– Configurazione dei livelli nucleari nei nuclei atomici leggeri

In fig. a a pag. 792 abbiamo indicato un deutone con **il protone polarizzato**, in orbita sul livello $p = \mathbf{2}$, con energia di legame :

$$E_d = \frac{E_0(1)}{2 \cdot p^2} = \frac{\mathbf{17,792}\ \text{MeV}}{2 \cdot 2^2} = \mathbf{2,224}\ \text{MeV}$$

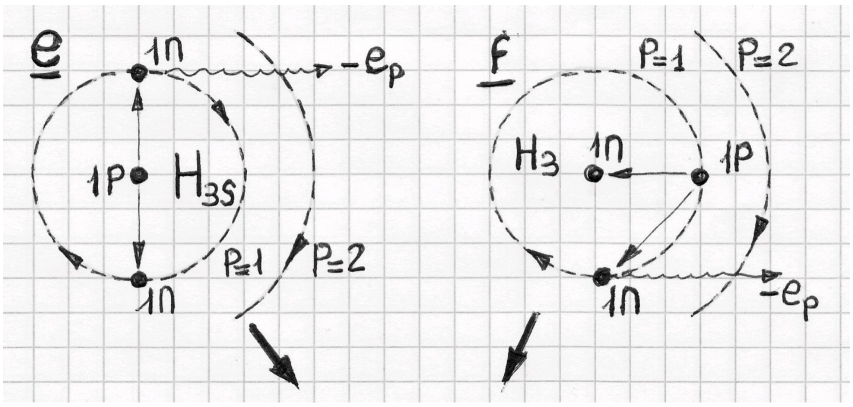
E' noto che, se un neutrone termico (lento) urta un protone, si crea un deutone e viene emessa l'energia E_d e la reazione presenta una elevata probabilità (sezione d'urto) di realizzarsi.

Se lo stesso neutrone urta il protone polarizzato, già legato a un neutrone, la probabilità che l'unione possa realizzarsi è molto più ridotta in quanto il nuovo legame richiede anche un adattamento del vecchio.

Quando l'unione si realizza, la coppia **protone** – **neutrone** si ritrova in orbita con massa doppia ed energia ancora uguale a E_0, in quanto il contributo del neutrone è praticamente nullo.

Il sistema in orbita presenta dunque un difetto di energia rispetto al livello di equilibrio e quindi, secondo quanto è previsto dalla teoria generale, " **cade** " **sul livello stabile più basso**, con emissione della differenza della energia di legame tra il livello finale e quello iniziale

Abbiamo così un solo protone legato a due neutroni, nella configurazione c**,** che evolve spontaneamente verso una **condizione di maggiore simmetria**, come è indicato nelle figure e ed f**.**



In entrambe le configurazioni si ha sempre un neutrone meno legato dell'altro, che ha tendenza a comportarsi **come un neutrone libero** e quindi si divide, rigenerando così il protone con emissione di un elettrone pesante, il quale, a sua volta, si scinde in un elettrone più un neutrino.

Ricordiamo infatti che, secondo il processo di sintesi che abbiamo proposto, il deutone, che viene rappresentato come il legame tra protone e neutrone, in realtà è formato da particelle legate secondo il seguente schema.

$$\left(+\tfrac{2}{4}K_p^2\right)+\left[\left(-\tfrac{1}{4}K_p^2-\tfrac{1}{4}K_p^2\right)\Leftrightarrow\left(+\tfrac{1}{4}K_p^2+\tfrac{1}{4}K_p^2\right)\right]+\left(+\tfrac{2}{4}K_p^2\right)$$

In tale schema non sono distinguibili il protone ed il neutrone, **ma il sistema**

simmetrico centale : $\left[\left(+\tfrac{1}{4}K_p^2\right)\Leftrightarrow\left(-\tfrac{1}{4}K_p^2-\tfrac{1}{4}K_p^2\right)\Leftrightarrow+\left(+\tfrac{1}{4}K_p^2\right)\right]$

formato dal nucleo centrale : $\left(-\tfrac{1}{4}K_p^2-\tfrac{1}{4}K_p^2\right)$

e le due particelle periferiche : $\left(+\tfrac{1}{4}K_p^2\right)+\left(+\tfrac{1}{4}K_p^2\right)$

A questo sistema, sulla periferia, si legano , **con disposizione simmetrica**, le due particelle $\left(+\tfrac{2}{4}K_p^2\right)$,**che sono equivalenti ad un protone**, **ma** non hanno la stessa configurazione.

