

– **Teoria dell'emissione  $\alpha$  e calcolo teorico dell'energia associata alla particella emessa**

Abbiamo visto che il decadimento del nucleo atomico comporta sempre uno scambio di neutroni fra il nucleo attivo centrale e le orbite.

E' chiaro dunque che la trasmutazione considerata, si potrà realizzare più o meno facilmente in rapporto al fatto che **lo scambio del neutrone richiede oppure sviluppi energia.**

Cerchiamo dunque il limite di separazione tra le due condizioni.

Dato il nucleo  $A(Z; N)$ , l'energia che viene "assorbita" dal neutrone per trasferirsi dal centro al livello  $p$  vale :

$$E_{n0/p} = E_0(Z) \cdot \alpha(N) - E_0(Z-1) \cdot \alpha(N+1)$$

con semplici passaggi. si ricava :

$$E_{n0/p} = [E_0(Z) - E_0(Z-1)] \cdot \alpha(N) - E_0(Z-1) \cdot \frac{1}{2 \cdot p^2}$$

Per esprimerla solo in funzione di  $Z$ , tenendo conto che la separazione tra i diversi tipi di decadimento si ha in prossimità della massima stabilità relativa, possiamo sostituire il fattore di forma con la relazione approssimata :

$$\alpha(N) \simeq 2 + \frac{Z^{(1 - 10^{-4} \cdot 6 \cdot l)}}{23} \quad \text{con} \quad l = \left( \frac{Z}{8} - 1 \right)^{1.7}$$

Sostituendo ancora l'espressione teorica dell'energia per strato :

$$E_0(Z) = E_0(1) \cdot Z^{\frac{2}{3}}$$

si ottiene l'espressione :

$$E_{n0/p} = E_0(Z-1) \left\{ \left[ \left( \frac{Z}{Z-1} \right)^{\frac{2}{3}} - 1 \right] \cdot \alpha(N) - \frac{1}{2 \cdot p^2} \right\}$$

Questa energia è positiva per  $Z < 38$  e negativa per  $Z > 38$ .

Ponendo  $E_{n0/p} = 0$ , si ottiene infatti la relazione :

$$\left( \frac{Z}{Z-1} \right)^{\frac{2}{3}} - 1 = \frac{1}{2 \cdot p^2 \cdot \alpha(N)}$$

verificata da  $Z = 38$ .

Questo vuol dire che **nel nucleo atomico per  $Z > 38$  si crea una naturale tendenza a spostare spontaneamente un neutrone attivo dal centro al terzo livello.**

Trattando la teoria della fissione del nucleo, spontanea o indotta, vedremo la importanza di questo risultato.

Naturalmente, il trasferimento si potrà fisicamente realizzare solo se vengono verificate tutte le altre condizioni necessarie.

Per quanto riguarda invece **il trasferimento di un neutrone dal livello  $p$  al centro, l'energia liberata** risulta :

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

con qualche semplice passaggio, si ricava :

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

e con le solite sostituzioni :

$$1 - \left( \frac{Z}{Z+1} \right)^{\frac{2}{3}} = \frac{1}{2 \cdot p^2 \cdot \alpha(N)}$$

anche questa relazione è verificata per  $Z = 38$ .

Questo conferma che per  $Z < 38$  nel nucleo atomico si ha **una tendenza a spostare spontaneamente un neutrone dal terzo livello al centro e per  $Z > 38$  viene favorito il percorso inverso.**

A questo punto ricordiamo che, se abbiamo un nucleo atomico che presenta un numero isotopico  $I < I_0$ , **la strada che viene utilizzata per aumentare**

**la stabilità è cattura k oppure l'emissione  $\beta^+$ .**

Entrambe queste vie comportano il trasferimento di un neutrone dal centro al terzo livello, che per  $Z > 38$  si realizza spontaneamente.

Dunque, trascurando l'emissione  $\beta^+$ , che si realizza solo con i nuclei leggeri, il risultato che abbiamo ottenuto ci dice che, per  $Z > 38$ , il processo di cattura risulterebbe favorito.

Va però tenuto presente che, con l'aumento di  $Z$ , sulle orbite periferiche dei nuclei **diminuisce il numero dei protoni ed aumenta quello dei deutoni**, che impediscono la cattura degli elettroni K.

La riduzione del numero dei protoni periferici comporta quindi una riduzione proporzionale della probabilità di cattura e, quando si creano configurazioni dei livelli periferici con assenza di protoni, essa è completamente impedita.

