q-value (keV)	Daughter Nucleus	Decay Scheme	ENSDF file
$^{67}_{29}\text{Cu}$	0.0	3/2-	61.83 h 12	β^-	561.7 15	$^{67}_{30}\text{Zn}$		

Beta-:

Energy (keV)	End-point energy (keV)	Intensity (%)	Dose (MeV/Bq-s)
51.0 25	168.2 15	1.10 % 11	5.6E-4 6

121 3	377.1 15	57 % 6	0.069 7
154 3	468.4 15	22.0 % 22	0.034 3
189 3	561.7 15	20.0 % 20	0.038 4

Mean beta- energy: 141 keV 13, total beta- intensity: 100 % 6, mean beta- dose: 0.141 MeV/Bq-s 16

Electrons:

	Energy (keV)	Intensity (%)	Dose (MeV/Bq-s)
Auger L	0.99	19.14 % 23	1.895E-4 22
Auger K	7.53	6.87 % 10	5.18E-4 8
CE K	81.607 5	0.51 % 5	4.2E-4 4
CE K	83.652 5	12.09 % 15	0.01011 13
CE L	90.072 5	0.053 % 6	4.8E-5 5
CE L	92.117 5	1.481 % 18	0.001364 17
CE K	174.918 10	0.77 % 5	0.00135 9
CE L	183.383 10	0.080 % 6	1.47E-4 11
CE K	199.292 10	9.2E-4 % 4	1.84E-6 8
CE L	207.757 10	9.4E-5 % 4	1.96E-7 9

Gamma and X-ray radiation:

	Energy (keV)	Intensity (%)	Dose (MeV/Bq-s)
--	-----------------	------------------	----------------------

XR I	1.01	0.209 %	8	2.11E-6
XR κ 2	8.616	1.91 %	7	1.65E-4
XR κ 1	8.639	3.74 %	14	3.23E-4
XR $k\beta$ 1	9.572	0.453 %	17	4.34E-5
XR $k\beta$ 3	9.572	0.233 %	9	2.23E-5
	91.266	7.00 %	10	0.00639
	93.311	16.10 %	20	0.01502
	184.577	48.7 %	3	0.0899
	208.951	0.115 %	5	2.40E-4
	300.219	0.797 %	11	0.00239
	393.529	0.220 %	8	8.7E-4

Dataset #4:

Authors: E. Browne, J. K. Tuli Citation: Nuclear Data Sheets 111, 1093 (2010)

Parent Nucleus	Parent E(level)	Parent $J\pi$	Parent $T_{1/2}$	Decay Mode	GS-GS Q-value (keV)	Daughter Nucleus	Decay Scheme	ENSDF file
$^{66}_{29}\text{Cu}$	0.0	1+	5.120 m 14	β^- : 100 %	2640.9 10	$^{66}_{30}\text{Zn}$		

Beta-:

Energy End-point energy Intensity Dose

(keV)	(keV)	(%)	(MeV/Bq-s)
79.2 7	269.2 19	0.0037 % 3	2.93E-6 24
266.2 6	768.7 13	0.220 % 5	5.86E-4 13
628.1 6	1601.7 10	9.01 % 9	0.0566 6
1112.1 6	2640.9 10	90.77 % 9	1.0095 11

Mean beta- energy: 1066.6 keV 19, total beta- intensity: 100.00 % 13, mean beta- dose: 1.0666 MeV/Bq-s 23

Viene riportata un'alta emissione per decadimento di β^- energetici (1 MeV) per ^{66}Cu (temporaneamente altamente radioattivo), con alti ritmi, a causa di una emivita molto breve (5.1 m).

Ora, si riporta un test di preparazione per un *Corso di Scienze della Terra, atmosferiche e planetarie (analisi per attivazione neutronica)*:

<http://ocw.mit.edu/courses/earth-atmospheric-and-planetary-sciences/12-091-trace-element-analysis-of-geological-biological-environmental-materials-by-neutron-activation-analysis-an-exposure-january-iap-2005/lecture-notes/session5a.pdf>

1) In a house in Cambridge, the water from the faucet suddenly started showing some particulate matter, which is suspected to be copper from a pipe. It was brought to the MIT Reactor for analysis. You are asked to calculate the activity that would be produced by thermal neutron activation, if 1 gram of copper is irradiated in the reactor flux of $4 \times 10^{12} \text{ n.cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$ for 2 hours.

i) On removal what is the activity of each copper isotope?

ii) What will be the activity of each isotope 1 hour after the removal from the reactor?