Il sistema così formato è nell'insieme stabile, ma non rappresenta " **l'unione tra un protone ed un neutrone come particelle distinte** ", che avrebbero, in apparenza, una struttura del tipo :

$$\left[\left(+\tfrac{1}{4}K_p^2\right)\Leftrightarrow\left(-\tfrac{1}{4}K_p^2-\tfrac{1}{4}K_p^2\right)\Leftrightarrow\left(+\tfrac{1}{4}K_p^2\right)\right]\quad\text{(neutrone legato)}$$

$$\left(+\tfrac{2}{4}K_p^2\right)+\left(+\tfrac{2}{4}K_p^2\right)\quad\text{(protone legato)}$$

Se al deutone, che abbiamo sintetizzato, viene fornita l'energia che è stata liberata durante la sintesi, esso si dividerà, liberando le particelle di partenza.

794

Per poter liberare un protone è però necessario prima ricostruire la sua struttura interna.

La divisione potrà dunque realizzarsi solo dopo aver effettuato lo scambio di particelle :

$$\left[\left(-\tfrac{1}{4}K_p^2 - \tfrac{1}{4}K_p^2\right) \Leftrightarrow \left(+\tfrac{2}{4}K_p^2\right)\right] \quad \text{(neutrone libero residuo)}$$

$$\left(+\tfrac{1}{4}K_p^2\right) \Leftrightarrow \left(+\tfrac{2}{4}K_p^2\right) \Leftrightarrow \left(+\tfrac{1}{4}K_p^2\right) \quad \text{(protone libero ricostruito)}$$

In queste condizioni il protone riacquista la sua struttura interna stabile e può allontanarsi come particella indipendente.

Il neutrone libero, appena "**sintetizzato**", si ritrova formato dalla particella $\left(+\tfrac{2}{4}K_p^2\right)$, assolutamente stabile, legata all'aggregato $\left(-\tfrac{1}{4}K_p^2 - \tfrac{1}{4}K_p^2\right)$.

Questo legame presenta una forte dissimmetria ed è dunque molto debole.

Esso evolve quindi verso l'unica configurazione simmetrica possibile, con il nucleo diviso in due particelle $\left(-\tfrac{1}{4}K_p^2\right)$, che orbitano nello spazio rotante della particella $\left(+\tfrac{2}{4}K_p^2\right)$, secondo lo schema :

$$\left[\left(-\tfrac{1}{4}K_p^2\right) \Leftrightarrow \left(+\tfrac{2}{4}K_p^2\right) \Leftrightarrow \left(-\tfrac{1}{4}K_p^2\right)\right]$$

La divisione del nucleo comporta però l'emissione dell'elettrone pesante e la trasformazione seguente.

$$\left(-\tfrac{1}{4}K_p^2 - \tfrac{1}{4}K_p^2\right) \Rightarrow e_p + \left(+\tfrac{1}{4}K_p^2\right) + \left(+\tfrac{1}{4}K_p^2\right)$$

L'elettrone pesante si divide ancora liberando un elettrone ed un neutrino :

$$e_p \;\rightarrow\; e^- + \nu + 0{,}782 \text{ MeV}$$

In definitiva, il neutrone neonato si trasforma, generando un protone, secondo lo schema :

$$\left[\left(-\tfrac{1}{4}K_p^2 - \tfrac{1}{4}K_p^2\right) \Leftrightarrow \left(+\tfrac{2}{4}K_p^2\right)\right] \rightarrow$$

