

– Teoria e struttura del nucleo atomico, origine e funzione dei neutroni presenti del nucleo

Per poter applicare al nucleo atomico l'espressione della forza unificata che abbiamo ricavato nell'Art. 34, è necessario prima di tutto definire un modello di **nucleo coerente con la teoria degli spazi rotanti**, organizzato secondo i meccanismi previsti dalla teoria generale.

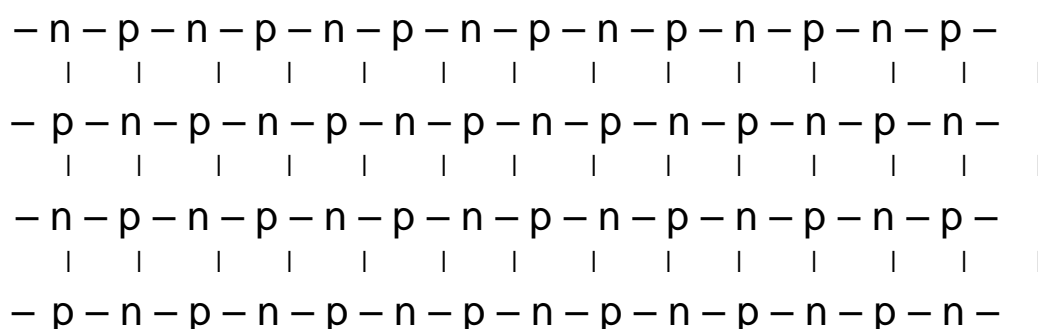
Abbiamo visto che il nucleo atomico è completamente definito dal numero di protoni Z , di neutroni N e dall'energia di legame E_{ZN} .

Questi valori vengono forniti tutti direttamente dall'osservazione sperimentale e quindi non siamo in grado di distinguere due nuclei che abbiano tutti e tre i valori coincidenti entro i limiti di errore associati agli esperimenti.

Qualunque sia il modello che viene proposto per descrivere un **aggregato di particelle diverse tra loro**, il primo problema che si pone è quello di definire la loro collocazione all'interno del volume occupato dall'aggregato.

Se immaginiamo le particelle con caratteristiche a simmetria sferica, tenendo presente che ciascuna di esse ha, nei confronti di tutte le altre appartenenti a un certo tipo, lo stesso comportamento, si deve pensare a una distribuzione uniforme di un tipo nell'altro e se ne ricava un aggregato che presenta ancora una simmetria sferica.

Questa distribuzione non crea nessun problema se il numero delle particelle presenti di ciascun tipo è lo stesso. Si ha infatti una serie di legami del tipo :



In questo caso sarà sufficiente ipotizzare che entrambe le particelle abbiano la capacità di legarsi stabilmente a più particelle dell'altro tipo, **caratteristica affatto intuitiva**, dal momento che, per esempio, il protone esaurisce la sua

capacità d'azione legandosi ad un solo elettrone, nonostante esso abbia una massa infinitamente più piccola.

La scelta del modello si complica ulteriormente se il numero di particelle dei due tipi è diverso, come accade nel nostro caso.

Si pone infatti in questo caso il problema di collocare le particelle in eccesso, che nel nostro caso sono neutroni.

La scelta più semplice sarà, naturalmente, una **distribuzione uniforme** nella matrice che è stata tracciata.

Dobbiamo decidere se legarli ai neutroni già presenti, ai protoni oppure ad entrambi, senza alcuna distinzione.

E' chiaro che la scelta non potrà essere arbitraria, ma deve tener conto delle osservazioni sperimentali alle quali il modello deve dare risposte. Riportiamo qui qualcuna delle più evidenti.

