

**– Teoria del decadimento beta e stabilità del protone, calcolo teorico dell'energia associata alle particelle emesse**

Nel modello nucleare con deutoni in orbita, il valore dell'energia di legame del nucleo è comprensivo di due componenti tra loro indipendenti.

La prima, di maggior peso, è quella corrispondente all'energia che lega tutte le masse in orbita allo spazio rotante neutronico che è data dalla relazione :

$$E_{ZNS}(Z; N) = E_0(Z) \cdot \alpha(N)$$

$E_0(Z)$  rappresenta l'energia associata ad ogni livello nucleare, **che è stato tabulato** ( paragrafo P.97.1 ) ed è espresso dall'espressione :

$$E_0(Z) = 18,32 \cdot Z^{\frac{2}{3}} \cdot \left[ 1 - \frac{|Z - 18|^{\frac{5}{4}}}{1200} + S \cdot \frac{(Z - 83)^{\frac{7}{4}}}{32000} \right]$$

dove **S** vale sempre zero e si assume **S = 1** solo per **Z > 83**.

Con  $\alpha(N)$  abbiamo indicato il fattore di riempimento delle orbite, che indica il numero dei livelli saturi realmente occupati e si calcola con la relazione :

$$\alpha(N) = \sum_1^{p_s} \frac{n_p + 1,999008 \cdot n_d}{2 \cdot p^2} \simeq \sum_1^{p_s} \frac{n_p + 2 \cdot n_d}{2 \cdot p^2}$$

La seconda componente, meno rilevante, è quella che si associa all'energia di legame propria degli aggregati in orbita (se non sono particelle elementari), che **non dipende dallo spazio rotante** e vale, nel nostro caso :

$$E_{ZNI}(N-Z) = 2,224 \text{ MeV} \cdot (N - Z)$$

Questa componente, pur aumentando l'energia di legame totale del nucleo, **non fornisce alcun contributo all'energia che lega le particelle presenti sulle orbite al nucleo centrale**. Essa non è dunque da considerare per la valutazione della stabilità del nucleo.

L'energia di legame totale del nucleo vale dunque :

$$E_{ZN}(Z; N) = E_0(Z) \cdot \alpha(N) + 2,224 \text{ MeV} \cdot (N - Z)$$

E' da notare che, se ci limitiamo a considerare **gli isotopi naturali**, essendo essi prossimi alla saturazione dei livelli, è possibile calcolare un valore della energia di legame di prima approssimazione, considerando i livelli **occupati regolarmente, senza lacune**, con un fattore  $\alpha(N)$  dato da :

$$\alpha(N) = \sum \frac{n_p + 1.999008 \cdot n_d}{2 \cdot P_s^2} \simeq \sum \frac{n_m}{2 \cdot P_s^2}$$

Per esempio, per l'  $U_{92}^{238}$  e  $Sn_{50}^{120}$  si ottiene :

$$\alpha(146) \simeq \sum \frac{n_m}{2 \cdot P_s^2} = \frac{2}{2} + \frac{8}{8} + \frac{18}{18} + \frac{32}{32} + \frac{50}{50} + \frac{36}{72} = 5.5$$

$$E_{ZN(92; 146)} \simeq E_0(92) \cdot \alpha(146) + 2,224 \text{ MeV} \cdot 54 = 1805.16 \text{ MeV}$$

In buon accordo con il valore teorico **1801.7 MeV**

$$\alpha(70) \simeq \sum \frac{n_m}{2 \cdot P_s^2} = \frac{2}{2} + \frac{8}{8} + \frac{18}{18} + \frac{32}{32} + \frac{10}{50} = 4.2$$

$$E_{ZN(50; 70)} \simeq E_0(50) \cdot \alpha(70) + 2,224 \text{ MeV} \cdot 20 = 1022.54 \text{ MeV}$$

il valore sperimentale è **1020.54 MeV**.

Un aspetto importante che la composizione orbitale dei nuclei mette in rilievo è il fatto che essi, in special modo quelli più pesanti, presentano, sulle orbite periferiche, una elevata densità di deutoni in equilibrio, confinati **stabilmente** in uno spazio ben definito e con elevato valore di energia cinetica.

**Questa condizione è proprio quella che si richiede per poter realizzare la fusione nucleare**, che analizzeremo in un prossimo capitolo.

Contrariamente a quanto viene sostenuto dalle teorie correnti, Analizzando le configurazioni dei livelli nucleari che abbiamo ricavato, si vede inoltre che nei nuclei non sono presenti particelle  $\alpha$ .

**Dunque quelle che vengono emesse spontaneamente dai nuclei che si dividono devono essere sintetizzate nel nucleo nel momento in cui vengono emesse.**

La comprensione dettagliata dei meccanismi attraverso i quali si realizza nei nuclei pesanti la sintesi delle particelle  $\alpha$  che normalmente vengono emesse spontaneamente, potrebbe fornire precise indicazioni sui metodi attraverso i quali sarà possibile controllare la velocità della fusione.

Prima ancora di affrontare questo problema, è però necessario capire quali condizioni rendono i nuclei instabili e per quale ragione la scissione avviene con le modalità da noi osservate.

Secondo quanto abbiamo visto trattando la teoria generale, qualsiasi spazio rotante con sfere planetarie in orbita tende ad evolvere verso la condizione di massima energia di legame.

Il nucleo atomico non fa eccezione a questa regola e questo è confermato da tutti i nuclidi tabulati dal P.98 al P.217, che presentano sempre, per qualsiasi valore del numero atomico, la **tendenza a spostare le sfere planetarie dai livelli periferici a quelli centrali**, per ottenere la massima stabilità relativa con livelli normalmente saturi, senza alcuna lacuna.

Si potrebbe addirittura utilizzare questa come condizione di validità generale per ottimizzare la scelta di  $E_0(1)$  per aumentare ulteriormente la precisione dell'energia di legame calcolata con l'espressione teorica.

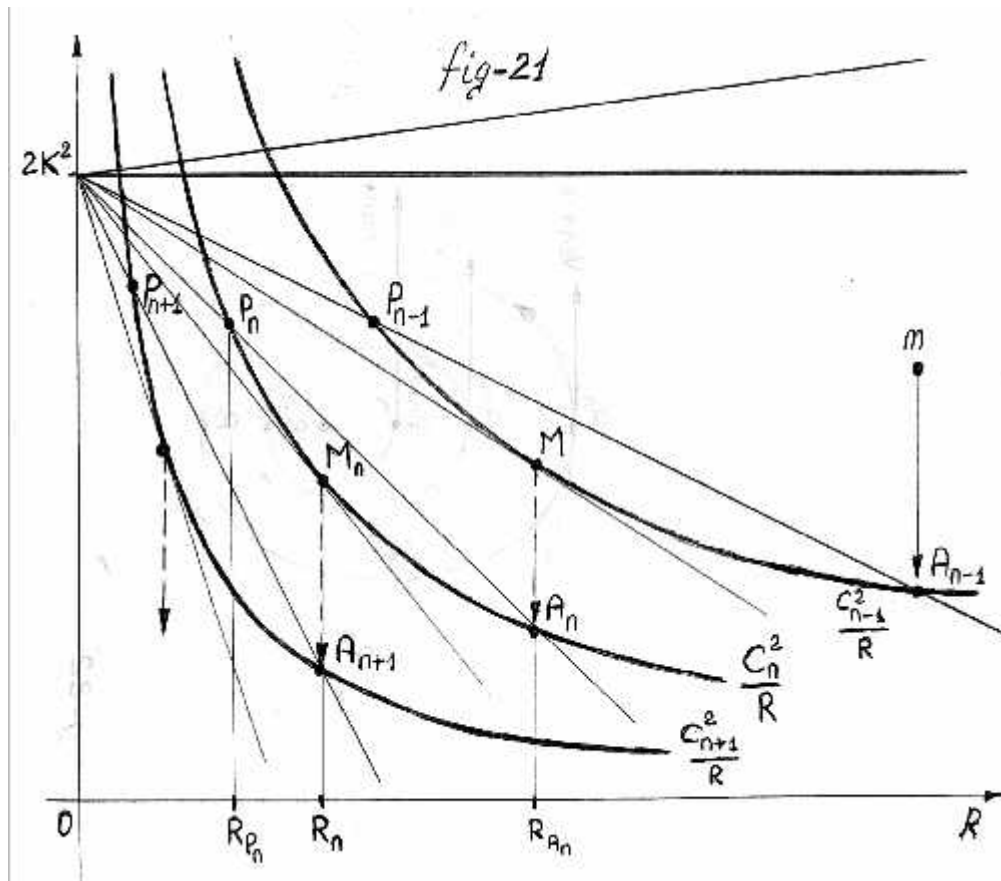
Nel modello nucleare che abbiamo proposto, abbiamo i due tipi di instabilità **caratteristici di qualsiasi spazio rotante** :

– **Instabilità dovuta al trasferimento spontaneo** delle masse orbitanti da un punto all'altro dello spazio rotante.

– **Instabilità propria degli aggregati** in moto sulle orbite.

La prima forma di instabilità dipende dall'equilibrio tra le masse in orbita e lo spazio rotante e si manifesta con un graduale scorrimento delle masse che si spostano dalle orbite periferiche verso quelle più interne.

Il meccanismo attraverso il quale si realizza lo scorrimento dei protoni verso il centro è quello che abbiamo visto trattando la teoria generale e che è stato trattato nell'Art. 24.2 e che qui ricordiamo brevemente .



Con riferimento alla figura, la particella  $m$  viene sintetizzata, oppure **giunge nel punto  $A_{n-1}$** , con valore di energia **generalmente in eccesso** rispetto al valore necessario per restare in equilibrio sull'orbita circolare e quindi **inizia il moto su un'orbita ellittica**.

La forma eccentrica dell'orbita genera sulla massa in moto un'accelerazione radiale sinusoidale avente frequenza doppia di quella orbitale, **che produce irraggiamento di energia nello spazio circostante** proporzionale al valore dell'eccentricità dell'orbita (vedi Art. 24.2).

L'energia che viene scambiata con lo spazio porta a una graduale riduzione dell'eccentricità con ulteriore riduzione dello scambio. **Gradualmente si ha quindi una riduzione del raggio orbitale fino all'orbita circolare minima**, che viene raggiunta nel punto  $M$ .

Nel nucleo la quantizzazione delle orbite spesso impone anche il passaggio in breve tempo su un'orbita più interna, associata a una maggiore stabilità.

1692d

Come per un qualsiasi spazio rotante, **il punto neutro** della massa satellite diminuisce con il diminuire del raggio orbitale e quindi, se sull'orbita si ha un aggregato le cui componenti sono legate da una forza  $f_m$ , in corrispondenza di questo punto **si verifica la separazione**.

Questa seconda forma di instabilità dipende dunque dal valore della forza  $f_m$  caratteristica degli aggregati presenti sulle orbite e quindi nel nucleo atomico **dall'energia che nel deutone lega il protone al neutrone**.

Tutti i nuclei irradiano energia nello spazio e raggiungono la massima stabilità relativa spostando le particelle dalle orbite periferiche verso quelle più interne.

La potenza irradiata si riduce nel tempo con legge esponenziale ed è questa la ragione per cui nuclei vicini, dunque con caratteristiche molto simili, **anche nella configurazione dei livelli nucleari**, possono decadere con periodi di dimezzamento molto diversi.