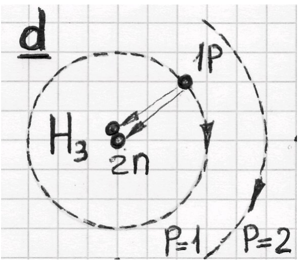
$$\left[\left(+\tfrac{1}{4}K_p^2\right) \Leftrightarrow \left(+\tfrac{2}{4}K_p^2\right) \Leftrightarrow \left(+\tfrac{1}{4}K_p^2\right)\right] + e^- + \nu + \mathbf{0,782}\ \mathrm{MeV}$$

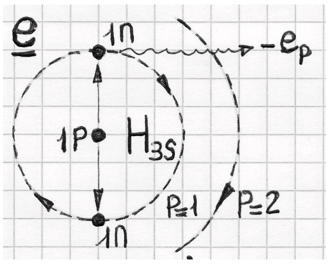
Il sistema che viene così formato è un nucleo di He_2^3 con struttura simmetrica e stabile, come è indicato nella figura **g.**
In definitiva, in tutto il processo si verificano le seguenti reazioni :

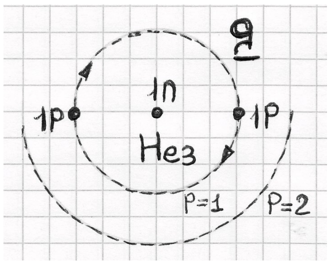
$$H_1^2 + n \rightarrow H_1^3 + \mathbf{6,258}\ \mathrm{MeV}$$

$$H_1^3 \rightarrow He_2^3 + e_p$$

$$e_p \rightarrow e^- + \mathbf{0,782}\ \mathrm{MeV}$$







Se si confrontano le figure e , g , che rappresentano i nuclei iniziale e finale nella configurazione di massima stabilità, risultano chiaramente i legami :

$$H_1^3 - \text{due legami } p - n \quad ; \quad He_2^3 - \text{due legami } n - p$$

essendo l'energia associata ad un legame $p - n$ uguale a quella associata al legame $n - p$, essi forniranno ai due nuclei complessivamente la stessa energia di legame e quindi si avrà :

$$E_{ZN}(1\ ;\ 2) = E_{ZN}(2\ ;\ 1) + \mathbf{0,782}\ \mathrm{MeV}$$

L'energia che viene liberata dalla reazione risulta così solo quella legata alla trasformazione del neutrone in protone (risultato già ricavato per altra via), in perfetto accordo con i risultati sperimentali.

Dobbiamo, a questo punto, rilevare che nelle teorie correnti non è disponibile un modello teorico della struttura interna del nucleo atomico.
Protoni e neutroni vengono per questo pensati, nel nucleo, **a stretto contatto ed interagenti tra loro senza alcuna distinzione per il tipo di particella**.

Come indiscutibile argomento a sostegno di questa ipotesi, viene assunto il fatto che nei nuclei speculari, come H_1^3 e He_2^3, la differenza tra le energie di legame può essere solo di natura elettrostatica.

Secondo il modello nucleare corrente, si osserva infatti che :
– nel nucleo H_1^3 vi sono due legami $n - p$ e un legame $n - n$
– nel nucleo He_2^3 vi sono due legami $n - p$ e un legame $p - p$

Ammettendo, **arbitrariamente**, che, **nel nucleo**, la forza di attrazione tra due protoni sia uguale a quella che si esercita tra due neutroni, nel nostro caso la differenza verrebbe fornita solo dalla **forza di repulsione coulombiana** che si manifesta tra i due protoni.

Se si assume, **arbitrariamente**, la distanza tra i protoni pari a $\mathbf{d} = 2 \cdot 10^{-15}$ m si ricava l'energia associata :

$$\Delta E_{pp} = 10^{-7} \cdot C_l^2 \cdot \frac{q_p^2}{d} = 0,72 \text{ MeV}$$

che **approssimativamente** coincide con il valore sperimentale.
Benchè il calcolo sia molto discutibile ed il risultato approssimato, si assume la coincidenza del valore calcolato con quello sperimentale come prova della validità dell'ipotesi e non solo, perchè il risultato viene poi generalizzato a tutti i nuclei speculari.
Secondo questo modello, se le forze scambiate dai nucleoni non dipendono dal tipo di particella e dalla posizione occupata nel nucleo, il passaggio dal nucleo $\left(Z\,;N\right)$ a $\left(Z+1\,;N-1\right)$ dovrebbe comportare solo la differenza di energia di legame che abbiamo calcolato, mentre questo non si verifica.