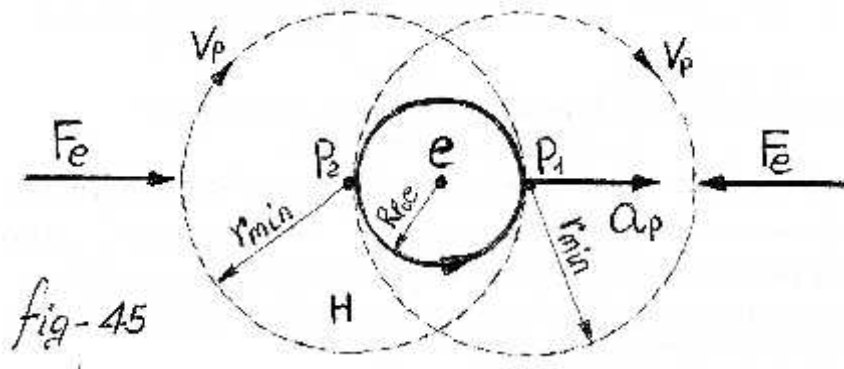
- negli isotopi naturali si ha sempre un eccesso di neutroni **e mai di protoni**
- contrariamente a quanto si potrebbe supporre, l'eccesso di neutroni, **e non di protoni**, crea instabilità nella struttura del nucleo
- l'eccesso di neutroni accettabile, per la stabilità, aumenta con le dimensioni del nucleo considerato secondo la relazione sperimentale :

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

- in natura non si hanno mai aggregati liberi del tipo $p-p$ oppure $n-n$
- i **legami semplici** che si osservano sono : $p-n$ (**deutone**) stabile ;
 $n-p-n$ (**trizio**) instabile ($T \approx 12,33$ anni) ; $p-n-p$ (**elio3**) stabile ;
 $2p-2n$ (**elio4**) molto stabile
- **in natura non si trovano neutroni liberi** e quando essi vengono prodotti, in un tempo di circa **13** minuti, si trasformano in protoni, liberando un elettrone.

Nel paragrafo P.72 , trattando la sintesi del deutone, abbiamo visto che due protoni, con una interazione diretta non sono in grado di formare **una coppia equilibrata**, ma, con l'intermediazione di un elettrone, "**normale o pesante**", analogamente a quanto si verifica per gli elettroni nell'atomo, è possibile il legame schematizzato in figura.

804b



Il sistema può essere visto come un atomo di idrogeno, che ha il suo spazio rotante $K_H = 1,1166806 \cdot 10^{-37} \frac{m^3}{sec^2}$, fermo, al quale viene avvicinato, con una forza esterna, un protone libero (oppure anche un altro atomo di idrogeno) .

Essendo l'elettrone una particella elementare, **le sue caratteristiche non si possono cambiare attraverso un'azione esterna e quindi la sua sfera rotante rimane costante** e vale sempre :

$$R_{P_0e} = 28,81989243 \cdot 10^{-15} \text{ m.}$$

Supponendo dunque di disporre della forza necessaria, la distanza minima che i due protoni possono raggiungere sarà :

$$r_{min} = 2 \cdot R_{P_0e} = 57.63978486 \cdot 10^{-15} \text{ m.}$$

Si forma così **il deutone**, che si presenta come aggregato stabile. Se però si allontana nuovamente un protone, l'aggregato che rimane del deutone iniziale, indicato come **neutrone**, si presenta instabile e dopo circa **13** minuti si divide liberando nuovamente il protone e l'elettrone.

In definitiva, il neutrone si presenta stabile solo se è legato a un protone nella struttura del deutone.

Subito dopo la separazione, durante la sua esistenza di **13** minuti, **il neutrone si presenta come aggregato globalmente neutro**, con uno spazio rotante assolutamente trascurabile (uguale a quello dell'atomo di idrogeno), dunque assolutamente incapace di esercitare **qualsiasi azione apprezzabile** nello spazio circostante.

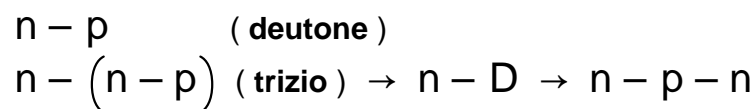
Proprio la sua **asimmetria**, che è causa di instabilità, se, prima che si divida,

viene riaccostato al protone, gli consente un orientamento che lo **polarizza**, legandolo in questo modo al protone, nonostante esso sia neutro.