La diminuzione della probabilità di cattura K è più o meno graduale fino a un valore  $Z \simeq 60$ .

Con un ulteriore aumento di  $Z$  cominciano a presentarsi delle configurazioni nelle quali la probabilità di cattura è praticamente zero. Si arriva così ai nuclei che presentano **i livelli periferici occupati praticamente solo da deutoni**, per cui la cattura è del tutto impedita.

Quando abbiamo un nucleo atomico in questa situazione, con  $I < I_0$ , le vie di evoluzione verso una maggiore stabilità che abbiamo analizzato non sono più utilizzabili.

A questo punto notiamo però che questi nuclei, avendo  $Z \gg 38$ , hanno una naturale tendenza a trasferire un neutrone dal centro al terzo livello, **con una notevole liberazione di energia**, alla quale viene aggiunta la  $E_D$  sviluppata dalla sintesi del deutone.

**Se il valore dell'energia liberata è sufficiente per espellere un deutone periferico dal nucleo, si ottiene l'isotopo equilibrato  $A(Z-1; N-1)$  che presenta una maggiore stabilità.**

Si ha infatti :

$$\frac{N-1}{Z-1} > \frac{N}{Z}$$

1739c

E' un effetto molto più ridotto di quello che si ottiene con la cattura k, ma utile per l'evoluzione verso la stabilità, altrimenti bloccata.

Per chiarire quello che abbiamo detto, consideriamo uno dei primi nuclei che si presentano in questa situazione, l'isotopo  $\text{Sm}_{62}^{146}$ , che si presenta con la seguente configurazione nucleare.



Il fattore di forma risulta :

$$\alpha(84) = 4 + \frac{23}{50} + \frac{1}{72} = 4.473889$$

L'energia **assorbita** dal trasferimento di un neutrone centrale sul terzo livello risulta :

$$E_{n0/p} = [E_0(62) - E_0(61)] \cdot \alpha(84) - E_0(61) \cdot \frac{1}{2 \cdot 3^2}$$

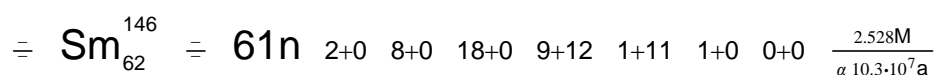
numericamente :  $E_{n0/p} = -5.19771 \text{ MeV}$

con uno dei protoni presenti sull'orbita sintetizza un deutone e quindi si rende disponibile l'energia :

$$E_d = -E_{n0/p} + E_D = 7.42231 \text{ MeV}$$

Il terzo livello è sovrasaturo e quindi il deutone, usando l'energia disponibile, si scambia di posto con un protone presente sul quarto livello.

La configurazione del nucleo sintetizzato risulta :



Per lo scambio è stata consumata l'energia :

$$E_{p3/4} = E_0(61) \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot 3^2} - \frac{1}{2 \cdot 4^2} \right) = 6.26694 \text{ MeV}$$

L'energia libera ancora disponibile risulta :

$$E = E_d - E_{p3/4} = 1.15537 \text{ MeV}$$

**1739d**

L'energia di estrazione di un deutone dal quinto livello vale :

$$E_{D5/\infty} = E_0(61) \cdot \frac{2}{2 \cdot 50^2} = 5.1568 \text{ MeV}$$

L'energia disponibile risulta insufficiente per l'estrazione e quindi questa via non è percorribile.

A questo punto osserviamo che il problema si potrebbe risolvere se la sintesi del deutone potesse fornire un valore di energia più elevato.

Naturalmente questo non è possibile. Noi sappiamo però che **il nucleo ha la possibilità di spostare spontaneamente più neutroni dal centro.**

**Se sul terzo livello si spostano due neutroni**, l'energia liberata diventa :

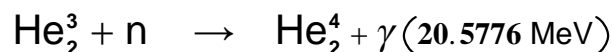
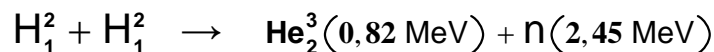
$$E_{2n0/p} = [E_0(62) - E_0(60)] \cdot \alpha(84) - E_0(60) \cdot \frac{2}{2 \cdot 3^2}$$

numericamente :  $E_{2n0/p} = 9.98536 \text{ MeV}$

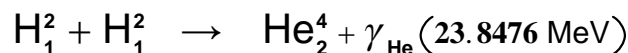
con due dei protoni presenti vengono sintetizzati due deutoni e l'energia che si rende disponibile diventa :

$$E_{2d} = (E_{2n0/p} + 2 \cdot E_D) = 14.43456 \text{ MeV}$$

I due deutoni così formati sono sull'orbita nella condizione di dare origine alla fusione secondo le reazioni nucleari seguenti



e quindi, complessivamente :