The answer should contain: the activity equation, the parameters and values used, and the activity calculated.

Suggested Use:

1) The Chart of Nuclide Handout,

2) Table of Nuclides Appendix D, p 606 -650,

Gamma-ray sources Appendix E 651-660,

Nuclear and Radiochemistry by

G. Friedlander, J. Kennedy, E. S. Macias, J. M. Miller

Answer: The stable isotopes of copper are ^{63}Cu and ^{65}Cu .

Atomic weight of Cu = 63.546, flux = $4\text{E}12 \text{ n/cm}^2.\text{sec}$

$^{63}\text{Cu} (n,\gamma) ^{64}\text{Cu}$ and $^{65}\text{Cu} (n,\gamma) ^{66}\text{Cu}$ are the thermal neutron activation reactions.

$^{65}\text{Cu} (n,\gamma) ^{66}\text{Cu}$:

$\sigma = 2.17\text{E}-24 \text{ cm}^2$, $\theta = 30.83\%$, ^{66}Cu half life = 5.10 m,

The activity of ^{66}Cu upon removal = 0.69 curies and after 1 hour 0.197 mCi

$^{63}\text{Cu} (n,\gamma) ^{64}\text{Cu}$:

$\sigma = 4.4\text{E}-24 \text{ cm}^2$, $\theta = 69.17\%$, ^{64}Cu half life = 12.75 h,

The activity upon removal = 0.321 curies and after 1 hour 0.304 Ci

Esso mostra sezioni d'urto da ^{63}Cu a ^{64}Cu (*per neutroni termici*) di **4.4 barn**, e da ^{65}Cu a ^{66}Cu di **2.17 barn**, *entrambe molto alte*, (stabilendo la **idoneità teorica** del Cu per l'estrazione diretta di energia da nucleare ad elettrica) così come **confermato** dai seguenti dati estratti da:

<https://www.ncnr.nist.gov/resources/n-lengths/elements/cu.html>

Neutron scattering lengths and cross sections							
Isotope	conc	Coh b	Inc b	Coh xs	Inc xs	Scatt xs	Abs xs
Cu	---	7.718	---	7.485	0.55	8.03	3.78
^{63}Cu	69.17	6.43	0.22	5.2	0.006	5.2	4.5
^{65}Cu	30.83	10.61	1.79	14.1	0.4	14.5	2.17

e come risulta dalle seguenti carte estratte da: *“Cross-sections of the elements and their isotopes (IAEA)”* <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/28/060/28060364.pdf>