Il deutone così formato entro un raggio ridotto mette in evidenza la sua natura di aggregato, con tutte le caratteristiche associate, mentre a grande distanza è praticamente indistinguibile dal protone, in quanto genera lo stesso spazio rotante K_p^2 .

Questo vuol dire che, se lo accostiamo ad un elettrone forma un atomo simile a quello dell'idrogeno.

Se invece lo avviciniamo ad un neutrone, formerà un aggregato simile al deutone, nel quale il protone viene sostituito dal deutone.



E' chiaro che **il neutrone aggiunto** in questo caso non potrà collocarsi alla distanza che avevamo nel deutone in presenza del solo protone, ma ad una distanza maggiore, con una minore energia di legame.

Nel sistema $n - D$ il deutone subisce un orientamento tale da portare a una struttura simmetrica con aumento dell'energia di legame che diventa uguale a $8.4818 \text{ MeV} \gg 2 \cdot 2.2246 \text{ MeV}$.

In definitiva la coppia $n - D$ risulta poco legata e quindi la distanza aumenta gradualmente fino a quando **il neutrone, sufficientemente libero, si divide trasformandosi in un protone ed un elettrone.**

Il protone rimane legato in una struttura simmetrica del tipo : $p - n - p$, stabile con energia di legame di 7.7181 MeV , mentre l'elettrone si allontana.

Secondo le teorie correnti, osservando le due configurazioni simmetriche del trizio e dell'elio3, il trizio dovrebbe presentare una maggiore stabilità rispetto all'elio3. L'esperienza dimostra esattamente il contrario.

Questo vuol dire che il neutrone nel nucleo atomico è stabile solo se è legato a un solo protone oppure a più protoni in una struttura simmetrica. Esistono infatti nuclei come, per esempio il $B_{\frac{5}{1}}^6$, che presentano un solo neutrone che

si lega, con una distribuzione simmetrica nello spazio, a molti protoni, senza scindersi.

Questi nuclei, **per altre ragioni**, si presentano comunque molto instabili.

Una conferma di questo fatto si può avere osservando che, se aggiungiamo un neutrone all'elio3, otteniamo una struttura molto stabile **con un aumento assolutamente straordinario dell'energia di legame**, che diventa uguale a $28.3 \text{ MeV} \gg 2 \cdot 7.7181 \text{ MeV}$.

Lo stesso risultato si ottiene se si aggiunge un protone al trizio. Questo vuol dire che anche in questo caso i due neutroni vanno a collocarsi al centro per creare una struttura simmetrica, con la massima stabilità.

Senza tener conto di queste osservazioni nel paragrafo P. 94 abbiamo visto che, non disponendo di un modello teorico coerente, il nucleo atomico viene trattato considerando un'analogia di comportamento con una goccia liquida e, con molti artifici, si ricavano **espressioni semiempiriche dell'energia di legame**, la più nota delle quali è quella di Weizsacker che però non dice nulla sulla struttura del nucleo.

Utilizzando lo schema suggerito dall'elio 3 e 4, possiamo ipotizzare un primo **modello di nucleo atomico analogo a quello che è stato ricavato per la fascia degli elettroni presenti alla periferia dell'atomo**.

Consideriamo quindi un nucleo centrale formato da Z neutroni che, essendo neutri, riescono ad avvicinarsi praticamente fino al contatto diretto, formando un aggregato molto compatto, legato a un ugual numero di protoni in moto su orbite distribuite nello spazio circostante.

Pur essendo i neutroni aggregati globalmente neutri, la polarizzazione che si genera ad opera dei protoni ad essi accoppiati, li rende capaci di generare uno spazio rotante che organizza la struttura del nucleo.

