– **Energia di legame e configurazione dei livelli nucleari del deutone**

Come ho già ricordato nel paragrafo P. 97.1 , la massa centrale che genera lo spazio rotante, sia atomico che nucleare, fornisce ad ogni livello lo stesso valore di energia potenziale di saturazione.
Le espressioni teoriche che si ricavano, con una trattazione semplificata, che considera solo il numero quantico principale, sono :

– per l'atomo : $$E_{0e}(Z) = 27.21139612\,\text{eV} \cdot Z^{\frac{2}{3}}$$

– per il nucleo : $$E_{0p}(Z) = 18{,}32\,\text{MeV} \cdot Z^{\frac{2}{3}} \cdot \left[1 - \frac{|Z-18|^{\frac{5}{4}}}{1200} \right]$$

Essendo il numero di elettroni che saturano il livello $n_e = 2 \cdot p^2$
l'energia che lega il singolo elettrone sull'orbita sarà :

$$E_{1e} = 13.60569806\,\text{eV} \cdot \frac{Z^{\frac{2}{3}}}{p^2}$$

Analogamente, per il singolo nucleone in orbita, si ottiene :

$$E_{1p} = 9.16\,\text{MeV} \cdot \left[1 - \frac{|Z-18|^{\frac{5}{4}}}{1200} \right] \cdot \frac{Z^{\frac{2}{3}}}{p^2}$$

A una transizione di una particella elementare dal livello p_1 al livello p_2 segue l'emissione dell'energia :

$$E_{1e} = 13.60569806\,\text{eV} \cdot Z^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{1}{p_2^2} - \frac{1}{p_1^2} \right)$$

oppure :

860r

$$\frac{1}{\lambda} = \mathbf{1.097373146 \cdot 10^{7}}\, \mathrm{m}^{-1} \cdot Z^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{1}{p_2^2} - \frac{1}{p_1^2} \right)$$

Con $Z = \mathbf{1}$ si ottiene lo spettro dell'idrogeno.
Per esempio, per l'ossigeno, con $Z = \mathbf{8}$, si ottiene :

$$\frac{1}{\lambda} = \mathbf{4.389492578 \cdot 10^{7}}\, \mathrm{m}^{-1} \cdot \left(\frac{1}{p_2^2} - \frac{1}{p_1^2} \right)$$

L'espressione dell'energia $E_0(Z)$ è stata ricavata ipotizzando la massa m_s , che genera lo spazio rotante, **immobile al centro** delle orbite.
Per soddisfare questa condizione è necessario che la massa della particella in orbita soddisfi la relazione $m_1 << m_s$, oppure che le particelle sulle orbite siano distribuite uniformemente.

Nella prima relazione, riferita alla fascia elettronica dell'atomo, essendo per elettrone e protone $m_e << m_p$, anche con $Z = \mathbf{1}$ la condizione è soddisfatta e quindi la relazione è applicabile anche all'atomo di idrogeno.

Nel nucleo atomico, la massa centrale, che genera lo spazio rotante nucleare, è formata da Z neutroni attivi e quella in orbita da Z particelle, in prevalenza protoni, con qualche deutone (per i dettagli si vedano i paragrafi P.$100 \div 217$).

In questo caso la immetria richiesta si può ottenere solo con Z **pari ed una distribuzione simmetrica delle masse in orbita**.

In tutti gli altri casi l'espressione fornisce un valore dell'energia associata alla particella in orbita maggiore di quella reale, in quanto non considera l'energia sottratta al nucleo dal moto della massa centrale.

Con l'espressione che abbiamo ricavato l'errore diventa picolo già per valori bassi di Z , **ma non e trascurabile per** $Z = \mathbf{1}$.
In questo caso abbiamo infatti due particelle aventi approssimativamente la stessa massa che orbitano attorno al comune centro di massa.
Rispetto al caso in cui una viene considerata ferma, la velocità di rivoluzione

860s

vale metà e quindi l'energia cinetica **1 / 4** . Dunque la relazione fornisce per $Z = 1$:

$$E_{1p} = \frac{1}{4} \cdot 9.16\,\text{MeV} \cdot \left[1 - \frac{|1-18|^{\frac{5}{4}}}{1200} \right] = 2.224126\,\text{MeV}$$

in ottimo accordo con il valore sperimentale $E_d = 2.22457\,\text{MeV}$.