Se non ci fossero interventi di **altri processi**, diversi da quelli finora descritti e, in particolare, se in orbita ci fossero solo particelle elementari, tutti i nuclei **irradierrebbero regolarmente energia nello spazio con continuità**, senza emissioni improvvise di particelle, fino ad avere tutti i livelli saturati da particelle elementari in moto sulle orbite circolari minime in una condizione di massima stabilità.

I nuclei hanno però in orbita "**anche aggregati, che non hanno la stabilità assoluta, propria delle particelle elementari**".

E' proprio la presenza di questi aggregati che conferisce instabilità "**evidente**" al nucleo atomico.

In definitiva, l'instabilità che noi osserviamo nei nuclei atomici altro non è che la tendenza che presentano gli aggregati in orbita, ossia i deutoni, a dividersi **sotto l'azione dello spazio rotante centrale**.

E' chiaro che, se il nucleo decade immediatamente dopo la sintesi, l'energia emessa avrà il valore massimo con il minimo del periodo di dimezzamento. Se invece il decadimento avviene dopo un certo tempo, **l'energia associata sarà uguale all'eccesso iniziale meno quella che è già stata irradiata**.

**Dunque, man mano che aumenta il tempo di dimezzamento il valore di energia che viene emesso diminuisce fino ad annullarsi in prossimità dell'orbita circolare minima.**

Con l'approssimarsi all'orbita circolare minima, I nuclei presenteranno quindi periodi di dimezzamento molto elevati con bassi valori dell'energia emessa.

E' da notare che la potenza irradiata dal nucleo con continuità, in seguito allo scorrimento di cui si è detto, **ha un valore praticamente irrilevante**, per cui, quando si parla di instabilità del nucleo, ci si riferisce solo ai casi seguenti, in cui **gli eventi di decadimento si verificano improvvisamente.**

Prima di passare all'analisi dei processi di decadimento, precisiamo che lo studio è stato impostato in modo da dare risposta ad alcune lecite domande.

– Per quale ragione un neutrone, molto instabile quando è libero, aumenta la sua stabilità nel nucleo ?

– Perché il protone ha, rispetto al neutrone, un comportamento esattamente opposto ? Esso è assolutamente stabile quando è libero, mentre diminuisce la stabilità quando è legato nel nucleo.

– Dal momento che i neutroni sono stati osservati **sempre** fuori dal nucleo, come possiamo essere certi della loro esistenza all'interno del nucleo **come particelle definite** e non pensare che possano essersi formate nel momento in cui vengono espulse ?

– Quando si dice "neutroni in eccesso oppure in difetto", qual'è il riferimento assunto e con quale criterio viene scelto ?

– **cattura K e decadimento  $\beta^+$ .**

Con il modello di atomo che abbiamo proposto la prima orbita elettronica ha

un valore del raggio :  $R_{1e} \simeq R_{11e} \cdot Z^{\frac{1}{3}}$

mentre il raggio dell'ultima orbita nucleare, occupata dai protoni sul livello di

confine  $p_s$ , vale :  $R_{p_s p} \simeq R_{11p} \cdot Z^{\frac{1}{3}} \cdot p_s^2$

I protoni nucleari periferici **si trovano relativamente vicini** alla prima orbita elettronica ( Art. 35 e Art.36), per cui esiste una probabilità apprezzabile che il protone "**catturi**" l'elettrone per sintetizzare un neutrone.

E' sostanzialmente questo il processo attraverso il quale si sono formati tutti i neutroni presenti nel nucleo.

Il neutrone così formato si unisce in orbita con un protone e forma un deutone, che rimane in equilibrio sull'orbita.

**Si crea così un sistema squilibrato, con un numero di neutroni centrali attivi invariato e in orbita una "particella" in meno.**

Lo spazio rotante generato risulta quindi eccessivo per il numero di particelle presenti sulle orbite.

**La situazione che si presenta è analoga a quella che si ha nell'atomo, quando sulle orbite periferiche manca un elettrone.**

Per riequilibrare il sistema il nucleo ha due alternative :

**catturare** un atomo di idrogeno dall'esterno, se è disponibile, ripristinando il nucleo equilibrato  $A(Z ; N+1)$ , oppure spostare un neutrone attivo dal centro su un'orbita sulla quale, con un protone già presente, è possibile sintetizzare un deutone che rimane in moto sull'orbita stessa.

In questo caso viene a formarsi **il nucleo equilibrato**  $A(Z-1 ; N+1)$  con un numero di particelle in orbita uguale a quello dei neutroni attivi.

Il processo si può realizzare spontaneamente solo se tra le masse atomiche è verificata la relazione :

$$M(A ; Z) > M(A ; Z - 1)$$

L'alternativa che verrà utilizzata per ripristinare l'equilibrio dipende dal caso specifico, come vedremo tra breve con qualche esempio reale.

E' importante notare che :

**I nuclei aventi  $N = Z$  " se non avessero la possibilità di catturare gli elettroni dell'orbita K " sarebbero relativamente stabili e soggetti solo allo scorrimento graduale delle particelle verso il centro per effetto della radiazione emessa.**

Un processo analogo, per gli effetti prodotti, ma **non alternativo alla cattura K**, è la sintesi di un neutrone **senza l'intervento di un elettrone esterno.**

Le reazioni nucleari che si verificano **in questo caso sono assolutamente identiche a quelle viste nella cattura K**, con la sola differenza che bisogna reperire un elettrone all'interno del nucleo.

Sappiamo che nel nucleo non sono presenti elettroni liberi, per cui bisognerà **crearlo** e dall'esperienza è noto che **"è possibile generarlo solo in coppia con un elettrone positivo"**.

Affinchè il processo **possa avviarsi spontaneamente**, è necessario che si abbia un nucleo che subisca una **transizione interna** seguita dall'emissione di un raggio  $\gamma$  di energia maggiore dell'energia di massa delle particelle da materializzare, pari a **1.22 MeV**.

Trattando **la deviazione della luce e l'effetto Compton** ( P.29.2 e P.29.3 ), abbiamo visto che **un fotone può essere assorbito "solo da uno spazio rotante sulla sua prima orbita accessibile"**, sulla quale si ha **velocità di equilibrio uguale a quella della luce**.

Se dunque un fotone, avente l'energia indicata, incide sull'orbita di raggio  $r_{1p}$  di uno dei protoni presenti nel nucleo, **non viene deviato, ma assorbito**.

Con parole improprie, ma che semplificano il discorso, diciamo che il fotone, trovando la condizione di equilibrio, **"si ferma sull'orbita"**, **cedendo la sua energia allo spazio fisico locale**.

**Il protone è però una particella elementare e come tale "non consente" alcuna perturbazione del suo spazio rotante sulla prima orbita.**

Per questa ragione, lo spazio rotante **elimina la perturbazione** indotta sull'orbita dal fotone incidente.

Per farlo ha a disposizione due soluzioni :

rimettere **due fotoni in direzioni opposte** (per verificare la conservazione della quantità di moto) di energia uguale a metà del fotone incidente, oppure **generare un equilibrio con una coppia "particella e antiparticella"**, **che insieme non cambiano lo spazio rotante del protone**.

Naturalmente, la seconda soluzione è subordinata al valore dell'energia resa disponibile dal fotone incidente.

Ricordando che lo spazio rotante nel quale una massa si muove in equilibrio non rileva effetti relativistici, la coppia di elettroni  $\beta^+$  e  $\beta^-$  in moto sull'orbita  $r_{1p}$ , hanno complessivamente un'energia di legame :

$$E_{2eq} = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot C_1^2 = 0.5109991 \text{ MeV}$$

1692h



con un difetto di massa della coppia coincidente con la massa di un elettrone.

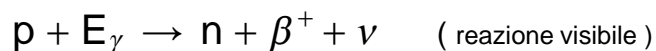
**Per creare la coppia in equilibrio sull'orbita, il fotone incidente spende quindi solo l'energia per generare due "semielettroni", ossia :**

$$E_{\gamma 1} = 2 \cdot (m_e \cdot C_1^2) - E_{2eq} = 0.5109991 \text{ MeV}$$

Se il fotone dispone ancora di un'energia  $E_{\gamma 2} = E_{2eq} = 0.5109991 \text{ MeV}$ , la cede alle due particelle che raggiungono la velocità di fuga e si allontanano dall'orbita in direzioni opposte.

L'elettrone positivo, non potendosi legare ai protoni, **esce dal nucleo come particella  $\beta^+$** , mentre l'elettrone negativo **viene immediatamente catturato da un protone vicino**, per sintetizzare un neutrone che dà inizio alla serie di trasmutazioni che abbiamo visto con la cattura K.

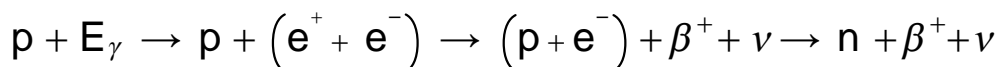
**Di tutto il processo "l'unico evento che viene osservato dall'esterno è la "trasformazione di un protone in neutrone", con la emissione di un elettrone positivo e viene, per questa ragione, sintetizzato con la reazione di trasmutazione :**



che viene letta come una **scissione del protone**.

In realtà il protone, come particella elementare, è **indivisibile**, e nel processo **ha solo "prestato" lo spazio rotante** per rendere possibile la formazione delle particelle materiali.

La reazione, **più correttamente**, andrebbe scritta nella forma :



E' chiaro che, se l'elettrone negativo non viene catturato, **la fuoriuscita delle due particelle renderà evidente la formazione della coppia**.

Ritornando alla trasmutazione nucleare prodotta, in questo caso il processo si potrà realizzare spontaneamente solo se si verifica :

$$M(A; Z) > M(A; Z-1) + 2 \cdot m_e$$

Dove **le due masse elettroniche** rappresentano i due elettroni che l'atomo prodotto **perde complessivamente** come particella  $\beta^+$  dal nucleo e come elettrone orbitale periferico.

Si tratta di un processo che presenta probabilità di realizzarsi **molto bassa** in quanto, come abbiamo visto, richiede condizioni molto particolari.

Con questi processi, ma soprattutto con la cattura K, ad ogni evento segue la **trasformazione di tre protoni periferici in due deutoni**.

Sia la riduzione del numero di protoni che l'aumento di quello dei deutoni, che non riescono a catturare elettroni, riducono notevolmente la probabilità che si possano verificare ancora questi eventi nel nucleo che è stato sintetizzato.

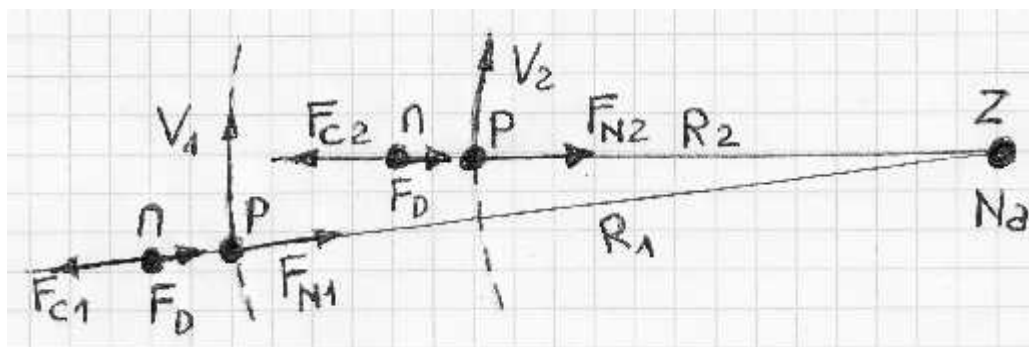
Nel senso che abbiamo indicato l'aumento del numero isotopico, e quindi dei neutroni presenti nel nucleo, **genera un aumento della stabilità** rispetto alla cattura K e all'emissione  $\beta^+$ .