797

Secondo il modello nucleare che abbiamo ricavato, applicando la teoria degli spazi rotanti, la forza scambiata tra protoni o neutroni risulta **assolutamente trascurabile** rispetto a quella scambiata nel legame $p-n$ ed il passaggio da un nucleo all'altro si realizza con la divisione di **un deutone** periferico , con la conversione di **un neutrone** periferico **in protone** periferico.

Non essendo cambiato lo spazio rotante nucleare, la variazione di energia di legame risulta :

$$\Delta E = E_{1P_SP} - 2,224 \text{ MeV}$$

e dipende dal nucleo considerato.

Solo quando $E_{1P_SP} = 2,224$ MeV, come accade quando il nucleo iniziale è un deutone, si verifica $\Delta E = 0$.
In pratica questo si verifica perchè si elimina e si crea nello stesso tempo un legame $p-n$ con lo stesso nucleo (un solo neutrone).

Lo stesso risultato si può ricavare confrontando direttamente le figure f e g.
Il passaggio da H_1^3 a He_2^3 comporta una variazione della massa in orbita e dunque una richiesta di energia :

$$E_1 = (2 - 1{,}999008) \cdot (1\text{AMU}) \cdot C_I^2 = 0,924042 \text{ MeV}$$

a questo valore si deve aggiungere l'aumento dell'energia cinetica :

$$E_2 = \frac{E_0(1)}{2 \cdot 1^2} \cdot (2 - 1{,}999008) = 0,007018 \text{ MeV}$$

L'energia disponibile è quella di legame del deutone in orbita e dunque verrà liberata, durante il processo, l'eccesso di energia :

$$\Delta E = E_D - (E_1 + E_2) = 782940 \text{ eV} + e^-$$

in perfetto accordo con il valore sperimentale.

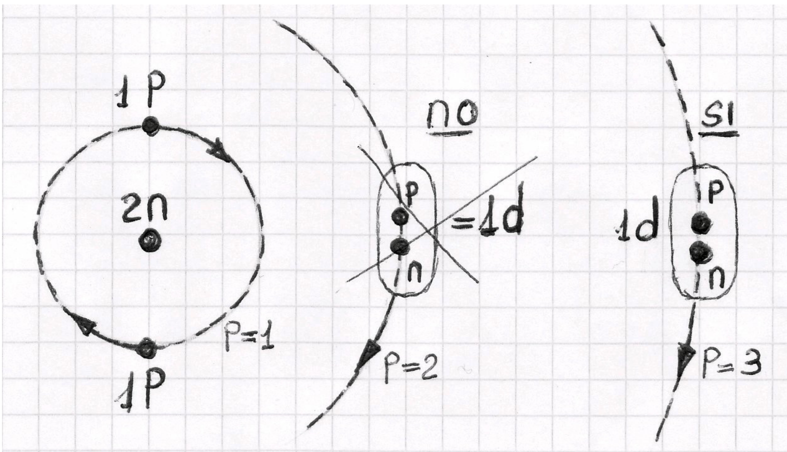
798

Incidentalmente notiamo che il nucleo di He_2^3 è stabile con lo spazio rotante generato da un solo neutrone centrale e aggiungendo un neutrone nel centro, si genera il nucleo He_2^4 , molto più stabile, ma sempre con due particelle in moto sulla prima orbita.

Questo vuol dire che, per poter sostenere le due particelle sulla prima orbita nucleare generando un sistema perfettamente equilibrato, **un solo neutrone** centrale risulta in " **lieve difetto** " e quindi **due neutroni** saranno certamente " **molto abbondanti** " per sostenere le stesse particelle.