Questo è naturalmente il valore dell'energia di legame **di un deutone libero**. Il deutone legato nel nucleo presenta un'energia di legame molto più elevata, in quanto si recupera l'energia associata al moto del neutrone, che si blocca al centro. A sostegno di questa situazione abbiamo le seguenti osservazioni.

– **nell'atomo di deuterio** l'energia di legame dell'unico elettrone presente in orbita si calcola ponendo $Z = 1$ e $p = 1$ nella relazione che abbiamo indicato e si ottiene $E_{1e}(1) = 13.606\,\text{eV}$, **con il nucleo fermo al centro**, come se sull'orbita ci fosse una distribuzione simmetrica di particelle.

Se uniamo due atomi di deuterio, otteniamo un sistema, ancora simmetrico, con un nucleo doppio, che genera uno spazio rotante doppio.
L'energia di legame di un elettrone si calcola ponendo nella stessa relazione $Z = 2$ e $p = 1$. Si ottiene così $E_{1e}(2) = 21.598\,\text{eV}$.
Raddoppiando il nucleo, l'energia di legame dell'elettrone in orbita aumenta secondo il rapporto $\dfrac{E_{1e}(2)}{E_{1e}(1)} = 2^{\frac{2}{3}} = 1.5874$.

Se ora consideriamo i nuclei degli stessi atomi, nel primo caso abbiamo al centro il deutone con il neutrone che rivoluisce, come il protone, che presenta un'energia di legame, **sperimentale**, uguale a $E_d = 2.22457\,\text{MeV}$.

Se non si considerano gli effetti della simmetria, raddoppiando il nucleo, ci si deve aspettare un'energia di legame, in approssimazione, uguale a :

$$E_{2d} \simeq 2^{\frac{2}{3}} \cdot 2.22457\,\text{MeV} = 3.5313\,\text{MeV}$$

Il risultato che si ottiene **sperimentalmente** è invece notevolmente diverso e

860t

coincide con quello che **si ricava con l'espressione teorica**, che considera il nucleo fermo al centro. Precisamente, si ha :

$$E_{1p}(2) = 9.16\,\text{MeV} \cdot \left[1 - \frac{|2-18|}{1200}^{\frac{5}{4}} \right] \cdot \frac{2^{\frac{2}{3}}}{1^2} = 14.1528\,\text{MeV}$$

Per tutto il nucleo, con i due protoni in orbita, l'energia di legame risulta :

$$E(2\,;\,2) = 2 \cdot 14.1528\,\text{MeV} = 28.3056\,\text{MeV}$$

coincidente con l'energia di legame del nucleo di elio.
Questo risultato ci dice che il nucleo, con il raddoppio del numero di deutoni, ha acquisito la simmetria che ha fermato i neutroni attivi al centro, con enorme recupero di energia di legame e dunque di stabilità.

Dunque, il nucleo con $Z = 2$, avente due neutroni attivi al centro e due protoni diametralmente opposti, in orbita sul primo livello, si comporta come se il singolo deutone avesse un'energia di legame uguale a :

$$E_{1p}(1) = 9.16\,\text{MeV} \cdot \left[1 - \frac{|1-18|}{1200}^{\frac{5}{4}} \right] \cdot \frac{1^{\frac{2}{3}}}{1^2} = 8.8965\,\text{MeV}$$

Alle stesse conclusioni si giunge se **al nucleo formato da un solo deutone si aggiunde un altro protone**.
In questo caso il neutrone attivo è ancora quello presente nel deutone iniziale e quindi lo spazio rotante nucleare non è cambiato. Il protone aggiunto va in orbita in posizione diametralmente opposta all'altro già presente, realizzando così una struttura simmetrica con il neutrone centrale fermo.

Non essendo cambiata la parte attiva del nucleo, se non viene considerato il recupero di energia dal neutrone, ci si deve aspettare un'energia di legame complessiva data da :

$$E_{He3}(2\,;\,1) < 2 \cdot E_d = 4.44914\,\text{MeV}$$

860u

Il segno $<$ perchè si ha un solo neutrone attivo che deve trattenere in orbita due protoni. Il legame è quindi più debole di quello della coppia n-p e quindi si realizza con uno spostamento dei due protoni a una maggiore distanza dal neutrone centrale.