– **decadimento  $\beta^-$**

A questo punto osserviamo che il deutone in orbita, **essendo un aggregato** (non una particella elementare legata da una forza molto elevata, **uguale alla massima realizzabile nell'universo osservabile pari a  $53346,70654 N_w$** , P.63), ha i suoi componenti legati da una **forza di valore molto limitato**.

Esisterà quindi una distanza dal centro dello spazio rotante nucleare (che nei sistemi astronomici abbiamo chiamato punto neutro) in corrispondenza della quale la forza che lo spazio rotante centrale esercita supera quella di legame dell'aggregato ed esso si scinde.

La situazione è quella schematizzata in figura.



Sappiamo che lo spazio rotante generato dal neutrone coincide praticamente con quello di un atomo di idrogeno e quindi **la sua forza d'interazione con lo spazio rotante centrale è praticamente uguale a zero**.

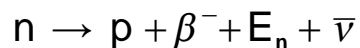
Questo vuol dire che esso è **trascinato** in rotazione dal protone con una forza di legame  $F_D$  caratteristica del deutone, **indipendente dalla distanza dal centro** e di valore relativamente basso, visto che il deutone ha energia di legame piuttosto bassa.

La forza centrifuga  $F_C$  che agisce sul deutone dipende invece dalla distanza dal nucleo centrale e aumenta man mano che diminuisce il raggio dell'orbita.

L'equilibrio è comunque sempre assicurato dalla forza centripeta  $F_N$  che lo spazio rotante nucleare **esercita sul protone** e quindi **anche sul neutrone** con esso solidale.

**Esiste però un valore del raggio orbitale in corrispondenza del quale " la forza centrifuga  $F_C$  che agisce sul neutrone supera il valore della  $F_D$  che lo lega al protone " e quindi esso si divide dal protone, allontanandosi lungo la tangente.**

Il neutrone libero però non è stabile e quindi, in un tempo di circa **13** minuti, si scinde spontaneamente secondo lo schema noto :



**L'elettrone negativo fuoriesce dal nucleo ed è l'effetto esterno che noi rileviamo.** Il protone invece rimane in equilibrio sull'orbita.

Il nucleo formato è però squilibrato, in quanto presenta al centro un numero di neutroni attivi ancora uguale a  $Z$ , mentre in orbita le particelle sono  $(Z + 1)$ .

**Si ha dunque una particella in eccesso.**

Per ripristinare l'equilibrio si hanno due soluzioni : rigenerare il deutone con una cattura K, ritornando al nucleo iniziale, e vedremo che in una particolare condizione questo si verifica, oppure aumentare il numero di neutroni attivi al centro, aumentando lo spazio rotante generato. In questo caso **un deutone** presente su una orbita interna "**si polarizza**" spostando il neutrone al centro mentre il protone rimane in orbita.

Si forma così il **nucleo equilibrato**  $A(Z+1 ; N-1)$  che, rispetto al nucleo di partenza, presenta sulle orbite un numero di protoni aumentato di **tre** unità e il numero di neutroni ridotto di **due** unità.

1692m

**Esattamente il contrario di quello che si verifica con la cattura.**

Questo evento si può realizzare spontaneamente solo se si verifica :

$$M(A ; Z) > M(A ; Z+1)$$

Ad ogni evento di emissione  $\beta^-$  segue quindi una riduzione della probabilità che l'evento si ripeta, mentre aumenta la probabilità che si verifichi un evento di cattura K oppure emissione  $\beta^+$ .

Questo vuol dire che : " Esiste, per ogni valore di Z, un numero dei neutroni eccedenti, dunque del numero isotopico, che rende ugualmente probabili la cattura K e l'emissione  $\beta^-$ .

E'questa la condizione di equilibrio alla quale tendono tutti i nuclei immaginabili.

Facciamo notare che i nuclei che si trovano in questa condizione **sono solo apparentemente stabili**. In realtà in essi si realizza **un lento, ma continuo, scambio di elettroni tra il nucleo e l'orbita elettronica K**.

La stabilità apparente non è quindi legata alle forze nucleari, particolarmente intense, ma alla particolare configurazione dei livelli nucleari.

Fissato il valore di Z, sperimentalmente vediamo che la massima stabilità si ottiene con un'eccedenza di neutroni data da :

$$I_0 = \left( \frac{Z}{8} - 1 \right)^{1.7}$$

e quindi con un numero di massa :  $A_0 = 2 \cdot Z + \left( \frac{Z}{8} - 1 \right)^{1.7}$

Precisiamo che con Z intendiamo il numero delle particelle presenti in orbita e quindi l'elemento chimico di numero atomico Z.

Un nucleo avente  $N < Z$  (numero isotopico negativo), presenta al centro un numero di neutroni attivi minore di quello dei protoni presenti sulle orbite.

Lo spazio rotante generato, in questo caso risulta dunque **minore di quello**

**necessario per trattenere le particelle sulle orbite e questo le costringe a spostarsi su quelle periferiche**, con una minore energia di legame, senza saturare quelle interne.

Per  $N \ll Z$  questi protoni periferici **possono risultare tanto poco legati da allontanarsi dall'orbita**. Questi nuclei estremi, come vedremo tra breve, possono anche emettere direttamente protoni.

Nei casi meno estremi, ma comunque con  $N < Z$ , lo spostamento verso la periferia dei protoni aumenta in maniera significativa la probabilità di cattura di un elettrone K, con successiva **sintesi di un neutrone**, che si trasferisce al centro, aumentando lo spazio rotante nucleare.

Quando si giunge ad avere  $N = Z$ , ulteriori catture portano alla sintesi diretta di deutoni sulle orbite con graduale scorrimento dei protoni verso il centro al quale si accompagna una riduzione della probabilità che l'evento si ripeta. Si giunge così all'isotopo avente la massima stabilità e numero di massa  $A_0$ .

Se a questo punto **viene forzato dall'esterno** l'assorbimento di un atomo di idrogeno oppure direttamente di un neutrone da parte del nucleo (stabile), il deutone sintetizzato sull'orbita ha una probabilità non trascurabile di scindersi in un tempo più o meno breve liberando una particella  $\beta^-$ .

Ulteriori aggiunte di neutroni aumentano la probabilità di emettere un  $\beta^-$  in un tempo sempre più breve, come risulta dalla **tavola degli isotopi** pubblicata sul sito dal P.88 al P.217, che conferma anche la massima stabilità relativa, **in funzione del numero di neutroni**, dei nuclei aventi il numero di massa

$$A_0 = 2 \cdot Z + \left( \frac{Z}{8} - 1 \right)^{1.7} .$$

La cattura K e il decadimento  $\beta^+$  e  $\beta^-$  lasciano invariato il numero il numero di massa e quindi rappresentano i processi attraverso i quali si generano gli isobari.

Essi sono stati quindi raccolti nella **tavola degli isobari**, pubblicata dal P.218 al P.513, **con il dettaglio della configurazione dei livelli nucleari** in modo da poter calcolare teoricamente, **in maniera molto semplice**, l'energia che viene emessa con la particella  $\beta$ .

E' importante notare che, se viene fissato il numero di massa  $A = Z + N$ , l'isobaro che presenta il valore massimo della stabilità relativa, **in funzione del numero di protoni**, ha il numero atomico  $Z_0$  dato dalle relazioni :

$$I_0 = \left( \frac{Z}{8} + 1 \right)^{1.7} \quad \text{e quindi :} \quad Z_0 = 8 \cdot \left( I_0^{\frac{1}{1.7}} + 1 \right)$$

Il nucleo che presenta la massima stabilità rispetto all'emissione  $\beta$  coincide quindi con quello che presenta la massima stabilità rispetto all'assorbimento di neutroni.

Se un deutone è **in equilibrio** su un'orbita, è assolutamente stabile e non si divide spontaneamente. **Condizione necessaria** per realizzare la divisione è che gli venga fornita un'energia maggiore di quella di legame.

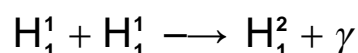
**Se la divisione che si osserva è spontanea**, ossia senza alcuna fornitura di energia esterna, vuol dire che essa è stata fornita al deutone dallo spazio rotante con una **transizione spontanea** dell'aggregato da un livello esterno  $p_1$  a un livello interno  $p_2$ .

La scissione del deutone sul livello  $p_2$  comporta la separazione di un protone dal resto, che chiamiamo **neutrone**. Prima di avere la particella  $\beta$ , si dovrà ancora verificare la divisione del neutrone.

A questo punto notiamo che per il neutrone **si verifica spontaneamente la scissione di un aggregato** e nello stesso tempo si ha emissione di energia e riduzione della massa, mentre in genere, per allontanare una massa da uno spazio rotante al quale è legata **si deve fornire un'energia e si ottiene un aumento della massa complessiva**.

Questo ci deve far pensare che **nel sistema neutrone** si verifichi una serie di eventi analoga a quella che abbiamo descritto per l'emissione  $\beta$ .

Abbiamo visto che due atomi di idrogeno, con una opportuna compressione, possono sintetizzare l'atomo di deuterio, secondo la reazione :



ricordando i valori delle masse :  $m_{H_1^2} = 2.014101778$  ;  $m_{H_1^1} = 1.007825032$

si ricava l'energia emessa :  $E_\gamma = 1.4422056 \text{ MeV}$

La struttura del deutone libero, fuori dal nucleo atomico, per come l'abbiamo realizzata, si presenta assolutamente simmetrica con un elettrone pesante al centro e due protoni polarizzati in moto nel suo spazio rotante.