A questo punto l'energia complessivamente liberata vale :

$$E_{He} = E_{2d} + \gamma_{He} = 38.28216 \text{ MeV}$$

il nucleo di elio  $He_2^4$  rende il terzo livello sovrassaturo per un eccesso di due unità di massa e quindi esso si sposta sul quarto livello per essere sostituito **dai due protoni che precipitano dal quinto e dal sesto livello.**

Il nucleo ha acquisito, a questo punto, la configurazione :

$$\equiv \text{Sm}_{62}^{146} \equiv 60n \quad 2+0 \quad 8+0 \quad 18+0 \quad 10+11+\alpha \quad 0+11 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad \frac{2.528M}{\alpha \ 10.3 \cdot 10^7 a}$$

L'energia assorbita dal nucleo di elio passando dal livello **3** al **4** vale :

$$E_{\text{He}3/4} = E_0(60) \cdot \left( \frac{4}{2 \cdot 3^2} - \frac{4}{2 \cdot 4^2} \right) = 24.86556 \text{ MeV}$$

Il valore dell'energia fornita dalla transizione dei due protoni risulta :

$$E_{2p6-5/3} = E_0(60) \cdot \left( \frac{2}{2 \cdot 3^2} - \frac{1}{2 \cdot 5^2} - \frac{1}{2 \cdot 6^2} \right) = 19.75036 \text{ MeV}$$

L'energia libera ancora disponibile risulta, a questo punto :

$$E_d = E_{\text{He}} + E_{2p6-5/3} - E_{\text{He}3/4} = 33.16696 \text{ MeV}$$

L'energia di estrazione del nucleo di elio dal quarto livello vale :

$$E_{\text{He}4/\infty} = E_0(60) \cdot \frac{4}{2 \cdot 4^2} = 31.97 \text{ MeV}$$

Essendo  $E_d > E_{\text{He}4/\infty}$  il nucleo di elio viene espulso come particella  $\alpha$  con l'energia :

$$E_\alpha = E_d - E_{\text{He}4/\infty} = 1.19696 \text{ MeV}$$

Il valore sperimentale risulta :  $E_{\alpha s} = E_d - E_{\text{He}4/\infty} = 2.528 \text{ MeV}$

Il nucleo che si ottiene presenta la configurazione :

$$\frac{1184.37}{1185.1} \text{Nd}_{60}^{142} \quad \frac{141.90855}{141.907723} \quad 60n \quad 2+0 \quad 8+0 \quad 18+0 \quad 10+11 \quad 0+11 \quad 0+0 \quad 0+0 \quad \frac{\text{st}}{27.2\%}$$

L'accordo tra i due valori non è eccezionale, ma non è dovuto al metodo, ma all'imprecisione sul valore dell'energia  $E_0(Z)$  che, anche se **non è elevato**,

applicato ripetutamente, porta a errori apprezzabili sull'energia di legame dei nuclei. Nel nostro caso si hanno infatti gli errori :

$$\Delta E \left( \text{Sm}_{62}^{146} \right) = 1211.47 \text{ MeV} - 1210.9 \text{ MeV} = 0.57 \text{ MeV}$$

$$\Delta E \left( \text{Nd}_{60}^{142} \right) = 1184.37 \text{ MeV} - 1185.1 \text{ MeV} = -0.73 \text{ MeV}$$

L'errore totale che viene commesso nel calcolo dell'energia emessa con la particella  $\alpha$  diventa :

$$\Delta E_{\alpha} = \Delta E \left( \text{Sm}_{62}^{146} \right) - \Delta E \left( \text{Nd}_{60}^{142} \right) = 1.3 \text{ MeV}$$

che aggiunto alla  $E_{\alpha}$  fornisce il valore  $E_{\alpha c} = 2.49696 \text{ MeV}$  **che avremmo ottenuto** se avessimo utilizzato per il calcolo i valori corretti di  $E_0(Z)$ .