Con questo semplice modello è possibile immaginare di collocare i neutroni in eccesso sempre al centro, in modo da avere un nucleo centrale formato da N neutroni che generano uno spazio rotante nel quale si muovono Z protoni.

Avremo così lo spazio rotante nucleare $K_n^2(N)$ che dipende solo dal numero N dei neutroni presenti nel nucleo e l'energia di legame totale dipenderà dal numero Z dei protoni in equilibrio sulle sue orbite.

In base a questo schema, se si aggiunge al nucleo un neutrone, aumenta lo spazio rotante generato $K_n^2(N)$ e con esso l'energia di legame di ciascuna

particella in orbita, che ha un valore è uguale a metà dell'energia potenziale, quindi sarà espressa dalla relazione (pag. 611) :

$$E_1(N) = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_1^*}{R_p(N)} \cdot K_n^2(N)$$

Se invece nel nucleo si lascia invariato il numero dei neutroni e si aggiunge un protone in orbita, **lo spazio rotante non cambia** e quindi anche l'energia di legame di tutti i protoni in orbita rimane invariata.

In questo caso l'energia di legame del nucleo aumenterà solo dell'energia di legame del protone aggiunto.

Questo significa che l'aggiunta ripetuta di protoni dovrà dare sempre lo stesso aumento di energia fino alla completa saturazione dell'orbita associata al numero quantico, p con il numero di protoni $N_p = 2 \cdot p^2$. A questo punto il passaggio all'orbita successiva produrrà un incremento di energia molto più ridotto.

Per verificare il modello proposto consideriamo dunque i valori sperimentali degli incrementi dell'energia di legame che si ottengono con l'aggiunta di un protone oppure un neutrone.

I risultati che si ottengono sono **esattamente opposti** a quelli attesi (pag. 825 e seg.).

Per esemplificare riportiamo la pag.830 anche se i valori sono approssimati.

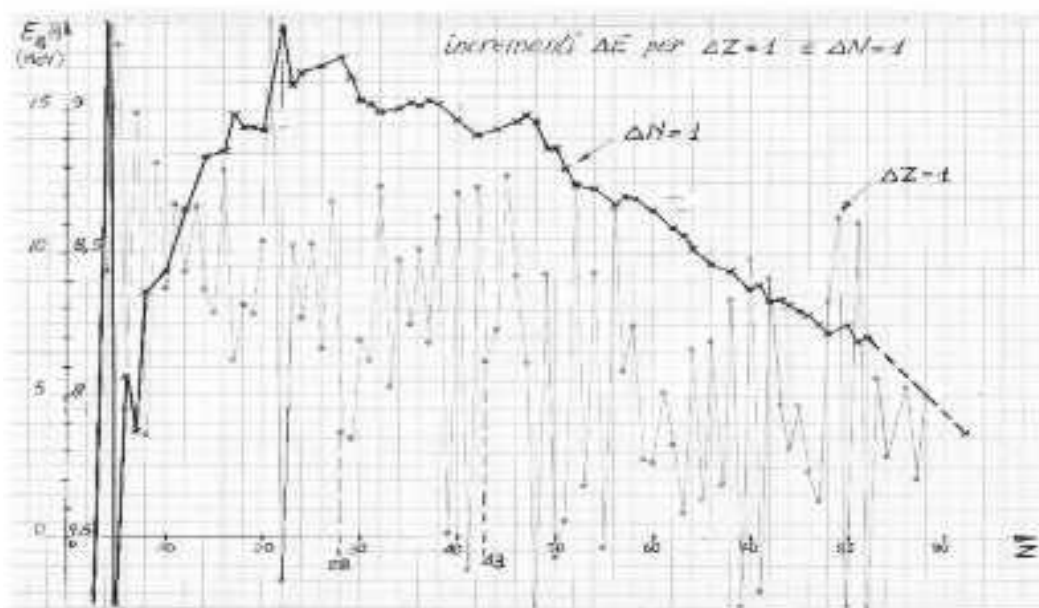
	Sa	abb.%	$E_{P_s(1)}$ MeV	E_{ZN} MeV	$m(A; Z)$
Ge_{32}^{72}	27,45		$\frac{8.990}{-}$	622. 233 32	71. 929 00
Ge_{32}^{73}	7,73		$\frac{8.9898}{-}$	631. 223 07	72. 928 02
Ge_{32}^{74}	36,67		$\frac{8.9898}{-}$	640. 212 82	73. 927 03
As_{33}^{75}			$\frac{-}{12.346}$	652. 558 91	74. 921 60
Se_{34}^{76}	9,36		$\frac{9.006}{5.2863}$	657. 845 20	75. 923 75
Se_{34}^{77}	7,63		$\frac{9.0056}{-}$	666. 850 78	76. 922 75
Se_{34}^{78}	23,78		$\frac{9.0056}{-}$	675. 856 37	77. 921 75
Se_{34}^{80}	49,61		$\frac{9.006}{-}$	693. 868 47	79. 919 74
Se_{34}^{82}	8,73		$\frac{9.0055}{-}$	711. 879 64	81. 917 73