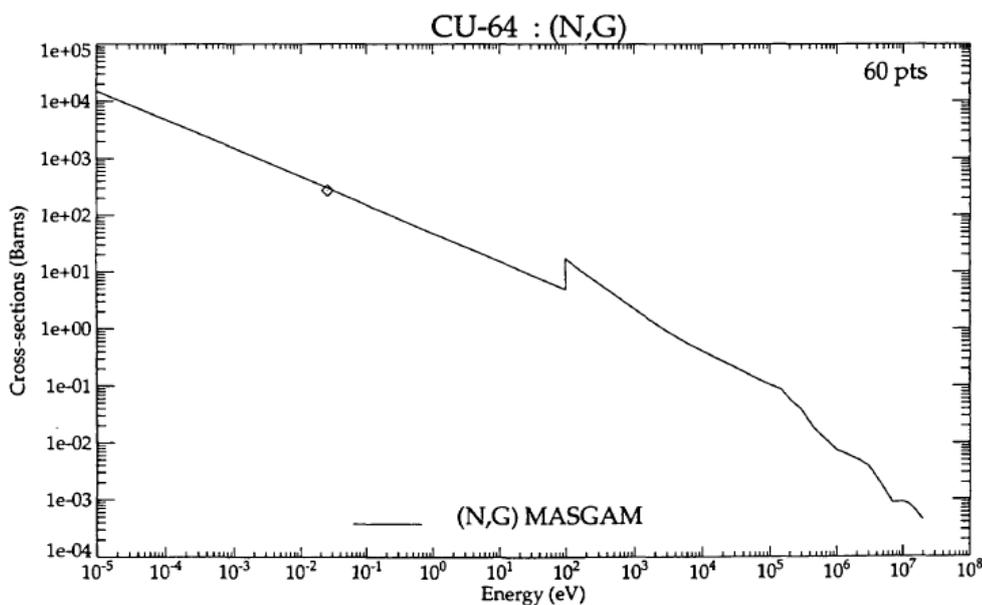
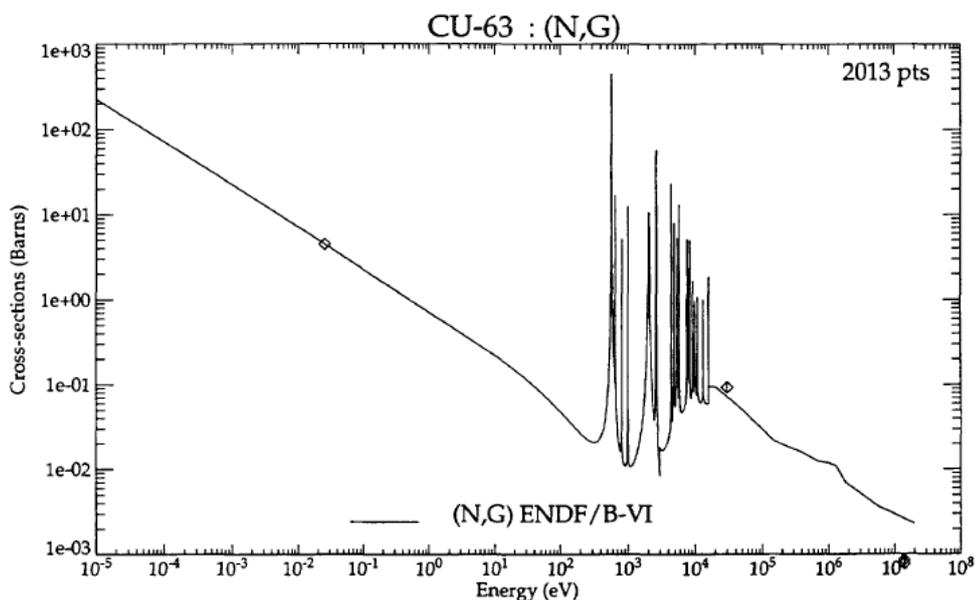
International Atomic Energy Agency