In base a quanto abbiamo visto nell'Art. 24.2 trattando la stabilità dei sistemi legati, i due protoni non hanno energia sufficiente per restare in equilibrio su un'orbita e quindi percorrono una traiettoria ellittica, oscillando continuamente tra i livelli p_1 e p_2 , con semiasse maggiore coincidente con il raggio medio associato a $p = \mathbf{1.5}$.

Sperimentalmente si ottiene il valore $E_{He3} = \mathbf{7.7181}\,\text{MeV}$, perfettamente compatibile con quello che si ricava con relazione teorica con $Z = \mathbf{1}$ (per il nucleo Z rappresenta il numero di neutroni attivi centrali) e $p = \mathbf{1.5}$.
Si ha infatti :

$$E_{1p}(1) = \mathbf{9.16}\,\text{MeV} \cdot \left[\mathbf{1} - \frac{|\mathbf{1} - \mathbf{18}|^{\frac{5}{4}}}{\mathbf{1200}} \right] \cdot \frac{\mathbf{1}^{\frac{2}{3}}}{\mathbf{1.5}^{2}} = \mathbf{3.9540}\,\text{MeV}$$

e quindi, per i due protoni : $E_{He3}(2\,;\,1) = \mathbf{2} \cdot E_{1p}(1) = \mathbf{7.9080}\,\text{MeV}$
il linea con il valore sperimentale.

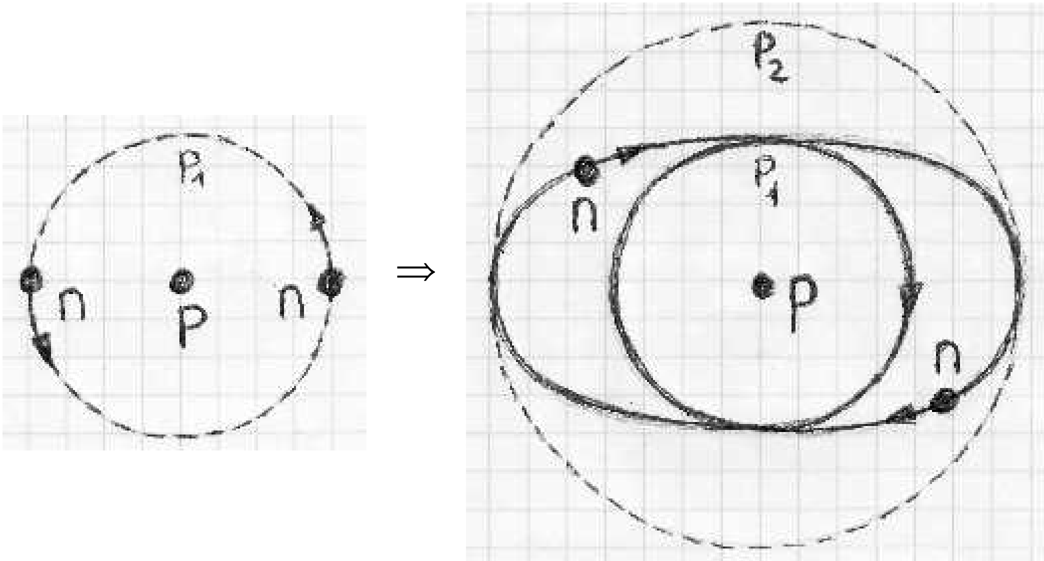
Anche questo caso dimostra che si ha un forte recupero di energia fermando il neutrone centrale.

Un'ulteriore conferma della presenza di questo meccanismo di recupero si ha aggiungendo al deutone un neutrone invece di un protone.
Se non si considera alcun recupero di energia, raddoppiando il numero dei neutroni attivi, ci si deve aspettare un'energia di legame

$$E_{H3} \simeq \mathbf{2}^{\frac{2}{3}} \cdot \mathbf{2.22457}\,\text{MeV} = \mathbf{3.5313}\,\text{MeV}$$

Il valore sperimentale che si ottiene è invece $E_{H3} = \mathbf{8.481821}\,\text{MeV}$.
Un valore così elevato è possibile solo con un recupero della simmetria. La sola possibilità di realizzarla è quella indicata in figura, con i due neutroni che si legano all'unico protone presente, tenendosi in posizioni diametralmente opposte.