804f

Aggiungendo ripetutamente neutroni con Z costante, si ottiene un incremento di energia praticamente costante per un certo numero di neutroni dipendente dal valore di Z .

L'aggiunta di un protone dà origine **sempre** a un incremento di energia molto variabile, apparentemente senza regole, qualunque sia il nucleo di partenza.

Se si riportano gli incrementi in funzione di Z su un diagramma cartesiano, si ottengono le curve riportate a pag. 845.



L'elevata irregolarità della curva che si ottiene con l'aggiunta di protoni, con le enormi differenze di incrementi che si registrano, anche solo passando da Z a $(Z + 1)$ e $(Z + 2)$, devono far pensare che all'interno del nucleo essi vadano a collocarsi in posizioni completamente diverse, oppure che il protone aggiunto crei una perturbazione tale dell'equilibrio nucleare da richiedere un importante adeguamento di tutta la struttura.

La prima ipotesi si deve escludere in quanto, nel nostro modello nucleare le posizioni possibili sono davvero limitate ; si tratta di saturare un'orbita e fino a quando non viene raggiunto il numero $2 \cdot p^2$, un protone aggiunto non può essere legato al nucleo centrale con energia molto diversa dal precedente.

L'unico modo per poter variare in maniera così rilevante l'energia di legame

con l'aggiunta di un solo protone è quello di fargli produrre una variazione del del valore dello spazio rotante centrale, che, modificando l'energia di legame di tutte le particelle in orbita, può richiedere un assestamento di tutto il nucleo.

La grande regolarità della curva associata all'aggiunta di neutroni dice invece che, variando Z essi occupano posizioni analoghe e producono incrementi dell'energia poco diversi.

Se Z è **costante** i neutroni aggiunti **producono addirittura un incremento costante** dell'energia di legame. Questo vuol dire che **vanno ad occupare posizioni assolutamente equivalenti**, dunque la stessa orbita.

In definitiva, la conclusione alla quale ci portano **le curve sperimentali** degli incrementi è che i protoni dovrebbero collocarsi al centro ed i neutroni sulle orbite. Esattamente **il contrario** di quanto avevamo previsto inizialmente.

Noi sappiamo però che, mentre i neutroni riescono a compattarsi nel centro perchè sono globalmente neutri, i protoni non possono farlo. Dunque ci troviamo, apparentemente, con la strada chiusa.

A questo punto notiamo che l'espressione dell'energia di legame del nucleo che abbiamo ricavato utilizzando il nostro modello è la seguente

$$E_{ZN}(N; Z) = E_0(N) \cdot \sum_1^{p_s} \frac{n_p}{2 \cdot p^2} = E_0(N) \cdot \alpha(Z)$$

con
$$E_0(N) = 17.793 \text{ MeV} \cdot N^{\frac{2}{3}}$$

con i neutroni al centro ed i protoni in orbita.