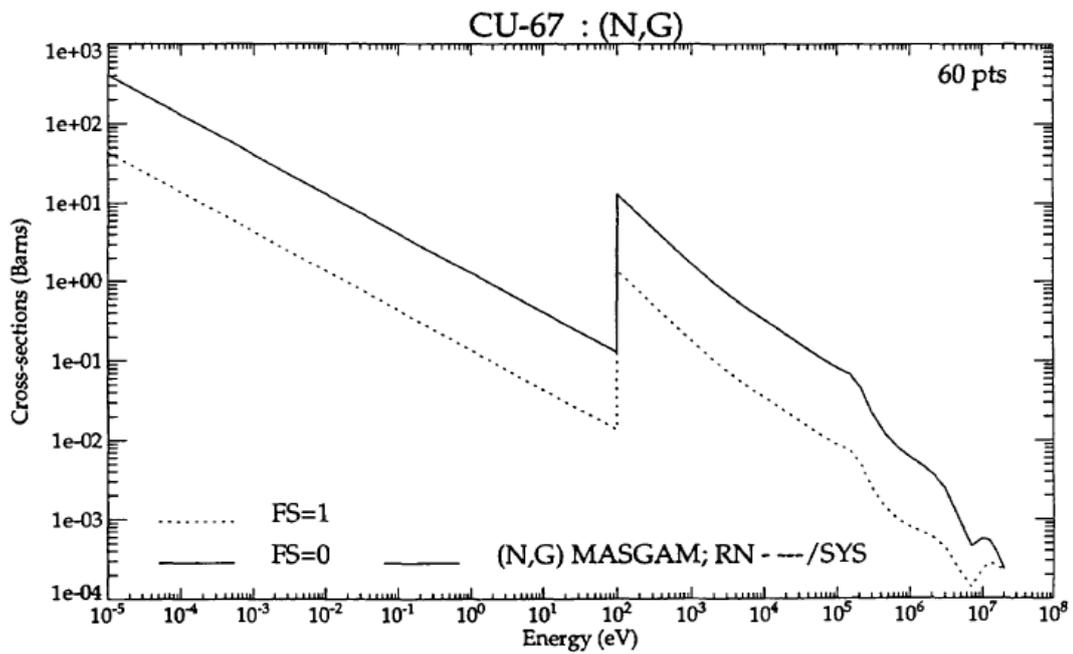
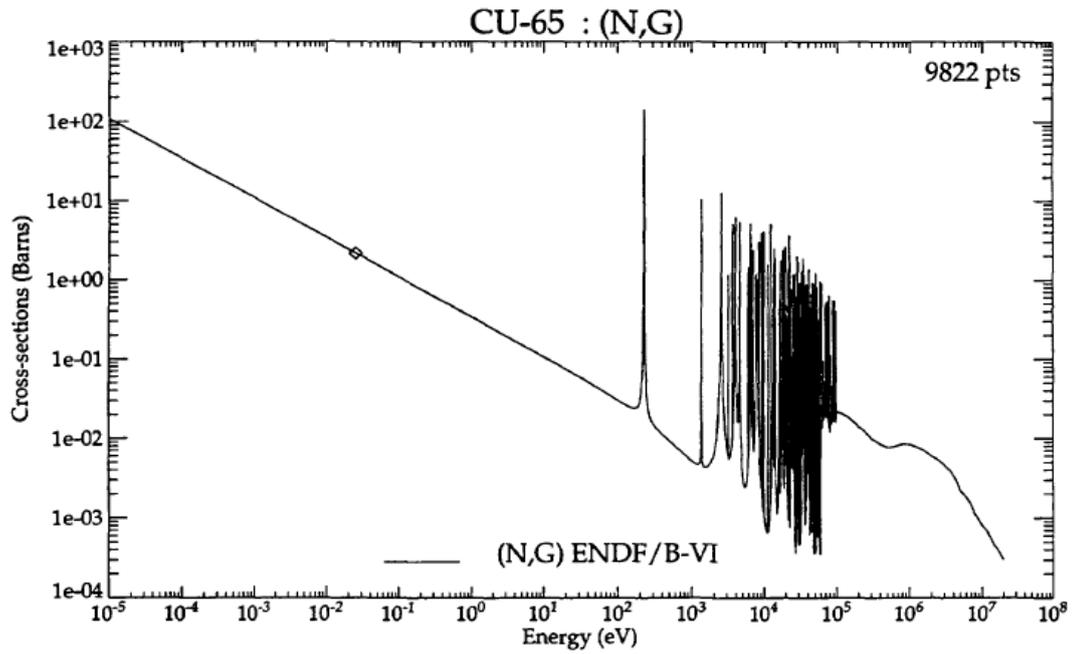
INDC(NDS)-362
Distrib.: G+AT

INDC

INTERNATIONAL NUCLEAR DATA COMMITTEE

Atlas of Neutron Capture Cross Sections





Produzione di Positroni, separazione dagli elettroni e immagazzinamento

Le considerazioni suesposte e i dati riportati rendono possibile la produzione di **Positroni** da parte di diversi isotopi instabili, ottenibili a partire da nuclei stabili soggetti a bombardamento neutronico. Come detto, il presente processo consente di scegliere su tutta la carta dei nuclidi i bersagli che producano le situazioni ottimali in dipendenza dagli obiettivi che ci si vuol prefiggere.

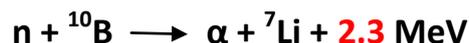
Così si possono ottenere diverse combinazioni su emivite, flussi, rapporto β^+ / β^- , energie rispettive. Con riferimento alla Figura 3) *“Produzione, separazione e immagazzinamento di β^+ e β^- ”*, ad esempio scegliendo come bersaglio la combinazione naturale del Rame nei suoi isotopi più abbondanti (70 % ^{63}Cu e 30 % ^{65}Cu), i dati sopra riportati indicano la produzione degli isotopi ^{64}Cu e ^{66}Cu (il primo, particolarmente idoneo alla emissione di **Positroni**).