I risultati che abbiamo ottenuto mettono in evidenza che la sola ragione per la quale **non è mai stata osservata l'emissione di un deutone da parte di un nucleo atomico**, anche se in esso essi sono presenti spesso in numero molto elevato, è che il deutone ha un'energia di legame troppo bassa e la sua sintesi non è sufficiente per fargli superare la velocità di fuga dall'orbita.

Questo risultato può invece essere ottenuto facilmente con la particella  $\alpha$  la cui sintesi libera un'energia molto elevata. Essa non è tuttavia sufficiente per farle superare la velocità di fuga e necessita anche un contributo energetico elevato dell'energia fornita dalla transizione dei due neutroni centrali.

E' per questo motivo che **il decadimento  $\alpha$  si verifica solo nei nuclei con numero atomico  $Z \geq 60$  anche se già con  $Z \geq 38$  si ha trasferimento spontaneo di neutroni dal centro.**

L'emissione  $\alpha$  si manifesta **come processo alternativo** alla cattura quando essa è bloccata dalla particolare configurazione dei livelli nucleari.

**Il decadimento  $\alpha$  si verifica quindi nei nuclei che presentano numero isotopico  $I < I_0$  e quindi con difetto di neutroni rispetto al numero che si associa alla massima stabilità relativa.**

**Non è dunque corretto pensare che l'instabilità del nucleo sia dovuta all'eccessivo numero di neutroni.**

Anche se l'emissione  $\alpha$  lascia invariato il numero isotopico, il nucleo che si

ottiene risulta  $A(Z-2; N-2)$  con un valore del numero isotopico  $I_0$  ridotto

secondo la :

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

e quindi nella relazione  $I < I_0$  l'accostamento alla condizione associata alla massima stabilità si ottiene con la diminuzione del secondo membro e quindi della differenza  $I_0 - I$ , che si può ottenere anche con un aumento del numero isotopico  $I$ .

**Il decadimento  $\alpha$  produce sul nucleo un effetto stabilizzante analogo a quello dato dalla cattura Ke dunque è in grado di agire, in alternativa ( e a volte contemporaneamente ), quando quest'ultimo processo non è realizzabile.**

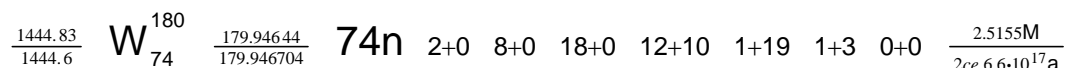
Si noti che, anche se l'emissione  $\alpha$  induce sul nucleo cambiamenti molto più radicali della cattura di un elettrone k, rispetto ad essa **presenta sempre un effetto stabilizzante molto più ridotto.**

Consideriamo ancora l'isotopo  $Os_{76}^{184}$ .



Con fattore di forma :

$$\alpha(108) = 4 + \frac{40}{50} + \frac{8}{72} = 4.911111$$



L'energia liberata dal trasferimento di due neutroni dal centro al terzo livello vale :

$$E_{2n0/p} = [E_0(76) - E_0(74)] \cdot \alpha(108) - E_0(74) \cdot \frac{2}{2 \cdot 3^2}$$

numericamente :  $E_{2n0/p} = 15.73067 \text{ MeV}$

con la sintesi dei due deutoni si rende disponibile l'energia :

$$E_{2d} = (E_{2n0/p} + 2 \cdot E_D) = 20.17987 \text{ MeV}$$

**1739h**



e quindi, con la sintesi dell'elione, l'energia complessivamente liberata sarà :

$$E_{\text{He}} = E_{2d} + \gamma_{\text{He}} = 20.17987 \text{ MeV} + 23.8476 \text{ MeV} = 44.02747 \text{ MeV}$$

A questo punto abbiamo il terzo livello sovrassaturo e quindi la particella  $\text{He}_2^4$  sintetizzata si trasferisce sul livello **5** non saturo, mentre il terzo viene saturato dalla caduta di due protoni dal quarto livello e dal quinto livello un deutone si sposta sul quarto . Infine, dal sesto livello un deutone si sposta sul quarto dal quale si spostano due protoni, uno sul quinto e l'altro sul sesto livello.