Secondo le curve sperimentali degli incrementi si dovrebbe invece porre :

$$E_{ZN}(Z; N) = E_0(Z) \cdot \sum_1^{p_s} \frac{n_n}{2 \cdot p^2} = E_0(Z) \cdot \alpha(N)$$

con
$$E_0(Z) = 17.793 \text{ MeV} \cdot Z^{\frac{2}{3}}$$

con i protoni nel centro e i neutroni in orbita.

804h

Confrontando i valori che si ottengono con il calcolo con quelli sperimentali, si vede che nel primo caso l'energia calcolata $E_{ZN}(N; Z)$ risulta maggiore del valore sperimentale, mentre nel secondo, con i protoni nel centro $E_{ZN}(Z; N)$ risulta minore.

Per i nuclei che hanno $N = Z$ il valore teorico risulta in accordo con il risultato sperimentale.

Questo vuol dire che il disaccordo, **in entrambi i casi**, nasce per una errata collocazione dei neutroni in eccesso rispetto al numero di protoni, in quanto, se si considerano solo le coppie $(p - n)$ polarizzate, si ottiene un risultato corretto.

Per i nuclei che presentano un eccesso di neutroni $I = N - Z$ bisognerebbe poter spostare i neutroni eccedenti sulle orbite, lasciando al centro un numero di neutroni attivi uguale a Z , in modo da ridurre il valore dello spazio rotante nucleare generato.

Si tratta quindi di verificare se questo spostamento risulta risolutivo e fattibile.

La variazione di energia di legame dovuta allo spostamento di un neutrone si ottiene differenziando l'espressione di $E_{ZN}(N; Z)$ con $\Delta N = 1$ e si ottiene :

$$\begin{aligned} \Delta E_{ZN}(N; Z) &= \alpha(Z) \cdot \Delta E_0(N) + E_0(N) \cdot \Delta \alpha(Z) = \\ &= \alpha(Z) \cdot \frac{2}{3} \cdot 17.793 \text{ MeV} \cdot N^{-\frac{1}{3}} + 17.793 \text{ MeV} \cdot N^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{1}{2 \cdot p_s^2} \end{aligned}$$

Sostituendo i valori numerici, si vede che l'energia di legame che si ottiene $E_{ZN}(N; Z) + \Delta E_{ZN}(N; Z)$ risulta minore del valore sperimentale.

In definitiva la situazione che si presenta è la seguente.

Abbiamo un nucleo $A(Z; N)$ e dobbiamo aggiungere un neutrone per avere il nucleo $A(Z; N+1)$. Se collochiamo il neutrone al centro, si ottiene un valore dell'energia di legame maggiore di quello sperimentale.

Se invece il neutrone viene aggiunto sulle orbite, l'energia di legame ottenuta risulta minore del valore richiesto.

Si deve ancora considerare il fatto che, mentre i protoni riescono a muoversi in equilibrio sulle orbite polarizzando i neutroni centrali, **i neutroni non sono in grado di farlo, in quanto sono globalmente neutri.**

Ricordando però che in orbita abbiamo già dei protoni, **il problema si potrà risolvere legando il neutrone aggiunto a un protone già presente.**

In pratica realizziamo una sintesi in volo di un deutone, in modo che il protone " trascini " sull'orbita il neutrone, che da solo non sarebbe capace di restarci.

E' chiaro che, con questa soluzione, all'aumento di energia di legame dovuto al raddoppio, circa, della massa della particella in orbita, si deve aggiungere l'energia di legame del deutone $E_D = 2.2246 \text{ MeV}$.

Questo però risolve il nostro problema, in quanto un **ulteriore aumento** della energia è proprio quello che serve per ottenere valori di energia di legame in accordo con quelli sperimentali.