Nella figura 3) il bersaglio, in una camera a vuoto, irraggiato con neutroni, si trasforma negli isotopi β -emettitori; un campo magnetico devia simmetricamente le traiettorie delle cariche β , avviandole verso condotti magnetici che ne mantengono confinate le traiettorie in un fascio centrale, fino alle camere “di Penning” per l’immagazzinamento. Gli Elettroni vengono trattati con un sistema “Betavoltaic” per la produzione di elettricità, i Positroni restano disponibili per l’utilizzo diretto. Alternativamente, il bersaglio post-irradiazione può essere estratto per l’utilizzo degli isotopi di interesse, prodotti.

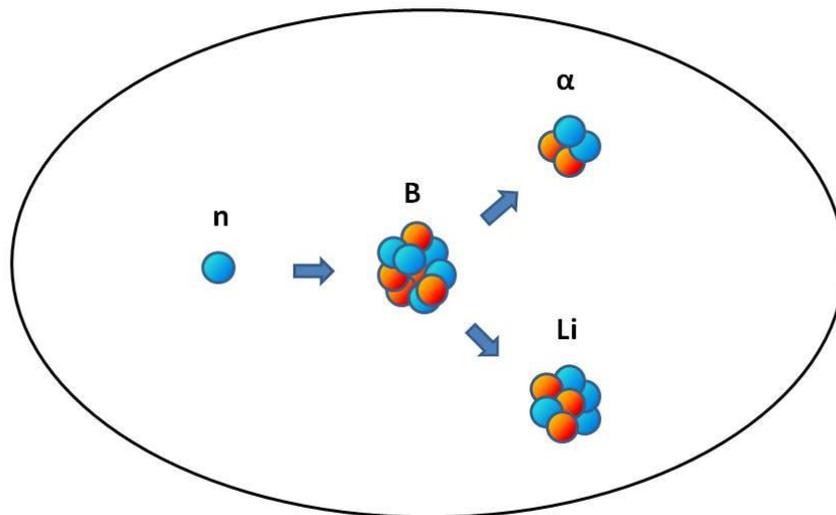
Il processo di schermatura dei neutroni produce calore, che può essere utilizzato per scopi termici, o essere trasformato in elettricità mediante convertitori termoelettrici.

A proposito della cattura da parte del Boro dei neutroni fuoriuscenti dal reattore

Il reattore è dotato di uno schermo in composti del **Boro**, come l’Acido Borico, per catturare esotermicamente i neutroni attraverso la reazione:



Schema:



Meccanismo per controllare le reazioni

Le reazioni di inizio catena sono controllate regolando la sorgente Am-Be (se presente), mediante intercettazione delle particelle Alfa, ad es. con pressione di gas nell'intercapedine, o regolando il generatore di neutroni "a richiesta", e introducendo schermi di Boro.

Sono altresì regolate le principali reazioni coinvolte, agendo sui parametri che ne ottimizzano i singoli rispettivi avanzamenti.

La guida dell'avanzamento dei neutroni lungo la circonferenza del toroide viene effettuata in modo duplice: mediante schermature di deflessione, e creando lungo il cammino condizioni più favorevoli ad uno dei due versi di propagazione, agendo sui parametri di controllo sia dell'assorbimento/moderazione che di moltiplicazione.

La possibilità di reazioni autonome, non sollecitate, deve venire completamente esclusa, essendo il processo di moltiplicazione mantenibile solo in una stretta finestra di condizioni operative proprie di ciascuno stadio locale, condizioni non spontaneamente stabili, ma da realizzare mediante controllo differenziato delle varie sezioni.

Simulazione matematica preliminare in forma chiusa matematica esplicita, riguardante una modellizzazione semplificata dello schema di moltiplicazione neutronica

Consideriamo ora uno schema molto semplificato, assumendo che una corrente di N_0 neutroni/secondo sia disponibile da una sorgente neutronica (Am-Be o di altro tipo).

Tale corrente sarebbe amplificata di un fattore di **1.6** dal Berillio, con una conseguente resa di **0.8** in termini di trasformazione di numero di neutroni in numero di nuclei di Trizio come riportato sopra, in precedenti paragrafi, portando ad una resa globale di circa **1.3** per il rapporto **“Trizio /neutroni entranti”**.

Valutiamo il **limite critico** che separa gli opposti comportamenti del processo ciclico:

l'**autoestinguente** dall'**autoesaltante**.