In questa struttura non è dunque distinguibile nessuna particella o aggregato **che possa essere assimilato al neutrone.**

Secondo la reazione indicata, deve essere possibile il processo inverso, per cui, fornendo l'energia  $E_\gamma$ , ci si aspetterebbe di realizzare la scissione :



**invece non accade assolutamente nulla.**

**Per poter realizzare la divisione del deuterio, benchè la sua energia di legame sia uguale a 1.4422056 MeV, è necessario fornire un valore di energia maggiore, pari a :**

$$E_D = 2.22452 \text{ MeV}$$

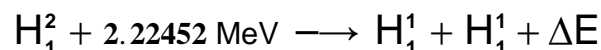
Si deve cioè fornire un surplus di energia :

$$\Delta E = E_D - E_\gamma = 0.782299 \text{ MeV}$$

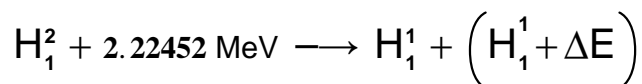
Se aggiungiamo questa energia alla reazione di scissione teorica, si ha :



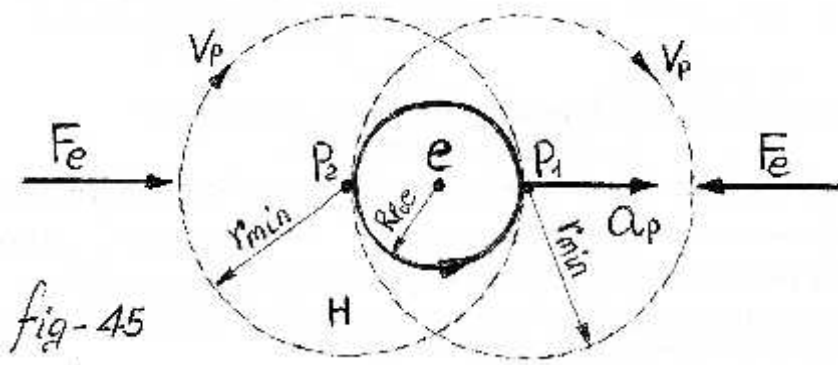
che si può scrivere :



Dato che **immediatamente dopo** la scissione uno dei prodotti è un protone, si potrà ancora scrivere :



dove il termine in parentesi deve rappresentare necessariamente il neutrone, che, come si vede, è formato da un aggregato eccitato dal surplus di energia  $\Delta E$ . Per capire le fasi successive del processo, riprendiamo la struttura del deutone libero, che si presenta come in figura



dove l'aggregato centrale è un **elettone pesante**, ossia un aggregato simile al deutone (**protone pesante**) nel quale al protone si sostituisce l'elettone e al neutrone un'analogo aggregato, che, per le sue caratteristiche, viene detto **neutrino**.

Se, dopo aver realizzato la sintesi del deutone, **con la struttura simmetrica indicata**, si fornisce energia per realizzare il processo inverso, **la probabilità che il fotone incidente ceda simultaneamente ai due protoni la stessa energia è praticamente uguale a zero**, per cui uno dei due protoni riceve più energia e anticipa l'altro, allontanandosi dal deutone.

La parte che rimane è formata dal **protone nel cui spazio rotante si trova l'elettone pesante che ha ricevuto l'energia  $\Delta E$  e si è spostato a una maggiore distanza dal centro, su un livello metastabile**.

In mancanza della simmetria iniziale, **l'elettone pesante**, ossia l'aggregato **elettone - neutrino**, si trova, nello spazio rotante del protone, **nella stessa situazione** che avevamo per il deutone nello spazio rotante nucleare e quindi gli eventi che si verificano sono assolutamente gli stessi.

**Il neutrino libero, avendo spazio rotante praticamente uguale a zero, da solo è assolutamente incapace di restare in orbita.**

Se però è legato all'elettone **viene da esso tenuto in orbita** come avviene per il neutrone, trattenuto dal protone all'interno del nucleo fino a quando, con la riduzione della distanza dal centro, la forza esercitata dallo spazio rotante centrale supera quella di legame tra elettone e neutrino e quindi **"il neutrino si divide dall'elettone"**.

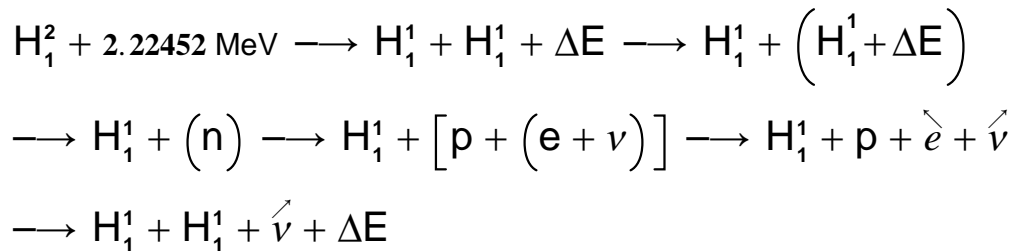
Elettone e neutrino, avendo recuperato l'energia di eccitazione  $\Delta E$ , con la



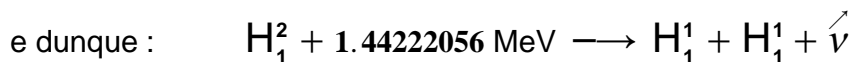
caduta verso il centro, **si allontanano dal protone, ripartendosi l'energia.**

A questo punto è possibile il rilievo delle caratteristiche dell'elettrone, ma non quelle del neutrino libero, **che ha una reattività praticamente nulla.**

Complessivamente la catena delle reazioni che si verificano è la seguente



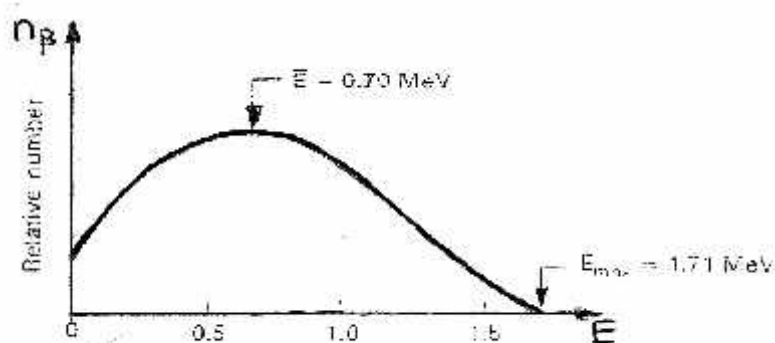
in definitiva si ha :



Secondo questa catena di eventi, al termine del processo **ci viene restituito integralmente** il surplus di energia  $\Delta E$  che abbiamo dovuto fornire durante la separazione del deutone per l'impossibilità di conservare la simmetria del sistema.

**L'esperienza dimostra che la ripartizione dell'energia tra il neutrino e l'elettrone non segue una regola rigorosa e dipende dal nucleo.**

Se riportiamo in ordinate il numero di eventi osservati e in ascisse **l'energia residua con la quale si allontana l'elettrone**, sperimentalmente si ottiene lo spettro continuo indicato in figura.



**Figura II-3: Spettro beta del fosforo-32**

La curva riportata è riferita al **fosforo 32**, ma in tutti gli altri casi si ottiene un andamento analogo.

Statisticamente il maggior numero di eventi si ha con un'energia variabile tra il **30%** e il **40%** del valore massimo  $E_{\max}$ .

In seguito nei calcoli verrà considerato sempre il valore massimo dell'energia senza considerare alcuna ripartizione.

A questo punto siamo in grado di capire per quale ragione un nucleo, che si presenta, apparentemente stabile, " improvvisamente " si divide, emettendo un raggio  $\beta$  e, utilizzando la configurazione dei livelli nucleari, sarà possibile seguire tutte le **transizioni** che portano dal nucleo iniziale a quello finale, più stabile, e calcolare **teoricamente l'energia associata alla particella** .

Prima di iniziare lo studio con esempi pratici, osserviamo come a conferma del modello nucleare che abbiamo ricavato, l'emissione  $\beta^-$  **NON E' MAI STATA VERIFICATA PER NUCLEI CHE ABBIANO  $N \leq Z$** , anche se in essi sono presenti neutroni.

Questo si verifica perchè essi **sono tutti polarizzati al centro e non sono presenti sulle orbite**.

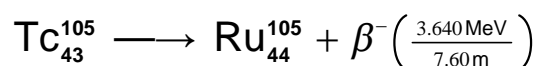
**Mancano dunque tutti i presupposti perchè possano decadere.**

Dato che nell'emissione  $\beta$  il numero di massa non cambia, per questo studio possiamo utilizzare **le tavole degli isobari**.

Consideriamo, per esempio,  $A = 105$ . Dalla :  $A = 2 \cdot Z + \left( \frac{Z}{8} - 1 \right)^{1.7}$

per il nucleo con la massima stabilità relativa si ricava :  $Z_0 = 46$ .

Per analizzare in dettaglio tutte le transizioni che accompagnano l'emissione, consideriamo il nucleo  $Tc_{43}^{105}$ , che decade secondo la reazione :



La composizione dei livelli risulta ( vedi il paragrafo P.320 ) :

$\frac{895.972}{896.14}$	$Tc_{43}^{105}$	$\frac{104.91184}{104.91166}$	<b>43n</b>	2+0	8+0	14+2	0+14	0+2	0+1	0+0	$\frac{3.640M}{\beta^- 7.60m}$
$\frac{899.360}{898.99}$	$Ru_{44}^{105}$	$\frac{104.90736}{104.90775}$	<b>44n</b>	2+0	8+0	14+2	1+14	1+0	1+1	0+0	$\frac{1.918M}{\beta^- 4.44h}$

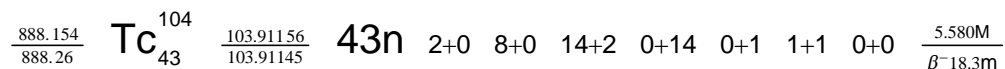
Dalle tavole degli isotopi, oppure dalla relazione  $A = 2 \cdot Z + \left( \frac{Z}{8} - 1 \right)^{1.7}$ ,

con  $Z_0 = 43$  si ricava per l'isotopo avente la massima stabilità  $A_0 = 98$  e quindi l'isotopo considerato, con  $A = 105$ , è instabile perchè ha un eccesso di deutoni in orbita, oppure, in modo del tutto equivalente, possiamo dire che, per sostenerli in equilibrio, è insufficiente lo spazio rotante generato da  $Z_0$  neutroni polarizzati al centro.

**La massima spinta verso una maggiore stabilità, e quindi l'evoluzione del nucleo, sarà diretta verso una riduzione dei deutoni in orbita con un contemporaneo aumento dei neutroni centrali.**

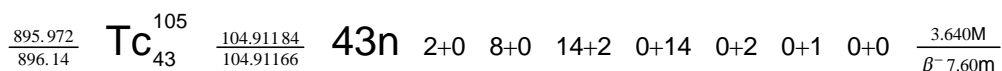
Vediamo quindi il dettaglio delle transizioni.

L'isotopo  $Tc_{43}^{105}$  si ottiene dal  $Tc_{43}^{104}$  che presenta la seguente configurazione dei livelli nucleari.



Quando l'isotopo  $Tc_{43}^{104}$  interagisce con un atomo di idrogeno esterno (cosa che si rende possibile grazie al valore elevato del raggio nucleare dell'ultima orbita  $R_{ZP_{SP}} = 0.66291 \cdot 10^{-11} m$ ) attraverso il protone presente **sull'ultima orbita**, si realizza la sintesi di un deutone e quindi il sesto livello diventa (0+2).

Essendo l'isotopo  $Tc_{43}^{105}$  più stabile, una transizione spontanea di un deutone dal sesto al quinto livello porta alla sintesi dell'isotopo  $Tc_{43}^{105}$ , come previsto dallo schema che abbiamo indicato.