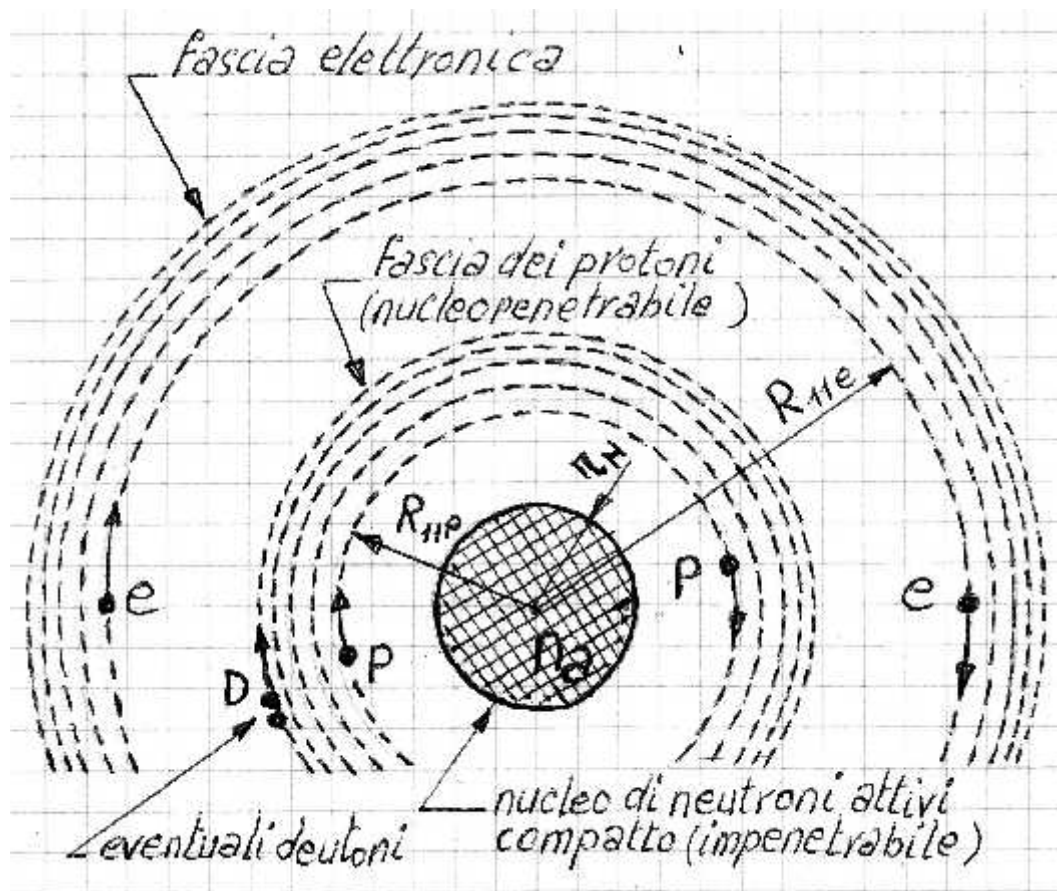
Se tutti i neutroni in eccesso sintetizzano deutoni e si fermano sulle orbite, il valore complessivo dell'energia di legame del nucleo sarà :

$$E_{ZN}(Z; N) = 17.793 \text{ MeV} \cdot Z^{\frac{2}{3}} \cdot \sum_1^{p_s} \frac{n_n}{2 \cdot p^2} + 2.2246 \text{ MeV} \cdot (N - Z)$$

I valori numerici che si ottengono con questa espressione risultano in perfetto accordo con quelli sperimentali.

E' però da notare che **l'ultimo termine dell'energia di legame** non fornisce alcun contributo alla stabilità del nucleo, in quanto **non rafforza il legame tra le particelle in orbita con il nucleo centrale**, ma serve solo per compattare gli aggregati sulle orbite. Anzi, vedremo in seguito che il suo basso valore è causa di instabilità di tipo β .