Modellizziamo il ciclo di retroazione come rappresentativo di una successione di stadi multipli costituiti da strati, ciascuno stadio configurato in **catena Be-Be-Li-T-D-Be**.

(L'ultimo strato di Berillio sarebbe possibile grazie all'alta energia dei neutroni dalla reazione T-D).

A $t = 0$ il numero di neutroni é:

$$N_0 = N_0$$

Dopo il primo passo:

$$N_1 = N_0 + K \cdot N_0 = N_0(1 + K)$$

Dopo due passi:

$$N_2 = N_0 + K \cdot N_1 = N_0(1 + K + K^2)$$

.....

All' n^{mo} passo:

$$N_n = N_0(1 + K + K^2 + + K^n);$$

Così la corrente N_0 viene amplificata per un fattore corrispondente alla somma dei termini della **“successione geometrica”** di ragione K:

$$S_n = (1 - K^{n+1}) / (1 - K)$$

Se $K \ll 1$ la somma tende ad un valore costante (sviluppando in serie di Taylor), circa $1+K$, lasciando N_0 praticamente inalterato.

Se $K < 1$ la somma tende a $1/(1-K)$,

Se $K = 1$ la somma tende a $n + 1$,

Se $K > 1$ la somma tende ad un fattore di moltiplicazione crescente, circa $K^{n+1} / (K - 1)$.

Alcuni valori del coefficiente asintotico (n molto grande) di moltiplicazione M_a sono riportati nella tabella seguente, accanto ad alcuni valori di M_{50} (50 cicli), M_{75} , M_{100} .

Resa T-D	K	M_a
0	0	1
0.1	0.2	1.25
0.2	0.4	1.7
0.25	0.5	2
0.35	0.7	3.3
0.45	0.9	10
0.475	0.95	20
0.495	0.99	100
0.4995	0.999	1000
<u>0.5</u>	<u>1</u>	<u>Infinito</u>
0.6	1.2	$M_{50} = 10^4$
"	"	$M_{75} = 10^6$
"	"	$M_{100} = 10^8$

L'andamento di M è delineato nel grafico riportato tra gli schemi, in Figura 2) "Fattore di moltiplicazione neutronica in funzione dei cicli"

Il valore globale richiesto, di $K > 1$, può essere ottenuto, dal rapporto **1.3 "Trizio /neutrone"**, e un rapporto **1.6 "neutroni /neutrone"** (dall'ultima moltiplicazione da parte del Berillio) per mezzo di una resa di almeno **0.5** dello strato intermedio che realizza lo stadio col rapporto : **"Neutroni /Trizio-Deuterio " ($K = 1.3 \times 1.6 \times 0.5 = 1.04$).**

Questa resa di **0.5** è un valore grande, poiché la sezione d'urto della reazione **Trizio-Deuterio** è circa **tre ordini di grandezza inferiore** a quella della reazione **neutrone-⁶Litio**, che ha una resa di **0.8**, come riportato sopra, nelle referenze, sotto condizioni idonee.

Tuttavia, i lavori di **L. Holmlid** mostrano che il Deuterio è capace di raggiungere uno **stato ultradenso** su un substrato costituito da un **catalizzatore per la deidrogenazione**, con una densità di **cinque ordini di grandezza** superiore a quella del Litio solido, aumentando così la sezione d'urto macroscopica a circa due ordini di grandezza sopra quella del Litio, rendendo la resa **in grado di soddisfare** la condizione **$K > 1$** .

(estratto da: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0912/0912.5414.pdf>)

Abstract

An attempt is made to explain the recently reported occurrence of ultradense deuterium as an isothermal transition of Rydberg matter into a high density phase by quantum mechanical exchange forces. It is conjectured that the transition is made possible by the formation of vortices in a Cooper pair electron fluid, separating the electrons from the deuterons, with the deuterons undergoing Bose-Einstein condensation in the core of the vortices. If such a state of deuterium should exist at the reported density of about $130,000 \text{ g/cm}^3$, it would greatly facility the ignition of a thermonuclear detonation wave in pure deuterium, by placing the deuterium in a thin disc, to be ignited by a pulsed ultrafast laser or particle beam of modest energy.