L'energia emessa teoricamente dalla trasmutazione  $Tc_{43}^{104} \rightarrow Tc_{43}^{105}$  risulta :  
 – energia associata al neutrone acquisito dall'esterno sul sesto livello :

$$E_{n\infty/6} = E_0(43) \cdot \frac{1}{2 \cdot 6^2} = 2.9775 \text{ MeV}$$

**1692u**

– energia liberata dalla sintesi del deutone :  $E_D = 2.2246 \text{ MeV}$

– energia associata alla transizione del deutone dal livello 6 al 5 :

$$E_{D6/5} = E_0(43) \cdot \left( \frac{2}{2 \cdot 5^2} - \frac{2}{2 \cdot 6^2} \right) = 2.6202 \text{ MeV}$$

Complessivamente, l'aumento dell'energia di legame teorico vale :

$$\Delta E(104/105)_t = E_{n\infty/6} + E_D + E_{D6/5} = 7.8223 \text{ MeV}$$

Il valore sperimentale dell'energia di estrazione di un neutrone dall'isotopo

$Tc_{43}^{105}$  risulta :

$$\Delta E(104/105)_s = E_s(105) - E_s(104) = 7.86 \text{ MeV}$$

Tenendo conto che il valore teorico di  $E_0(1)$  non è stato ottimizzato, il valore teorico risulta in ottimo accordo con quello sperimentale.

Seguendo la regolare evoluzione verso una maggiore stabilità, un deutone si sposta dal livello 6 al livello 5 , liberando l'energia :

$$E_{D6/5} = E_0(43) \cdot \left( \frac{2}{2 \cdot 5^2} - \frac{2}{2 \cdot 6^2} \right) = 5.2404 \text{ MeV}$$

che risulta largamente sufficiente per scindere un deutone.

il nucleo assume quindi la configurazione :

$$\equiv Tc_{43}^{105} \equiv 43n \begin{matrix} 2+0 & 8+0 & 14+2 & 0+14 & 1+2+n & 0+0 & 0+0 & \frac{3.640M}{\beta^- 7.60m} \end{matrix}$$

Il protone rimane in orbita, mentre il neutrone si sposta al centro, liberando l'energia  $E_{n5/0}$  , calcolata come segue :

Il fattore di forma del nucleo prima della transizione del neutrone risulta :

$$\alpha(62) = 3 + \frac{28}{32} + \frac{6}{50} = 3.995$$

l'energia complessivamente liberata dalla transizione del neutrone dal livello p al centro vale :

1692v

$$E_{np/0} = E_{ZN}(Z+1; N-1) - E_{ZN}(Z; N)$$

con qualche semplice passaggio, si ricava :

$$E_{np/0} = [E_0(Z+1) - E_0(Z)] \cdot \alpha(N) - E_0(Z+1) \cdot \frac{1}{2 \cdot p^2}$$

Nel nostro caso abbiamo quindi :

$$E_{n5/0} = [E_0(44) - E_0(43)] \cdot \alpha(62) - E_0(44) \cdot \frac{1}{2 \cdot 5^2}$$

sostituendo i valori numerici, si ottiene :  $E_{n5/0} = 6.7629$  MeV .

La configurazione del nucleo, a questo punto, risulta :

$$\equiv Tc_{43}^{105} \equiv 44n_{2+0 \ 8+0 \ 14+2 \ 0+14 \ 1+2 \ 0+0 \ 0+0} \frac{3.640M}{\beta^{-7.60m}}$$

Dalla configurazione dei livelli nucleari vediamo che **si tratta di uno spazio rotante avente un nucleo centrale formato da 44 neutroni attivi, mentre in orbita abbiamo 43 particelle.**

E' l'analogo di quello che in chimica indichiamo come **ione** positivo e quindi presenta una forte tendenza ad acquisire un protone in orbita.

L'energia ancora disponibile risulta :

$$E_d = E_{D6/5} - E_D + E_{n5/0} = 9.7787 \text{ MeV}$$

Questa energia è sufficiente per scindere un deutone e spostare un altro dal quinto al sesto livello.

L'energia ancora disponibile, a questo punto, vale :

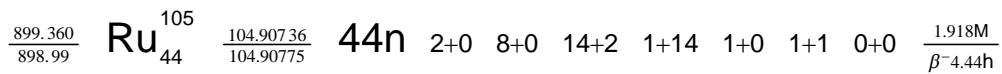
$$E = E_d - E_{D6/5} - E_D = 2.3137 \text{ MeV}$$

Il deutone che è stato diviso libera due protoni che si separano, trasferendosi uno sul sesto livello e l'altro sul quarto, liberando l'energia :

$$E_{p4/5/6} = E_0(44) \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot 4^2} - \frac{2}{2 \cdot 5^2} + \frac{1}{2 \cdot 6^2} \right) = 1.11596 \text{ MeV}$$

Il nucleo sintetizzato risulta, a questo punto :

**1692w**

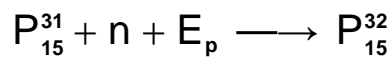


e la particella  $\beta^-$  che fuoriesce dal nucleo avrà quindi l'energia :

$$E_{\beta} = E + E_{p4/5/6} = 3.42966 \text{ MeV}$$

in buon accordo con il valore sperimentale di **3.640 MeV**.

Come secondo esempio consideriamo l'isotopo  $P_{15}^{32}$ , che viene sintetizzato senza transizioni interne e dunque si presenta come "**emettitore beta puro**". Esso può essere sintetizzato con la reazione endotermica seguente :



L'energia  $E_p$  che bisogna fornire per realizzarla si ricava utilizzando la tavola periodica degli isotopi, da cui si ricavano le seguenti configurazioni.



Si ottiene così :

– energia per portare un neutrone dall'esterno sul terzo livello  $E_{n\infty/3}$  :

$$E_{n\infty/3} = E_0(15) \cdot \frac{1}{2 \cdot 3^2} = 6.17 \text{ MeV}$$

– energia di sintesi del deutone  $E_D = 2.2246 \text{ MeV}$

$$E_n = E_{n\infty/3} + E_D = 8.3946 \text{ MeV}$$

In accordo accettabile con il valore sperimentale dell'energia di estrazione di un neutrone dall'isotopo  $P_{15}^{32}$ , che risulta di **7.936 MeV**.

Dalla relazione che fornisce l'isotopo con la massima stabilità, si ricava :

$$A_0 = 2 \cdot Z + \left( \frac{Z}{8} - 1 \right)^{1.7} = 2 \cdot 15 + \left( \frac{15}{8} - 1 \right)^{1.7} = 30.797 \rightarrow 31$$

**1692x**

Dunque l'isotopo  $P_{15}^{32}$  presenta un neutrone in eccesso, ovvero un difetto di neutroni attivi nel nucleo centrale.

Spontaneamente realizza quindi le trasformazioni che portano all'emissione di una particella  $\beta^-$ , producendo il nucleo  $S_{16}^{32}$ .

Dalle tavole degli isobari (P. 247), si ricavano le configurazioni dei livelli :

$$\begin{array}{l} \frac{269.745}{270.85} \quad P_{15}^{32} \quad \frac{31.97510}{31.973907} \quad 15n \quad 2+0 \quad 8+0 \quad 3+2 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad \frac{1.71066M}{\beta^-14.262d} \\ \frac{270.886}{271.78} \quad S_{16}^{32} \quad \frac{31.97303}{31.972071} \quad 16n \quad 2+0 \quad 8+0 \quad 6+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad \frac{st}{94.99\%} \end{array}$$

Un protone si sposta dal terzo livello al secondo, liberando l'energia :

$$E_{D3/2} = E_0(15) \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot 2^2} - \frac{1}{2 \cdot 3^2} \right) = 7.7125 \text{ MeV}$$

E' un valore di energia molto elevato che scinde il deutone, inviando il protone sul terzo livello e il neutrone al centro, per aumentare lo spazio rotante.

Prima della transizione del neutrone al centro, la configurazione del nucleo è la seguente.

$$\frac{\_}{\_} P_{15}^{32} \frac{\_}{\_} 15n \quad 2+0 \quad 9+0 \quad 3+1+n \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad \frac{1.71066M}{\beta^-14.262d}$$

con un fattore di forma :

$$\alpha(17) = 1 + \frac{9}{8} + \frac{6}{18} = 2.458333$$

l'energia liberata dalla migrazione del neutrone al centro sarà :

$$E_{n3/0} = [E_0(16) - E_0(15)] \cdot \alpha(17) - E_0(16) \cdot \frac{1}{2 \cdot 3^2} = 5.91597 \text{ MeV}$$

A questo punto il nucleo sintetizzato risulta il seguente

$$\frac{\_}{\_} P_{15}^{32} \frac{\_}{\_} 16n \quad 2+0 \quad 9+0 \quad 3+1 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad \frac{1.71066M}{\beta^-14.262d}$$

**1692y**

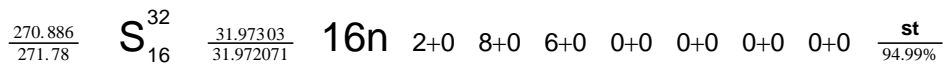
e l'energia ancora disponibile risulta :

$$E_d = E_{p3/2} - E_D + E_{n3/0} = 11.4076 \text{ MeV}$$

Questo nucleo presenta però il secondo livello sovrassaturo e quindi parte di questa energia viene utilizzata per spostare un protone dal secondo al terzo livello e con quella che rimane scinde il deutone presente sul terzo livello.

Dalla scissione si hanno due protoni che si fermano sulla stessa orbita e un neutrone che viene emesso come particella  $\beta^-$ .

La configurazione finale del nucleo risulta, a questo punto, la seguente

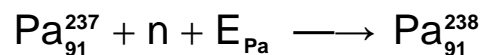


e l'energia associata alla particella emessa :

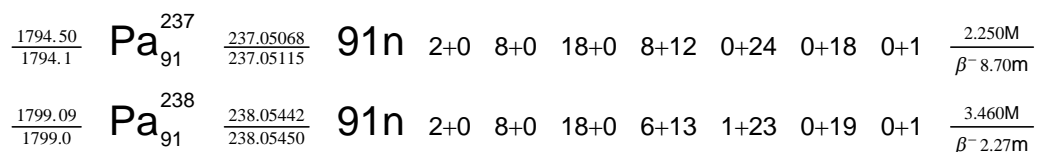
$$E_\beta = E_d - E_{p2/3} - E_D = 1.4705 \text{ MeV}$$

in discreto accordo con il valore sperimentale uguale a **1.71066 MeV**.

Come ultimo esempio, consideriamo il nucleo pesante  $\text{Pa}_{91}^{238}$ , il quale si può ottenere con l'assorbimento di un neutrone da parte del  $\text{Pa}_{91}^{237}$ , ricorrendo alla reazione endotermica :



Dalla tavola periodica degli isotopi si ricavano le seguenti configurazioni dei livelli nucleari.



– l'acquisizione di un neutrone e sintesi di un deutone sul quarto livello libera l'energia :

$$E_{n4} = E_0(91) \cdot \frac{1}{2 \cdot 4^2} + 2.2246 \text{ MeV} = 11.7615 \text{ MeV}$$

– la transizione di un protone dal quarto al quinto livello assorbe l'energia :



$$E_{p4/5} = E_{0(91)} \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot 4^2} - \frac{1}{2 \cdot 5^2} \right) = 3.4333 \text{ MeV}$$

– transizione di un deutone dal quinto al sesto livello assorbe :

$$E_{D5/6} = E_{0(91)} \cdot \left( \frac{2}{2 \cdot 5^2} - \frac{2}{2 \cdot 6^2} \right) = 3.7300 \text{ MeV}$$

La trasmutazione  $\text{Pa}_{91}^{237} \rightarrow \text{Pa}_{91}^{238}$  libera dunque l'energia :

$$E_{\text{Pa}} = E_{n4} - E_{p4/5} - E_{D5/6} = 4.5982 \text{ MeV}$$

In ottimo accordo con il valore teorico con il valore dell'energia di estrazione di un neutrone dall'isotopo  $\text{Pa}_{91}^{238}$  che risulta uguale a **4.705 MeV**.