Il nucleo a questo punto ha assunto la configurazione :

$$\equiv \text{Os}_{76}^{184} \equiv 74n \quad 2+0 \quad 8+0 \quad 18+0 \quad 12+10 \quad 1+19+\alpha \quad 1+3 \quad 0+0 \quad \frac{2.5155M}{2ce \ 6.6 \cdot 10^{17}a}$$

L'energia assorbita dal trasferimento del nucleo  $\text{He}_2^4$  dal livello **3** al **5** vale :

$$E_{\text{He}3/5} = E_0(74) \cdot \left( \frac{4}{2 \cdot 3^2} - \frac{4}{2 \cdot 5^2} \right) = 40.06258 \text{ MeV}$$

il trasferimento del deutone dal livello **5** al **4** e di due protoni dal **4** al **3** libera complessivamente l'energia :

$$E_{2p5/3} = E_0(74) \cdot \left( \frac{2}{2 \cdot 3^2} - \frac{2}{2 \cdot 5^2} \right) = 20.03129 \text{ MeV}$$

Il deutone che si sposta dal sesto al quarto livello fornisce l'energia :

$$E_{D6/4} = E_0(74) \cdot \left( \frac{2}{2 \cdot 4^2} - \frac{2}{2 \cdot 6^2} \right) = 9.78090 \text{ MeV}$$

i due protoni che si spostano dal quarto livello al quinto e sesto assorbono :

$$E_{2p4/5/6} = E_0(74) \cdot \left( \frac{2}{2 \cdot 4^2} - \frac{1}{2 \cdot 5^2} - \frac{1}{2 \cdot 6^2} \right) = 8.059464 \text{ MeV}$$

L'energia disponibile per estrarre la particella  $\alpha$  dal nucleo risulta :

$$E_d = E_{\text{He}} - E_{\text{He}3/5} + E_{2p5/3} + E_{D6/4} - E_{2p4/5/6} = 25.71762 \text{ MeV}$$

L'energia richiesta dalla particella  $\alpha$  per superare la velocità di fuga risulta :

$$E_{\text{He5}/\infty} = E_0(74) \cdot \frac{4}{2 \cdot 5^2} = 22.5352 \text{ MeV}$$

Essendo  $E_d > E_{\text{He4}/\infty}$  la particella esce dal nucleo con l'energia :

$$E_\alpha = E_d - E_{\text{He5}/\infty} = 3.18242 \text{ MeV}$$

Il valore sperimentale risulta :  $E_{\alpha s} = E_d - E_{\text{He4}/\infty} = 2.955 \text{ MeV}$

Il nucleo sintetizzato risulta :

$$\frac{1444.83}{1444.6} W_{74}^{180} \quad \frac{179.94644}{179.946704} 74n \quad 2+0 \quad 8+0 \quad 18+0 \quad 12+10 \quad 1+19 \quad 1+3 \quad 0+0 \quad \frac{2.5155M}{2ce \ 6.6 \cdot 10^{17}a}$$

L'accordo tra i due valori, già più che accettabile, anche in questo caso può essere migliorato usando un valore più preciso di  $E_0(Z)$ . Gli errori prodotti sulle energie di legame risultano infatti

$$\Delta E_\alpha = \Delta E(\text{Os}_{76}^{184}) - \Delta E(W_{74}^{180}) = -0.17 \text{ MeV}$$

che aggiunto alla  $E_\alpha$  fornisce il valore  $E_{\alpha c} = 3.01242 \text{ MeV}$  **che avremmo ottenuto** se avessimo utilizzato per il calcolo i valori corretti di  $E_0(Z)$ .

Consideriamo ora la trasmutazione  $\text{Fr}_{87}^{210} \rightarrow \text{At}_{85}^{206} + \alpha$   
la configurazione nucleare è la seguente.

$$\frac{1630.37}{1630.3} \text{Fr}_{87}^{210} \quad \frac{209.99629}{209.996408} 87n \quad 2+0 \quad 8+0 \quad 18+0 \quad 22+5 \quad 0+24 \quad 0+7 \quad 1+0 \quad \frac{6.672M}{\alpha \ 3.18m}$$

$$\alpha(123) = 4 + \frac{48}{50} + \frac{14}{72} + \frac{1}{98} = 5.164648$$

L'energia liberata dal trasferimento di due neutroni dal centro al terzo livello vale :

$$E_{2n0/p} = [E_0(87) - E_0(85)] \cdot \alpha(123) - E_0(85) \cdot \frac{2}{2 \cdot 3^2}$$

numericamente :  $E_{2n0/p} = 19.69356 \text{ MeV}$

1739I

con la sintesi dei due deutoni si rende disponibile l'energia :

$$E_{2d} = (E_{2n0/p} + 2 \cdot E_D) = 24.14276 \text{ MeV}$$

e quindi, con la sintesi dell'elione, l'energia complessivamente liberata sarà :

$$E_{He} = E_{2d} + \gamma_{He} = 24.14276 \text{ MeV} + 23.8476 \text{ MeV} = 47.99036 \text{ MeV}$$