860v



Da questa configurazione vediamo che sul protone agisce simultaneamente la forza di legame di **due neutroni attivi indipendenti**, dunque due nuclei aventi $Z = \mathbf{1}$, agenti in una condizione di perfetta simmetria. Considerando il protone centrale fermo, l'energia di legame attesa sarà :

$$E_{1p}(1) = \mathbf{9.16}\,\text{MeV} \cdot \left[\mathbf{1} - \frac{|\mathbf{1} - \mathbf{18}|^{\frac{5}{4}}}{\mathbf{1200}} \right] \cdot \frac{\mathbf{1}^{\frac{2}{3}}}{\mathbf{1}^{2}} = \mathbf{8.8965}\,\text{MeV}$$

$$E_{H3} = \mathbf{2} \cdot E_{1p}(1) = \mathbf{17.793}\,\text{MeV}.$$

Essendo questo valore circa il doppio di quello sperimentale, vuol dire che il legame **protone–neutrone** nel deutone, **anche in condizioni di simmetria** è più debole di quello associato al valore teorico $E_{1p}(1) = \mathbf{8.8965}$ MeV e quindi **un solo neutrone attivo non riesce** a trattenere un protone sul livello fondamentale $p = \mathbf{1}$.

come nel caso precedente dell'H_e^3 , i due neutroni si muovono su due orbite ellittiche, oscillando tra i livelli p_1 e p_2 , come è indicato in figura.
L'energia di legame teorica diventa quindi :

$$E_{H3}(1\,;\,2) = E_{He3}(2\,;\,1) = \mathbf{7.9080}\,\text{MeV}$$

860w

Questo risultato non concorda con il valore sperimentale. Confrontando però lo schema associato al trizio con quello dell'elio3 , vediamo che quest'ultimo si ottiene dal primo con la semplice sostituzione di uno dei due neutroni con un protone.

Per passare dall'elio al trizio si deve dunque sintetizzare il neutrone fornendo l'energia $E_n = \mathbf{0.782291}$ MeV alla coppia protone–elettrone, che espressione teorica che abbiamo indicato non considera.
L'energia di legame del trizio divente quindi :

$$E_{H3}(1\,;\,2) = E_{He3}(2\,;\,1) + E_n = \mathbf{8.6903}\ \text{MeV}$$

in buon accordo con il valore sperimentale.

Come abbiamo visto nell'articolo dedicato alla stabilità, Art. 24.2 , **anche se in maniera quasi impercettibile**, sia i protoni nell'elio che i neutroni nel trizio, muovendosi su orbite eccentriche, irradiano energia e questo crea, dopo un tempo di circa $\mathbf{12.32}$ a, le condizioni per la scissione spontanea del neutrone con la trasformazione in **He3** , con l'emissione dell'energia E_n.

In base a quanto abbiamo esposto, possiamo concludere che, considerando solo i livelli associati al numero quantico principale, il deutone libero ha una energia di legame molto bassa rispetto agli standard nucleari, calcolabili con l'espressione teorica, e quindi, se viene fornita energia per l'eccitazione, **si scinde prima di eccitarsi**.
Una indicazione del primo livello di eccitazione possiamo averla analizzando la configurazione nucleare dell'elio3.
Esso infatti è praticamente formato da un deutone che acquista una struttura simmetrica, **elevando molto la sua energia di legame**, e questo consente di spostare il protone sul livello $p = \mathbf{2}$. Il livello di energia associato si calcola mettendo nell'espressione teorica $Z = \mathbf{1}$ e $p = \mathbf{2}$. Si ha quindi

$$E_{1p}(1) = \mathbf{9.16}\ \text{MeV} \cdot \left[\mathbf{1} - \frac{\left|\mathbf{1} - \mathbf{18}\right|^{\frac{5}{4}}}{\mathbf{1200}} \right] \cdot \frac{\mathbf{1}^{\frac{2}{3}}}{\mathbf{2}^2} = \mathbf{2.224126}\ \text{MeV}$$

casualmente coincidente con l'energia di legame del deutone libero.

860x