Si noti lo scorrimento delle particelle verso la periferia del nucleo, **associato alla riduzione della stabilità**.

L'isotopo avente la massima stabilità risulta :

$$A_0 = 2 \cdot Z + \left( \frac{Z}{8} - 1 \right)^{1.7} = 2 \cdot 91 + \left( \frac{91}{8} - 1 \right)^{1.7} = 235.36 \rightarrow 235$$

Dunque l'isotopo  $\text{Pa}_{91}^{238}$  presenta un eccesso di deutoni in orbita, ovvero un difetto di neutroni centrali attivi. Emetterà quindi un  $\beta^-$ , diventando  $\text{U}_{92}^{238}$ , che presenta la seguente configurazione nucleare.

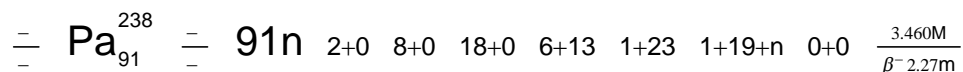
$\frac{1799.09}{1799.0}$	$\text{Pa}_{91}^{238}$	$\frac{238.05442}{238.05450}$	<b>91n</b>	2+0	8+0	18+0	6+13	1+23	0+19	0+1	$\frac{3.460\text{M}}{\beta^- 2.27\text{m}}$
$\frac{1801.83}{1801.7}$	$\text{U}_{92}^{238}$	$\frac{238.05143}{238.050788}$	<b>92n</b>	2+0	8+0	18+0	8+12	1+24	0+18	1+0	$\frac{4.270\text{M}}{\alpha 4.468 \cdot 10^9 \text{a}}$ 99.2742%

Con il normale processo di evoluzione verso una configurazione più stabile, il deutone presente sul settimo livello scorre **spontaneamente** verso l'interno, sul sesto, liberando l'energia :

**1692z1**

$$E_{D7/6} = E_{0(91)} \cdot \left( \frac{2}{2 \cdot 6^2} - \frac{2}{2 \cdot 7^2} \right) = 2.249059 \text{ MeV}$$

Questa energia è sufficiente per scindere uno dei deutoni presenti.  
Il nucleo formato a questo punto è il seguente :



con fattore di forma :

$$\alpha(147) = 4 + \frac{47}{50} + \frac{40}{72} = 5.495555$$

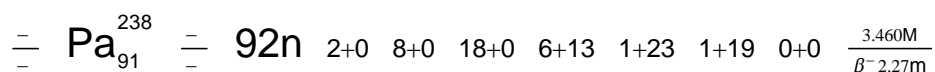
il neutrone presente sul sesto livello si sposta al centro e libera l'energia :

$$E_{n6/0} = [E_0(92) - E_0(91)] \cdot \alpha(147) - E_0(92) \cdot \frac{1}{2 \cdot 6^2} = 2.28457 \text{ MeV}$$

a spostamento avvenuto l'energia ancora disponibile risulta :

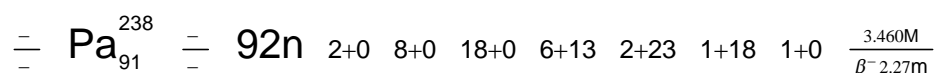
$$E_d = E_{D7/6} - E_D + E_{n6/0} = 2.30903 \text{ MeV}$$

il nucleo sintetizzato si presenta ora con la seguente configurazione.



Questo nucleo presenta al centro 92 neutroni attivi, mentre in orbita abbiamo solo 91 particelle.

L'energia disponibile è sufficiente per dividere un deutone presente sul sesto livello, liberando due protoni e un elettrone. Un protone si sposta all'interno sul quinto livello e il neutrone sul settimo, dove si scinde liberando un protone e una particella  $\beta^-$ . La configurazione del nucleo diventa quindi :



Le transizioni dei protoni forniscono l'energia :

**1692z2**

$$E_{p5/6/7} = E_0(92) \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot 5^2} - \frac{2}{2 \cdot 6^2} + \frac{1}{2 \cdot 7^2} \right) = 0.743347 \text{ MeV}$$

Per le ragioni di stabilità viste trattando la teoria generale, i due protoni che si trovano sul quinto livello si scambiano con un deutone presente sul quarto e il protone presente sul sesto livello si sposta sul quinto, liberando l'energia :

$$E_{p6/5} = E_0(92) \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot 5^2} - \frac{1}{2 \cdot 6^2} \right) = 1.87226 \text{ MeV}$$

La configurazione del nucleo è così diventata :

$$\frac{1801.83}{1801.7} U_{92}^{238} \quad \frac{238.05043}{238.050788} \quad 92n \quad 2+0 \quad 8+0 \quad 18+0 \quad 8+12 \quad 1+24 \quad 0+18 \quad 1+0 \quad \frac{4.270M}{\alpha \ 4.468 \cdot 10^{-9} a} \quad 99.2742\%$$

e l'energia disponibile, che viene emessa con la particella  $\beta^-$  risulta :

$$E_{\beta} = E_d - E_D + E_{p5/6/7} + E_{p6/5} = 2.70004 \text{ MeV}$$

Il valore sperimentale risulta uguale a 3.460 MeV.

Abbiamo finora esaminato nuclei in cui l'eccesso di deutoni in orbita e/o una carenza di neutroni centrali attivi vengono ridotti, con aumento della stabilità, durante la loro normale evoluzione, con i seguenti passaggi caratteristici.

- Transizione verso il centro dello spazio rotante di una particella, che libera l'energia necessaria per scindere un deutone presente in orbita.
- Transizione **spontanea** del neutrone liberato nel nucleo attivo, **liberando energia**. Questo passaggio crea un nucleo squilibrato, **con un neutrone in eccesso al centro**, rispetto alle particelle in orbita.
- Ripristino dell'equilibrio con la scissione di un altro deutone orbitante, **che libera due protoni**, necessari per equilibrare il nucleo attivo centrale, **e un elettrone negativo**.
- Assestamento del nucleo con spostamenti dei protoni generati in modo da assumere la configurazione di massima stabilità.
- Espulsione dell'elettrone dal nucleo, come particella  $\beta^-$ , **con il residuo di energia**.

1692z3

Questa sintesi dimostra come il processo di emissione  $\beta^-$  sia, in realtà ben più complesso della semplice scissione di un neutrone nucleare.

La fase di assestamento è quasi sempre presente.

**Tuttavia, quando il nucleo di partenza è già prossimo alla stabilità**, i due protoni generati dalla scissione si fermano sulla stessa orbita e questa fase non si verifica.

Si hanno in questi casi gli emettitori beta puri, indicati nella tabella seguente.

<b>TABELLA II-1: emettitori beta puri</b>		
<b>Isotopo</b>	<b>Max Energia del Beta</b>	<b>Emivita</b>
H-3	18.61 keV	12.33 y
C-14	158.1 keV	5730 y
Si-32	213 keV	132 y
P-32	1.711 MeV	14.26 d
P-33	249 keV	25.34 d
S-35	167 keV	87.2 d
Cl-36	708.7 keV	$3.01 \cdot 10^5$ y
Ar-39	565 keV	269 y
Ar-42	600 keV	32.9 y
Ni-63	66.95 keV	100,1 y
Ni-66	230 keV	54.6 h
Sr-90	546 keV	28.79 y
Zr-98	2.25 MeV	30.7 s
Ru-106	39.4 keV	373.6 d
Cd-118	520 keV	50.3 min
Tl-204	763.4 keV	3.779 y
Pb-209	644.6 keV	3.253 h

**Condizione necessaria** (ma non sufficiente) perchè l'emissione  $\beta^-$  sia

**realizzabile è la presenza di deutoni in orbita e quindi :  $N \geq Z$**

**Dove  $Z$  indica il numero di particelle in orbita ed  $N$  il numero totale di neutroni, attivi + passivi.**

Se consideriamo i nuclei che presentano  $N \leq Z$  tutti i neutroni sono attivi e collocati al centro.

Possiamo quindi dire che essi presentano un eccesso di protoni in orbita, ma anche un difetto di neutroni attivi e quindi non sono presenti deutoni orbitanti.

Per poter capire il comportamento di questi nuclei, dobbiamo **abbandonare il concetto di elemento chimico definito dal numero dei protoni  $Z$** , che formano il nucleo centrale.

Nel caso del nucleo atomico i neutroni polarizzati al centro, attivi, "**generano lo spazio rotante nucleare**", assumendo un ruolo assolutamente identico a quello che abbiamo assegnato al nucleo dell'atomo in chimica.

Gli  $Z$  protoni o deutoni **in orbita nello spazio rotante nucleare** occupano, con i pochi adattamenti che vedremo in seguito, la posizione degli elettroni in orbita nella parte periferica dell'atomo.

Del resto, abbiamo già visto come, **variando il numero  $Z$  delle particelle in orbita, lo spazio rotante nucleare non cambia.**

Sinteticamente possiamo dire che :

**Il numero dei neutroni centrali,  $N_a$  definisce " l'elemento nucleare " che non cambia variando le particelle in orbita.**

**Fissato l'elemento nucleare, il suo comportamento nei confronti dello spazio o degli altri nuclei è definito dalle particelle in orbita, soprattutto quelle dislocate sui livelli periferici, variando le quali cambia il " grado di ionizzazione ".**

Secondo questa visione i nuclei aventi  $N_a \leq Z$  si comporteranno come gli atomi ionizzati negativamente con un numero di elettroni orbitanti in eccesso. Come in questo caso, anche nei nuclei, i protoni in eccesso vengono sempre dislocati sulle orbite periferiche.

Su queste orbite gli scambi sono molto più probabili e dipendono fortemente

dall'energia di legame specifica, data dalla relazione :  $E_{1P_sP} = \frac{E_0(Z)}{2 \cdot p_s^2}$ .

E' chiaro che, se il protone in eccesso è debolmente legato, sarà sufficiente un modesto apporto di energia per estrarlo e quindi il nucleo avrà, in questo caso la tendenza a perdere il protone più periferico, riducendo  $Z$  di una unità con conseguente aumento della stabilità.

Talvolta, se sull'orbita periferica sono presenti più protoni, **possono esserne emessi anche due.**

L'espressione della  $E_{1P_sP}$  mette chiaramente in evidenza come le condizioni che abbiamo indicato siano realizzabili solo nei nuclei instabili leggeri.

Se, per esempio, consideriamo nuclei con un eccesso di **4** protoni, si hanno le seguenti configurazioni nucleari.