A questo punto abbiamo il terzo livello sovrassaturo e quindi la particella  $He_2^4$  sintetizzata si sposta sul livello **5** dal quale un deutone cade sul quarto che, a sua volta, trasferisce due protoni sul terzo livello per saturarlo. Un deutone si sposta infine dal sesto al quinto livello e la configurazione del nucleo diventa :

$$\equiv Fr_{87}^{210} \equiv 85n \quad 2+0 \quad 8+0 \quad 18+0 \quad 20+6 \quad 0+24+\alpha \quad 0+6 \quad 1+0 \quad \frac{6.672M}{\alpha \ 3.18m}$$

L'energia assorbita dal trasferimento del nucleo  $He_2^4$  dal livello **3** al **5** vale :

$$E_{He3/5} = E_0(85) \cdot \left( \frac{4}{2 \cdot 3^2} - \frac{4}{2 \cdot 5^2} \right) = 42.3296 \text{ MeV}$$

Il deutone che si sposta dal quinto al quarto livello e i due protoni che cadono dal quarto al terzo livello liberano complessivamente l'energia :

$$E_{2p5/3} = E_0(85) \cdot \left( \frac{2}{2 \cdot 3^2} - \frac{2}{2 \cdot 5^2} \right) = 21.1648 \text{ MeV}$$

infine, il deutone che si sposta dal sesto al quinto livello libera :

$$E_{D6/5} = E_0(85) \cdot \left( \frac{2}{2 \cdot 5^2} - \frac{2}{2 \cdot 6^2} \right) = 3.6377 \text{ MeV}$$

A questo punto l'energia disponibile per estrarre la particella  $\alpha$  risulta :

$$E_d = E_{He} - E_{He3/5} + E_{2p5/3} + E_{D6/5} = 30.46326 \text{ MeV}$$

L'energia richiesta dalla particella  $\alpha$  per raggiungere la velocità di fuga vale :

**1739m**

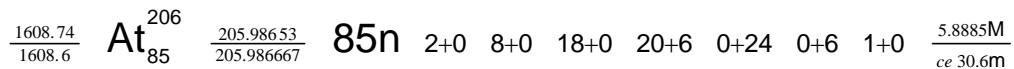
$$E_{\text{He5}/\infty} = E_0(85) \cdot \frac{4}{2 \cdot 5^2} = 23.8104 \text{ MeV}$$

risulta dunque  $E_d > E_{\text{He5}/\infty}$  e quindi la particella viene emessa con l'energia

$$E_\alpha = E_d - E_{\text{He5}/\infty} = 6.65286 \text{ MeV}$$

in ottimo accordo con il valore sperimentale  $E_\alpha = 6.672 \text{ MeV}$

Il nucleo che si ottiene risulta :



Consideriamo ancora la reazione che trasforma l'isotopo  $U_{92}^{238}$  in  $Th_{90}^{234}$ .



$$\alpha(146) = 4 + \frac{49}{50} + \frac{36}{72} + \frac{1}{98} = 5.490204$$

L'energia liberata dal trasferimento di due neutroni dal centro al terzo livello vale :

$$E_{2n0/p} = [E_0(92) - E_0(90)] \cdot \alpha(146) - E_0(90) \cdot \frac{2}{2 \cdot 3^2}$$

numericamente :  $E_{2n0/p} = 20.54194 \text{ MeV}$

con la sintesi dei due deutoni si rende disponibile l'energia :

$$E_{2d} = (E_{2n0/p} + 2 \cdot E_D) = 24.99114 \text{ MeV}$$

con la sintesi dell'elione, l'energia complessivamente liberata sarà :

$$E_{\text{He}} = E_{2d} + \gamma_{\text{He}} = 24.99114 \text{ MeV} + 23.8476 \text{ MeV} = 48.83874 \text{ MeV}$$