Quindi la regolazione del meccanismo "neutroni termici-Litio⁶-Trizio-Deuterio ultradenso-neutroni veloci" può essere studiata nel reattore di Figura 5) ***"Apparato per la regolazione della moltiplicazione dei neutroni"***, già progettato per stimolare con laser il deuterio ultradenso, ma

impiegabile, come sopra affermato, anche per la sollecitazione mediante un fascio di particelle emesse dai nuclei.

Nell'apparato illustrato, il Deuterio gassoso entra da destra, in alto, percorre il serbatoio contenente il catalizzatore (ad es. di deidrogenazione, come ossido di ferro drogato con Potassio, o Nichel-Ferro eventualmente drogato con Litio) raggiungendo una fase ultradensa e depositandosi in strato sottile sul raccoglitore, in basso; lì viene investito dalla radiazione di nuclei di Trizio che si originano se nel condotto di sinistra è presente un bersaglio di Litio (anche eventualmente arricchito in Li^6) su cui incide un fascio neutronico moderato immesso da sinistra, in alto.

A proposito della possibilità di sostituire il cannone Americio-Berillio con un generatore compatto di neutroni basato sulla reazione Trizio-Deuterio o Deuterio-Deuterio

Generatori compatti di neutroni sono commercialmente disponibili per applicazioni medicali. Essi sono alimentati elettricamente e possono produrre fasci di neutroni, continui o pulsati, fino a 10^{12} neutroni/secondo.

K.N.Leung al Berkeley National Laboratory ha sviluppato generatori compatti di neutroni basati sulla reazione Trizio-Deuterio (neutroni di alta energia) e Deuterio-Deuterio (energia attorno ai 2.4 MeV) per gli usi in cui si necessita di termalizzare i neutroni (<http://ipo.lbl.gov/lbnl1764/>).

Entrambi hanno alcune importanti caratteristiche: il primo tipo ha maggiore energia dei neutroni, il secondo non impiega Trizio (radioattivo).

Inoltre sono stati sviluppati addirittura semplici chip, con gas adsorbiti integrati (es. Sandia Co.) per la produzione di neutroni a richiesta.

A causa della necessità di immissione di energia, un generatore compatto di neutroni è adatto all'impiego nel processo HEE, in sostituzione del cannone Am-Be, **se** può essere spento, dopo un tempo di attivazione preliminare, una volta che il reattore raggiunga il regime stazionario.

A riguardo della possibilità di spegnere il generatore di neutroni di attivazione

Sia N_0 la velocità iniziale di immissione dei neutroni, e K il fattore di moltiplicazione per ogni ciclo; il numero attuale di neutroni (senza nuova immissione dal generatore) dopo l' n -esimo ciclo è $N_0 K^n$.

Così, un valore $K > 1$ assicura la divergenza del numero di neutroni **persino** nel caso in cui il generatore di neutroni venga spento dopo il raggiungimento del regime nel processo HEE.

Nel caso che n (numero dei cicli) sia 100, se K è ipotizzato essere 1.1, K^n è dell'ordine di 10^4 .

Schema geometrico previsto

Con riferimento al disegno riportato tra gli schemi, figura 1) “*Meccanismo di moltiplicazione neutronica (schema e disposizione geometrica a toroide)-(parte seconda)*”, un fascio neutronico dal generatore viene immesso nel **reattore toroidale** le cui pareti sono costituite da uno scudo di materiale riflettente i neutroni.

Gli strati composti reagenti forniscono sia la generazione di energia che la moltiplicazione del numero di neutroni.

Un drenaggio di neutroni è diretto verso un bersaglio metallico, costituito da un materiale adatto (vedere il paragrafo relativo alla conversione), capace di emettere radiazione β quando colpito da neutroni, per la produzione di elettricità mediante metodi “***betavoltaici***”.

I neutroni sono ciclicamente prodotti “a nuovo”, per evitare la loro disintegrazione dopo il tempo di decadimento.