A questo punto siamo in grado di tracciare **un modello definitivo** del nucleo atomico come in figura, coerente con le osservazioni sperimentali e con la teoria degli spazi rotanti e questo, come vedremo nell'articolo seguente, ci consentirà di **estendere la validità dell'espressione della forza unificata** che abbiamo ricavato nell'Art. 34 , **anche al nucleo atomico.**



Se si indica con r_0 il valore del raggio della sfera che "viene occupata" da un nucleone, il raggio del nucleo formato da A nucleoni risulterà :

$$r_A = \left(\frac{6}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot r_0 \cdot A^{\frac{1}{3}}$$

Nell'Art. 34 abbiamo visto che, per il protone, la prima orbita raggiungibile, e dunque il massimo accostamento possibile, risulta

$$r_{1p} = \frac{K_p^2}{C_1^2} = 2.81794092 \cdot 10^{-15} \text{m}$$

Essendo neutri, i neutroni nel nucleo centrale compatto si avvicinano fino alla

804m

minima distanza possibile. Se dunque assumiamo il valore r_{1p} valido anche per i neutroni, nel nucleo centrale ciascuno di essi occuperà una sfera avente raggio uguale a :

$$r_n = \frac{r_{1p}}{2} = 1.40897046 \cdot 10^{-15} \text{m}$$

Il raggio del **nucleo atomico centrale**, "**compatto ed impenetrabile**", di un atomo di numero atomico Z vale quindi :

$$r_{nz} = \left(\frac{6}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{r_{1p}}{2} \cdot Z^{\frac{1}{3}} = 1.748111033 \cdot 10^{-15} \text{m} \cdot Z^{\frac{1}{3}}$$

Facciamo notare che, nel modello che abbiamo ricavato, in nucleo atomico è formato da una sfera avente **un raggio massimo** uguale a quello dell'ultima orbita occupata dai protoni in moto nello spazio rotante nucleare.

Questa sfera racchiude all'interno tutti gli $A = Z + N$ nucleoni ed è quello che normalmente si considera come nucleo atomico.

E' facile capire che **nelle prove di scattering** la distanza minima dal centro che la particella proiettile potrà raggiungere sarà uguale al raggio del nucleo impenetrabile r_{nz} .

E' per questa ragione che, normalmente, per il nucleo atomico, viene proposta la relazione, verificata sperimentalmente :

$$r_A = R_0 \cdot A^{\frac{1}{3}} \quad \text{con} \quad R_0 \simeq (1,2 \div 1,4) \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

che coincide praticamente con quella che **abbiamo ricavato teoricamente per il nucleo centrale compatto**.

Ricordiamo infatti che, sperimentalmente, si verifica la relazione :

$$Z = \frac{A}{1,98 + 0,015 \cdot A^{\frac{2}{3}}} \simeq \frac{A}{2}$$

che, sostituita nell'espressione del raggio, fornisce :

804n

$$\begin{aligned}
r_{nz} &= \left(\frac{6}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{r_{1p}}{2} \cdot Z^{\frac{1}{3}} \simeq \left(\frac{6}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{r_{1p}}{2} \cdot \\
&\left(\frac{A}{2} \right)^{\frac{1}{3}} = \\
&= \left(\frac{6}{\pi \cdot 2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{r_{1p}}{2} \cdot A^{\frac{1}{3}} \simeq 1.387 \cdot 10^{-15} \text{ m} \cdot A^{\frac{1}{3}}
\end{aligned}$$

L'intero nucleo atomico ha dunque dimensioni molto più elevate di quelle che vengono rilevate sperimentalmente. La parte esterna non viene però rilevata perchè, essendo penetrabile, viene facilmente attraversata dai proiettili che vengono utilizzati nelle prove.

Vedremo però, nel prossimo capitolo, come, con la presenza di questa parte non compatta del nucleo, **si giustificano tutti i suoi comportamenti**, che si osservano sperimentalmente, e si rendono possibili le trasmutazioni a bassa temperatura, che i modelli correnti non riescono a giustificare.