A questo punto abbiamo il terzo livello sovrassaturo e quindi la particella  $He_2^4$  sintetizzata si sposta sul livello 5 dal quale un deutone cade sul quarto che, a sua volta, trasferisce due protoni sul terzo livello per saturarlo. Un protone si

sposta infine dal settimo al sesto livello e si ottiene così la configurazione :

$$= U_{92}^{238} = 90n_{2+0} \ 8+0 \ 18+0 \ 6+13 \ 1+23+\alpha \ 1+18 \ 0+0 \ \frac{4.270M}{\frac{\alpha \ 4.468 \cdot 10^9 a}{99.2742\%}}$$

L'energia assorbita dal trasferimento del nucleo  $He_2^4$  dal livello **3** al **5** vale :

$$E_{He3/5} = E_0(90) \cdot \left( \frac{4}{2 \cdot 3^2} - \frac{4}{2 \cdot 5^2} \right) = 43.22987 \text{ MeV}$$

Il deutone che si sposta dal quinto al quarto livello e i due protoni che cadono dal quarto al terzo livello liberano complessivamente l'energia :

$$E_{2p5/3} = E_0(90) \cdot \left( \frac{2}{2 \cdot 3^2} - \frac{2}{2 \cdot 5^2} \right) = 21.61493 \text{ MeV}$$

infine, il protone che si sposta dal sesto al quinto livello libera :

$$E_{p6/5} = E_0(90) \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot 6^2} - \frac{1}{2 \cdot 7^2} \right) = 1.120034 \text{ MeV}$$

A questo punto l'energia disponibile per estrarre la particella  $\alpha$  risulta :

$$E_d = E_{He} - E_{He3/5} + E_{2p5/3} + E_{p6/5} = 28.34383 \text{ MeV}$$

L'energia richiesta dalla particella  $\alpha$  per raggiungere la velocità di fuga vale :

$$E_{He5/\infty} = E_0(90) \cdot \frac{4}{2 \cdot 5^2} = 24.3168 \text{ MeV}$$

risulta dunque  $E_d > E_{He5/\infty}$  e quindi la particella viene emessa con l'energia

$$E_\alpha = E_d - E_{He5/\infty} = 4.02703 \text{ MeV}$$

il valore sperimentale risulta  $E_\alpha = 4.270 \text{ MeV}$

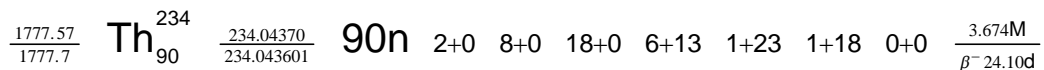
L'accordo tra i due valori, già più che accettabile, anche in questo caso può

essere migliorato usando un valore più preciso di  $E_0(Z)$ . Gli errori prodotti sulle energie di legame risultano infatti

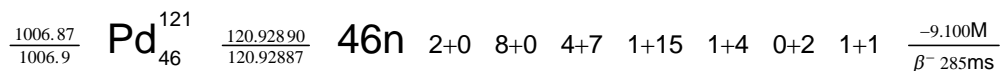
$$\Delta E_\alpha = \Delta E\left(U_{92}^{238}\right) - \Delta E\left(\text{Th}_{90}^{234}\right) = 0.26 \text{ MeV}$$

che aggiunto alla  $E_\alpha$  fornisce il valore  $E_{\alpha c} = 4.28703 \text{ MeV}$  **che avremmo ottenuto** se avessimo utilizzato per il calcolo i valori corretti di  $E_0(Z)$ .

Il nucleo che si ottiene risulta con la configurazione :



Per concludere, consideriamo un nucleo avente  $I > I_0$ , ossia con eccesso di neutroni rispetto alla condizione di massima stabilità.



$$\alpha(75) = 3 + \frac{31}{32} + \frac{9}{50} + \frac{4}{72} + \frac{3}{98} = 4.234918$$

Il questo caso l'emissione di una particella  $\alpha$  allontana ancora di più il nucleo dalla stabilità e quindi l'emissione si potrà avere solo spendendo energia.

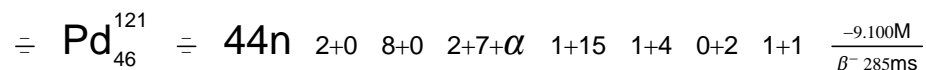
Due neutroni spontaneamente si spostano sul terzo livello dove, con i protoni presenti sintetizzano due deutoni e quindi una particella  $\alpha$ .