Può dunque esistere un nucleo con due neutroni centrali e tre particelle sulle orbite,
con una di esse " **scarsamente legata** ", e dunque non sulla seconda,
ma sulla terza orbita, che richiede una minore energia di legame.

Dopo l' He_2^4 nella serie degli elementi abbiamo il Li_3^6 del quale si potrebbe immaginare la seguente configurazione.



$$\left(2n\right)-\left[\left(2p+0d\right)+\left(0p+0d\right)+\left(0p+1d\right)\right]$$

L'energia di legame risulta :

$$E_{ZN}^{*}\left(3\,;3\right)=\mathbf{17{,}828\cdot 2}^{\frac{2}{3}}\cdot\left(\mathbf{1}+\frac{\mathbf{1{,}999008}}{\mathbf{2\cdot 3^{2}}}\right)=\mathbf{31{,}44309}\ \text{MeV}$$

799

Se si considerano come particelle iniziali indipendenti $3p + 3n$, a questo valore si deve aggiungere l'energia di legame tra protone e neutrone :

$$E_{pn} = \left(m_p + m_n + m_e - m_d\right) \cdot C_l^2 = 2,224 \text{ MeV}$$

complessivamente l'energia di legame del nucleo Li_3^6 risulta quindi :

$$E_{ZN}(3\,;3) = E^*_{ZN}(3\,;3) + E_{pn} = 33,6671 \text{ MeV}$$

in perfetto accordo con il valore fornito dall'osservazione.

L'aggiunta di un altro neutrone al centro del nucleo genera uno spazio rotante che rende molto più forte il legame del deutone periferico, ma non capace di sostenere in orbita un'altra particella.

Si ottiene così il nucleo Li_3^7 , molto più stabile, con energia di legame :

$$E^*_{ZN}(3\,;4) = \mathbf{35,658} \cdot \left(\mathbf{1} + \frac{\mathbf{1,999008}}{\mathbf{2 \cdot 3^2}}\right) = 39,6180 \text{ MeV}$$

$$E_{ZN}(3\,;4) = E^*_{ZN}(3\,;4) + E_{pn} = 41,8420 \text{ MeV}$$

con la configurazione orbitale :

$$(3n) - \left[(2p\ ) + (0p + 0d) + (0p + 1d)\right]$$

Aggiungendo ancora un neutrone centrale, si ottiene il nucleo di Be_4^9 con la seguente configurazione.

$$(4n) - \left[(2p + 0d) + (0p + 1d) + (1p + 0d)\right]$$

Si ricava l'energia di legame :

$$E^*_{ZN}(4\,;5) = \mathbf{43,016} \cdot \left(\mathbf{1} + \frac{\mathbf{1,999008}}{\mathbf{2 \cdot 2^2}} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2 \cdot 3^2}}\right) = 56,1544 \text{ MeV}$$

800

$$E_{ZN}(4\,;5) = E^{*}_{ZN}(4\,;5) + E_{pn} = \mathbf{58,3784}\ \text{MeV}$$

in ottimo accordo con il valore sperimentale.

Aggiungendo ancora un neutrone al centro, si ottiene la configurazione :

$$(5n) - \left[(2p + 0d) + (3p + 0d) + (0p + 0d) \right]$$

L'energia di legame risulta : $E_{ZN}(5\,;5) = \mathbf{69,2642}$ MeV

Sostituendo, in orbita, un protone con un deutone, si ottiene l'isotopo :

$$(5n) - \left[(2p + 0d) + (1p + 1d) + (1p + 0d) \right]$$

al quale si associa una energia di legame : $E_{ZN}(5\,;6) = \mathbf{74,2806}$ MeV

Per il carbonio si ha :

$$(6n) - \left[(2p + 0d) + (4p + 0d) + (0p + 0d) \right]$$

con energia di legame : $E_{ZN}(6\,;6) = \mathbf{86,598}$ MeV

con l'aggiunta di un neutrone periferico, si otiene l'isotopo :

$$(6n) - \left[(2p + 0d) + (3p + 1d) + (0p + 0d) \right]$$

con energia di legame : $E_{ZN}(6\,;7) = \mathbf{96,0313}$ MeV

E' da notare che il difetto di massa, e dunque l'energia di legame del nucleo C^{12}_{6} , è dato per definizione, in quanto si assume $m_{C12} = \mathbf{12,00000}$ e quindi si ricava l'energia per strato : $E_{0}(6\,;6) = \mathbf{61,4412}$ MeV