$\frac{E_c(\text{MeV})}{E_s(\text{MeV})}$	Sa	$\frac{m_c}{m_s}$	n	1	2	3	4	5	6	7	$\frac{E_\alpha(\text{eV})}{T_{1/2}}$
$\frac{0.90781}{0.91307}$	$B_{\frac{5}{1}}^6$	$\frac{6.04681}{6.04681}$	$\frac{5}{1n}$	0+0	0+0	0+0	0+0	0+0	0+0	5+0	$\frac{-}{2p}$
$\frac{24.571}{24.783}$	$C_{\frac{6}{2}}^8$	$\frac{8.03790}{8.037675}$	$\frac{6}{2n}$	1+0	2+0	2+0	2+0	0+0	0+0	1+0	$\frac{-}{p}$
$\frac{36.266}{36.440}$	$N_{\frac{7}{3}}^{10}$	$\frac{10.04184}{10.04165}$	$\frac{7}{3n}$	1+0	3+0	1+0	1+0	0+0	1+0	0+0	$\frac{-}{p}$
$\frac{58.715}{58.549}$	$O_{\frac{8}{4}}^{12}$	$\frac{12.03423}{12.034405}$	$\frac{8}{4n}$	2+0	1+0	2+0	1+0	1+0	1+0	0+0	$\frac{-}{p}$

L' energia di legame del protone in orbita sul livello **7** dell'isotopo  $B_{\frac{5}{1}}^6$  vale :

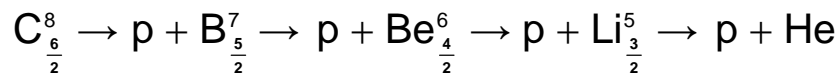
$$E_{1B7} = E_0(1) \cdot \frac{1}{2 \cdot 7^2} = 17.793 \text{ MeV} \cdot \frac{1}{98} = 181 \text{ KeV}$$

Per l'isotopo  $C_{\frac{6}{2}}^8$  si ricava :  $E_{1B7} = 28.306 \text{ MeV} \cdot \frac{1}{98} = 289 \text{ KeV}$

Si tratta di valori molto bassi che consentono ai protoni di sfuggire con molta

facilità. Nel caso del  $B_{\frac{5}{1}}^6$  si ha addirittura una buona probabilità di emissione simultanea di due protoni.

Per il carbonio si realizza la seguente catena di reazioni :



Se l'energia di legame del protone, pur essendo bassa, risulta sufficiente per restare stabilmente sull'orbita, l'espulsione non è possibile.

In queste condizioni, una via alternativa, per l'evoluzione del nucleo verso una maggiore stabilità, è la **cattura di un elettrone, generalmente dal livello K, oppure la sintesi di un deutone**, realizzata attraverso l'interazione con un atomo di idrogeno.

Essendo però nuclei aventi un basso numero di neutroni attivi, il raggio della orbita di confine ha un valore molto ridotto e questo **riduce praticamente a zero la probabilità** che la cattura possa realizzarsi.

Per concludere, osserviamo che questi processi **nei nuclei leggeri**, portano, con poche emissioni, alla **saturatione** dei livelli **con  $N = Z$** , quindi senza possibilità di ulteriori aumenti della stabilità, che richiederebbe lo scorrimento di particelle verso l'interno, impedito dalla sovraturazione dei livelli. Gli eventi improvvisi che abbiamo descritto non sono dunque più possibili.

E' per questa ragione che, come dimostrano le **tavole dei nuclei isodiaferi**, I nuclei leggeri, che hanno  $I = 0$ , **sono praticamente sempre stabili. Ciò è dovuto però non a valori di forze nucleari particolarmente elevate, ma al fatto che è chiusa la via per il decadimento.**

Nei nuclei aventi  $N \leq Z$ , quando l'emissione di protoni ha bassa probabilità di realizzarsi, il protone si sposta spontaneamente da un'orbita periferica su una più interna con emissione di un fotone  $\gamma$  di energia uguale alla differenza tra i valori associati al livello di arrivo e di partenza.

Se il valore di energia è sufficiente e il fotone riesce ad intercettare la prima orbita dello spazio rotante di uno dei protoni presenti nel nucleo, **si genera una coppia elettrone – positrone**, con il meccanismo che è stato descritto.

L'elettrone positivo esce dal nucleo come particella  $\beta^+$ , mentre l'elettrone  $e^-$  viene catturato da un protone, **per sintetizzare un neutrone**.

Il neutrone così sintetizzato si trasferisce al centro per incrementare lo spazio rotante nucleare, e quindi la stabilità del nucleo.

Per esemplificare quanto abbiamo detto, consideriamo qualche esempio .

$$\begin{array}{l} \frac{75.999}{76.205} \quad B_5^{11} \quad \frac{11.009526}{11.009305} \quad 5n \quad 2+0 \quad 1+1 \quad 0+0 \quad 1+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad \frac{st}{80.1\%} \\ \frac{73.780}{73.440} \quad C_{\frac{6}{5}}^{11} \quad \frac{11.01107}{11.011434} \quad \frac{6}{5n} \quad 2+0 \quad 3+0 \quad 0+0 \quad 1+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad \frac{960.49K}{\beta^+20.334m} \end{array}$$

Dalla configurazione dei livelli nucleari dell'isotopo  $C_{\frac{6}{5}}^{11}$ , vediamo che se il protone periferico si sposta dal quarto al secondo livello, libera un fotone di energia :

$$E_{p4/2} = E_0(5) \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot 2^2} - \frac{1}{2 \cdot 4^2} \right) = 4.91869 \text{ MeV}$$

se questo fotone incide su un protone presente sul secondo livello, spende la energia  $E_{2e} = 1.022 \text{ MeV}$  e genera una coppia di elettroni.

L'elettrone negativo, spendendo l'energia  $E_n = 0.782291 \text{ MeV}$ , sintetizza un neutrone, che si lega a un protone presente sull'orbita e sintetizza un deutone.

Quest'ultimo ferma sulla stessa orbita e libera l'energia  $E_D = 2.2246 \text{ MeV}$ .

A questo punto il nucleo ha acquisito la configurazione :

$$\equiv C_{\frac{6}{5}}^{11} \equiv \frac{6}{5n} \quad 2+0 \quad 2+1 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad \frac{960.49K}{\beta^+20.334m}$$

con energia ancora disponibile :

$$E_d = E_{p4/2} - E_n - \frac{1}{2} \cdot E_{2e} + E_D = 5.85 \text{ MeV}$$

parte di questa energia viene assorbita da un protone, che si trasferisce dal livello 2 al livello 4.

L'energia assorbita vale  $E_{p2/4} = 4.91869 \text{ MeV}$ .

L'energia con la quale viene emessa la particella  $\beta^+$  risulta quindi :

**1692z8**



$$E_{\beta} = E_d - E_{p2/4} = 931.31 \text{ KeV}$$

in ottimo accordo con il valore sperimentale, uguale a **960.49 KeV**.  
la configurazione dei livelli del nucleo sintetizzato risulta :

$$\frac{75.999}{76.205} \quad B_5^{11} \quad \frac{11.009526}{11.009305} \quad 5n \quad 2+0 \quad 1+1 \quad 0+0 \quad 1+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad \frac{st}{80.1\%}$$

Come secondo esempio consideriamo la trasmutazione  $O_{\frac{8}{5}}^{13} \rightarrow N_{\frac{7}{6}}^{13}$

$$\frac{92.346}{94.105} \quad N_{\frac{7}{6}}^{13} \quad \frac{13.00762}{13.005739} \quad \frac{7}{6n} \quad 2+0 \quad 4+0 \quad 1+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad \frac{1.1985M}{\beta^+9.965m}$$

$$\frac{75.966}{75.556} \quad O_{\frac{8}{5}}^{13} \quad \frac{13.02437}{13.024812} \quad \frac{8}{5n} \quad 2+0 \quad 2+0 \quad 3+0 \quad 1+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad \frac{16.747M}{\beta^+8.58ms}$$

un protone si trasferisce dal quarto al secondo livello, liberando l'energia :

$$E_{p4/2} = E_0(5) \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot 2^2} - \frac{1}{2 \cdot 4^2} \right) = 4.91869 \text{ MeV}$$

Spendendo l'energia  $E_{2e} = 1.022 \text{ MeV}$  , genera la coppia  $e^+/e^-$ .

L'elettrone  $e^-$  spende l'energia  $E_n = 0.782291 \text{ MeV}$  e genera un neutrone, che si trasferisce al centro, incrementando di una unità il numero di neutroni attivi e quindi lo spazio rotante nucleare generato. A questo punto il nucleo ha la configurazione :

$$\equiv O_{\frac{8}{5}}^{13} \equiv \frac{8}{5n} \quad 2+0 \quad 2+n \quad 3+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad \frac{16.747M}{\beta^+8.58ms}$$

il fattore di forma vale :

$$\alpha(8) = 1 + \frac{3}{8} + \frac{3}{18} = 1.541667$$

L'energia liberata dalla transizione del neutrone vale :

$$E_{n3/0} = [E_0(6) - E_0(5)] \cdot \alpha(8) - E_0(6) \cdot \frac{1}{2 \cdot 2^2} = 3.215333 \text{ MeV}$$

L'aumento dello spazio rotante nucleare genera lo scorrimento di due protoni dal terzo al secondo livello, con liberazione dell'energia :

**1692z9**

$$E_{2p3/2} = E_0(6) \cdot \left( \frac{2}{2 \cdot 2^2} - \frac{2}{2 \cdot 3^2} \right) = 8.24514 \text{ MeV}$$

Il nucleo sintetizzato risulta :



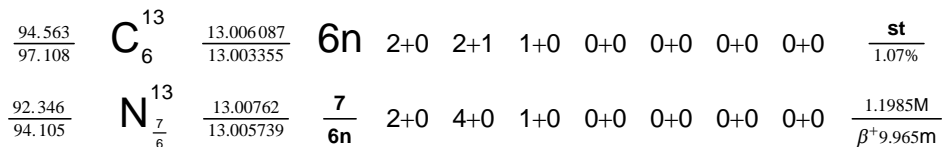
e l'energia della particella  $\beta^+$  emessa sarà :

$$E_{\beta} = E_{p4/3} - \frac{1}{2} \cdot E_{2e} - E_n + E_{n3/0} + E_{2p3/2} = 15.08587 \text{ MeV}$$

Il valore sperimentale risulta **16.747 MeV**.

L'accordo tra i due valori non è eccezionale, **non è però dovuto al metodo**, ma al fatto che non abbiamo ottimizzato il valore  $E_0(1)$  che è stato utilizzato per il calcolo di  $E_0(Z)$ .

Consideriamo ora la trasmutazione  $\text{N}_{\frac{7}{6}}^{13} \rightarrow \text{C}_6^{13}$



Un protone passa spontaneamente dal terzo al secondo livello, emettendo la

energia :

$$E_{p3/2} = \frac{1}{2} \cdot E_{2p3/2} = 4.12257 \text{ MeV}$$

Sul secondo livello viene materializzata una coppia e sintetizzato un neutrone che, con un protone presente sull'orbita, sintetizza un deutone che si ferma sul secondo livello.

L'energia disponibile, a questo punto, risulta :

$$E_d = E_{p3/2} - E_n - \frac{1}{2} \cdot E_{2e} + E_D = 5.05388 \text{ MeV}$$

un protone assorbe l'energia  $E_{p2/3}$  per trasferirsi dal secondo al terzo livello.