L'energia che si libera con il trasferimento dei neutroni vale :

$$E_{2n0/3} = \left[ E_0(46) - E_0(44) \right] \cdot \alpha(75) - E_0(44) \cdot \frac{2}{2 \cdot 3^2}$$

numericamente :  $E_{2n0/3} = 1.217983 \text{ MeV}$

dopo la sintesi il nucleo diventa :



Dopo la sintesi l'energia disponibile vale :

**1739p**

$$E_d = E_{2n0/3} + 2 \cdot E_D + \gamma_{He} = 29.51478 \text{ MeV}$$

con parte di questa energia un deutone si sposta dal quarto al sesto livello e assorbe :

$$E_{D4/6} = E_0(44) \cdot \left( \frac{2}{2 \cdot 4^2} - \frac{2}{2 \cdot 6^2} \right) = 7.540278 \text{ MeV}$$

A questo punto osserviamo che il terzo livello è sovrassaturo con un eccesso di due unità di massa, per cui la particella  $\alpha$  si trasferisce dal terzo livello al quinto, non saturo, e contemporaneamente due protoni si spostano dal quinto e dal settimo livello al terzo per saturarlo.

L'energia assorbita dalla particella  $\alpha$  vale :

$$E_{\alpha3/5} = E_0(44) \cdot \left( \frac{4}{2 \cdot 3^2} - \frac{4}{2 \cdot 5^2} \right) = 30.88498 \text{ MeV}$$

L'energia fornita dal trasferimento dei due protoni risulta :

$$E_{2p5/7/3} = E_0(44) \cdot \left( \frac{2}{2 \cdot 3^2} - \frac{1}{2 \cdot 5^2} - \frac{1}{2 \cdot 7^2} \right) = 17.56977 \text{ MeV}$$

La configurazione assunta a questo punto dal nucleo sarà :

$$\equiv \text{Pd}_{46}^{121} \equiv 44n_{2+0 \ 8+0 \ 4+7 \ 1+14 \ 0+4+\alpha \ 0+3 \ 0+1} \frac{-9.100M}{\beta^- 285ms}$$

l'energia disponibile per l'estrazione della particella  $\alpha$  vale :

$$E_r = E_d - E_{D4/6} + E_{2p5/7/3} - E_{\alpha3/5} = 8.65929 \text{ MeV}$$

L'energia necessaria vale :

$$E_{\alpha5/\infty} = E_0(44) \cdot \frac{4}{2 \cdot 5^2} = 17.3728 \text{ MeV}$$

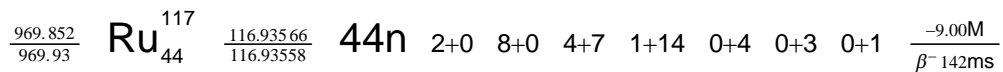
Per l'estrazione bisogna dunque fornire l'energia :

1739q

$$E_{\alpha} = E_{\alpha s/\infty} - E_r = 8.71351 \text{ MeV}$$

in discreto accordo con il valore sperimentale  $E_{\alpha s} = 9.100 \text{ MeV}$ .

Dopo l'estrazione si ottiene il nucleo :



La trattazione che abbiamo presentato, perfettamente coerente con la teoria atomica che è stata elaborata, permette di concludere che, **contrariamente a quanto si ritiene normalmente, il decadimento  $\alpha$  si verifica nei nuclei che presentano un difetto di neutroni**, rispetto alla condizione associata alla massima stabilità.

Questo tipo di decadimento si verifica spontaneamente quando **il nucleo ha nella parte periferica praticamente solo deutoni e questo impedisce la cattura k**, che porterebbe ad una riduzione del numero atomico con aumento del numero isotopico.

Vedremo in un prossimo capitolo, con la teoria della fissione spontanea, che, nei nuclei che presentano un **difetto di neutroni** e non hanno la possibilità di aumentarli per cattura di elettroni k, se la particella  $\alpha$  sintetizzata non riesce a raggiungere la velocità di fuga, anche l'emissione  $\alpha$  è impedita e nel nucleo si crea una condizione che porta alla scissione.

Per facilitare il **calcolo teorico dell'energia** associata al decadimento  $\alpha$  di qualsiasi nucleo, abbiamo tabulato la configurazione nucleare dei nuclei che hanno lo stesso numero isotopico, indicati normalmente come **isodiaferi**.