Se utilizziamo l'espressione teorica che abbiamo ricavato, otteniamo invece il valore $E_{0T}(6\,;6) = \mathbf{57,732}$ MeV , sensibilmente minore, in quanto noi non abbiamo considerato le particolari condizioni di simmetria che, in particolare

nei nuclei leggeri, producono un sensibile aumento dell'energia di legame.

Utilizzando il valore corretto dell'energia per strato, con le configurazioni che abbiamo ricavato, si ottengono le energie di legame :

$$E_{ZN}(6\,;6) = \mathbf{92,1618}\ \text{MeV}$$
$$E_{ZN}(6\,;7) = \mathbf{102,058}\ \text{MeV}$$

Per il nucleo successivo si ha la configurazione :

$$(7n) - \left[(2p+0d) + (5p+0d) + (0p+0d)\right]$$

con energia di legame : $E_{ZN}(7\,;7) = \mathbf{105,771}\ \text{MeV}$

$$(7n) - \left[(2p+0d) + (3p+1d) + (1p+0d)\right]$$

con energia di legame : $E_{ZN}(7\,;8) = \mathbf{116,123}\ \text{MeV}$

$$(8n) - \left[(2p+0d) + (6p+0d) + (0p+0d)\right]$$

con energia di legame : $E_{ZN}(8\,;8) = \mathbf{126,784}\ \text{MeV}$

$$(8n) - \left[(2p+0d) + (4p+1d) + (1p+0d)\right]$$

$$E_{ZN}(8\,;9) = \mathbf{133,024}\ \text{MeV}$$

$$(8n) - \left[(2p+0d) + (4p+2d) + (0p+0d)\right]$$

$$E_{ZN}(8\,;10) = \mathbf{144,878}\ \text{MeV}$$

Con 9 neutroni centrali, abbiamo :

$$(9n) - \left[(2p+0d) + (6p+0d) + (0p+1d)\right]$$

l’energia di legame : $E_{ZN}(9\ ;\ 10) = \mathbf{147{,}867}$ MeV

è in perfetto accordo con il valore sperimentale.

Consideriamo infine il nucleo con $Z = \mathbf{10}$, che satura il secondo livello.
La configurazione più semplice risulta :

$$(10n) - \left[(2p + 0d) + (7p + 0d) + (1p + 0d)\right]$$

l’energia di legame : $E_{ZN}(10\ ;\ 10) = \mathbf{160{,}226}$ MeV

il valore sperimentale risulta $E_{ZN}(10\ ;\ 10) = \mathbf{160{,}930}$ MeV

$$(10n) - \left[(2p + 0d) + (6p + 1d) + (1p + 0d)\right]$$

l’energia di legame : $E_{ZN}(10\ ;\ 11) = \mathbf{172{,}814}$ MeV

$$(10n) - \left[(2p + 0d) + (6p + 1d) + (0p + 1d)\right]$$

l’energia di legame : $E_{ZN}(10\ ;\ 12) = \mathbf{179{,}645}$ MeV

Notiamo che la struttura del nucleo F_9^{19} , con il deutone sul terzo livello, anche se il secondo non è saturo, indica che il nucleo centrale formato da 9 neutroni è in lieve difetto per sostenere la struttura orbitale indicata, anche se il nucleo si presenta comunque stabile.
L’aggiunta di un protone in orbita dà origine all’isotopo Ne_{10}^{20} , il quale risulta ancora in difetto e quindi occupa il terzo livello senza saturare il secondo.

Alcune regole di validità generale verranno ricavate in seguito, considerando l’evoluzione in dettaglio dei processi che abbiamo descritto, con particolare riguardo alla **sintesi in volo dei deutoni in orbita e dei neutroni nucleari**, che sono i processi fondamentali di tutta la nucleosintesi.

803