Lo schema illustrato non è l’unico previsto: ad esempio uno schema lineare, con poche centinaia di microstrati (in accordo con quanto previsto dalla simulazione numerica), presenta il vantaggio di eliminare la circolazione (introducendo maggiore sicurezza di controllo della autoesaltazione), ma comporta maggiore difficoltà nella regolazione differenziata dei vari strati.:

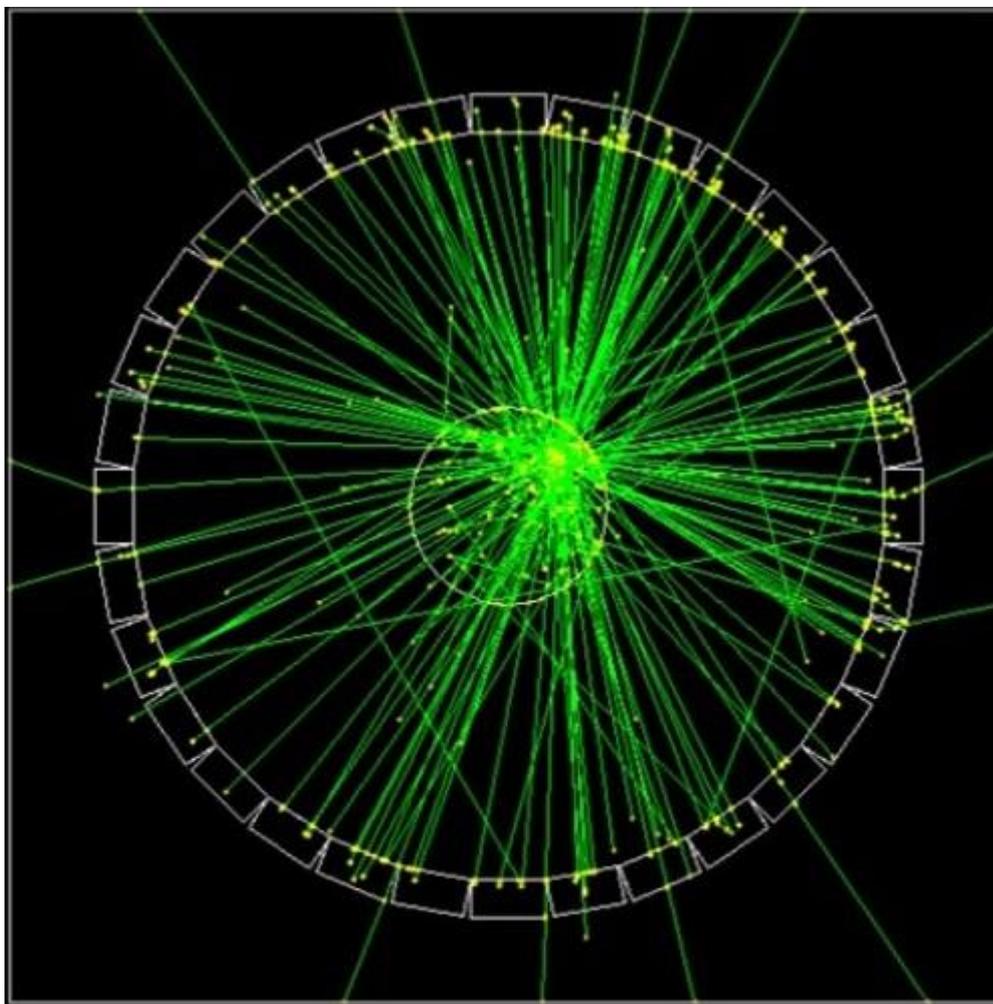
Ambiente software idoneo per la simulazione numerica del comportamento del processo in vista della progettazione differenziata del reattore, mirata alle diverse prestazioni richieste

Il potente ambiente di simulazione GEANT4 é stato sviluppato al CERN specificamente per simulare processi nucleari prestando attenzione alle proprietà fisiche e ai comportamenti di atomi, ioni, particelle, radiazione elettromagnetica coinvolti: sono tenute in conto le loro funzioni di dispersione, così come le sezioni d’urto in funzione delle energie, le trasmutazioni nucleari, il bilancio di energia, le interazioni elettromagnetiche, la dislocazione geometrica.

Una popolazione di particelle é tracciata nel tempo, per ogni evento. Tutti i parametri interni sono disponibili all’ interfaccia di output, i parametri di controllo possono essere variati durante la simulazione, le rese medie sono ottenute per qualsiasi reazione.

Una libreria molto estesa di proprietà e comportamenti è stata sviluppata da ricercatori di tutto il mondo; i risultati sono stati usati molto spesso per comparazioni a comportamenti sperimentali e per il progetto degli apparati.

Un tipico esempio di tracciamento è mostrato sotto:



*Relazione redatta in Associazione **Open Power***

Settembre 2016