Il nucleo formato risulta :

**1692z10**

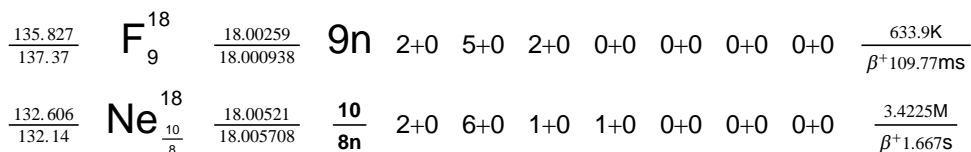


e l'energia della particella  $\beta^+$  emessa :

$$E_{\beta} = E_d - E_{p2/3} = 0.93131 \text{ MeV}$$

il valore sperimentale risulta uguale a **1.1985 MeV**.

Consideriamo ora la trasmutazione  $\text{Ne}_{10}^{18} \rightarrow \text{F}_9^{18}$

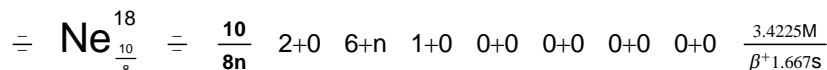


Il protone presente sul quarto livello scorre sul secondo, liberando l'energia :

$$E_{p4/2} = E_0(8) \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot 2^2} - \frac{1}{2 \cdot 4^2} \right) = 6.76819 \text{ MeV}$$

sufficiente per generare una coppia e sintetizzare un neutrone, che si sposta al centro.

Prima del trasferimento del neutrone la configurazione dei livelli del nucleo è la seguente.



il fattore di forma vale :

$$\alpha(10) = 1 + \frac{7}{8} + \frac{1}{18} = 1.930555$$

L'energia liberata dalla transizione del neutrone vale :

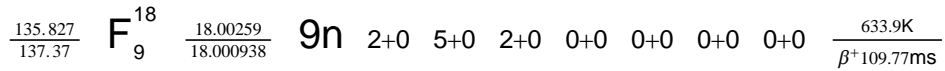
$$E_{n2/0} = [E_0(9) - E_0(8)] \cdot \alpha(10) - E_0(9) \cdot \frac{1}{2 \cdot 2^2} = 1.884916 \text{ MeV}$$

un protone si sposta dal secondo al terzo livello, assorbendo l'energia :

$$E_{p2/3} = E_0(9) \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot 2^2} - \frac{1}{2 \cdot 3^2} \right) = 5.433055 \text{ MeV}$$

**1692z11**

La configurazione del nucleo finale risulta :

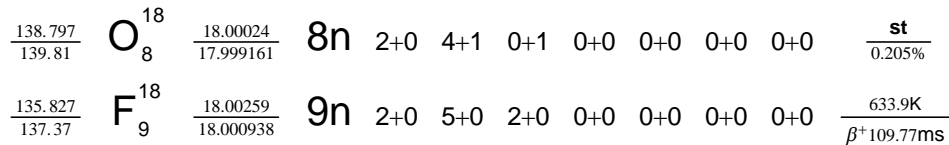


e l'energia della particella  $\beta^+$  emessa sarà :

$$E_{\beta} = E_{p4/2} - \frac{1}{2} \cdot E_{2e} - E_n + E_{n2/0} - E_{p2/3} = 1.92676 \text{ MeV}$$

Il valore sperimentale risulta uguale a 3.4225 MeV.

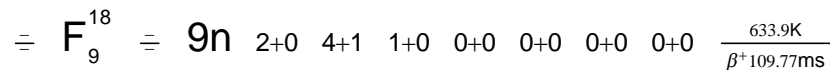
Vediamo ora la transizione  $\text{F}_9^{18} \rightarrow \text{O}_8^{18}$



un protone si sposta dal terzo al secondo livello, liberando l'energia :

$$E_{p3/2} = E_0(9) \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot 2^2} - \frac{1}{2 \cdot 3^2} \right) = 5.433055 \text{ MeV}$$

si genera una coppia e quindi un neutrone che sintetizza un deutone, con uno dei protoni presenti. Il nucleo diventa :



con fattore di forma :

$$\alpha(9) = 1 + \frac{6}{8} + \frac{1}{18} = 1.805555$$

Abbiamo così un nucleo squilibrato, con 9 neutroni attivi centrali e 8 particelle sulle orbite.

Un neutrone si sposta dal centro sul terzo livello, assorbendo l'energia :

$$E_{n0/3} = \left[ E_0(9) - E_0(8) \right] \cdot \alpha(9) - E_0(8) \cdot \frac{1}{2 \cdot 2^2} = 1.88492 \text{ MeV}$$

con il protone presente sul terzo livello sintetizza un deutone.

**1692z12**

Il nucleo così ottenuto ha la configurazione :

$$\equiv \text{O}_8^{18} \equiv 8n \begin{matrix} 2+0 & 3+2 & 1+0 & 0+0 & 0+0 & 0+0 & 0+0 & 0+0 \end{matrix} \frac{\text{st}}{0.205\%}$$

L'energia disponibile risulta, a questo punto :

$$E_d = E_{p3/2} - \frac{1}{2} \cdot E_{2e} - E_n + E_D - E_{n0/2} + E_D = 6.704044 \text{ MeV}$$

Con parte di questa energia un deutone passa dal livello **2** al **3** ed il protone dal **3** al **2**. L'energia assorbita complessivamente vale :

$$E_{1-2/3} = E_0(8) \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot 2^2} - \frac{1}{2 \cdot 3^2} \right) = 5.01347 \text{ MeV}$$

La configurazione del nucleo, a questo punto, risulta :

$$\frac{138.797}{139.81} \text{O}_8^{18} \frac{18.00024}{17.999161} 8n \begin{matrix} 2+0 & 4+1 & 0+1 & 0+0 & 0+0 & 0+0 & 0+0 & 0+0 \end{matrix} \frac{\text{st}}{0.205\%}$$

L'energia associata alla particella  $\beta^+$  emessa vale :

$$E_\beta = E_d - E_{1-2/3} = 1.69057 \text{ MeV}$$

Il valore sperimentale risulta invece uguale a **633.9 keV**.

Consideriamo ancora la trasmutazione  $\text{Ca}_{\frac{20}{18}}^{38} \rightarrow \text{K}_{\frac{19}{18}}^{38}$

$$\frac{321.207}{320.65} \text{K}_{19}^{38} \frac{37.96848}{37.969081} 19n \begin{matrix} 2+0 & 8+0 & 8+0 & 0+0 & 1+0 & 0+0 & 0+0 \end{matrix} \frac{4.89206M}{\beta^+ 7.636m}$$

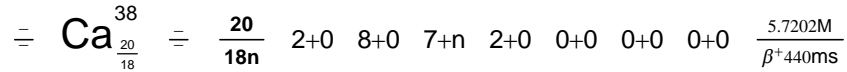
$$\frac{312.383}{313.12} \text{Ca}_{\frac{20}{18}}^{38} \frac{37.97711}{37.97632} \frac{20}{18n} \begin{matrix} 2+0 & 8+0 & 7+0 & 3+0 & 0+0 & 0+0 & 0+0 \end{matrix} \frac{5.7202M}{\beta^+ 440ms}$$

Un protone si sposta dal quarto al terzo livello, liberando l'energia :

$$E_{p4/3} = E_0(18) \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot 3^2} - \frac{1}{2 \cdot 4^2} \right) = 3.05837 \text{ MeV}$$

Sulla terza orbita viene generata una coppia e sintetizzato un neutrone che si sposta spontaneamente al centro.

Prima dello spostamento del neutrone la configurazione del nucleo è :



il fattore di forma vale :

$$\alpha(9) = 2 + \frac{8}{18} + \frac{2}{32} = 2.506944$$

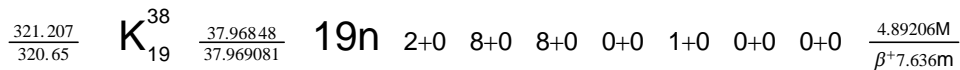
l'energia liberata :

$$E_{n3/0} = [E_0(19) - E_0(18)] \cdot \alpha(9) - E_0(19) \cdot \frac{1}{2 \cdot 3^2} = 4.06521 \text{ MeV}$$

A questo punto i due protoni presenti sul quarto livello si spostano, uno sul **5** e l'altro sul **3**, liberando complessivamente l'energia :

$$E_{p3/4/5} = E_0(19) \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot 3^2} - \frac{2}{2 \cdot 4^2} + \frac{1}{2 \cdot 5^2} \right) = 1.701665 \text{ MeV}$$

Il nucleo assume così la configurazione :



e l'energia associata alla particella  $\beta^+$  emessa sarà :

$$E_{\beta} = E_{p4/3} - \frac{1}{2} \cdot E_{2e} - E_n + E_{n3/0} + E_{p3/4/5} = 7.53195 \text{ MeV}$$

il valore sperimentale è uguale a **5.7202 MeV**

Come ultimo esempio consideriamo la trasmutazione  $\text{K}_{19}^{38} \rightarrow \text{Ar}_{18}^{38}$



Il protone presente sul quinto livello si sposta sul terzo, liberando l'energia :

**1692z14**

$$E_{p5/3} = E_0(19) \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot 3^2} - \frac{1}{2 \cdot 5^2} \right) = 4.634311 \text{ MeV}$$

Con questa energia viene generata una coppia e sintetizzato un neutrone che con uno dei protoni presenti sull'orbita forma un deutone e si ha la seguente composizione dei livelli

$$\doteq K_{19}^{38} \doteq 19n \quad 2+0 \quad 8+0 \quad 7+1 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad \frac{4.89206M}{\beta^{+7.636m}}$$

Il nucleo formato ha così una configurazione squilibrata, con **19** neutroni

attivi

e **18** particelle in orbita. Per ripristinare l'equilibrio, un neutrone si trasferisce **dal centro al terzo livello**, dove sintetizza un deutone.

Il fattore di forma del nucleo prima del trasferimento vale :

$$\alpha(19) = 2 + \frac{9}{18} = 2.5$$

L'energia assorbita dal neutrone che si sposta vale :

$$E_{n0/3} = [E_0(19) - E_0(18)] \cdot \alpha(9) - E_0(18) \cdot \frac{1}{2 \cdot 3^2} = 4.28444 \text{ MeV}$$

Il neutrone sul livello **3**, sintetizza un deutone con uno dei protoni presenti e il nucleo diventa quindi :

$$\frac{325.993}{327.34} \text{ Ar}_{18}^{38} \frac{37.96418}{37.962732} 18n \quad 2+0 \quad 8+0 \quad 6+2 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad \frac{st}{0.0632\%}$$

e l'energia associata alla particella  $\beta^+$  emessa sarà :

$$E_{\beta} = E_{p5/3} - \frac{1}{2} \cdot E_{2e} - E_n + E_D - E_{n0/3} + E_D = 3.50578 \text{ MeV}$$

sperimentalmente si ottiene il valore **4.89206 MeV**.

Concludiamo mettendo in evidenza che il decadimento  $\beta$  non è prodotto da una semplice scissione, ma da una serie complessa di transizioni spontanee diverse da un nucleo all'altro.

Nell'emissione  $\beta^+$  non si ha nemmeno una scissione, ma una generazione di coppie di elettroni positivi e negativi.

**1692z15**