

SOMIGLIANZE E DIFFERENZE NELLA STRUTTURA DI ATOMI E NUCLEI

Questa è la mia risposta a una domanda comparsa su Quora:

La distribuzione di neutroni e protoni in un nucleo atomico è in qualche modo analoga a quella degli elettroni attorno al nucleo? Come varia al variare del numero atomico e di quello di massa? Esistono anche qui dei livelli energetici?

La domanda è in tre parti, e una risposta completa richiederebbe un trattato (elementare) di fisica nucleare. In ogni caso è più semplice rispondere alle domande in ordine inverso.

Risposta breve:

III. I livelli energetici esistono anche per i nuclei.

Esiste una imponente mole di dati sulla spettroscopia nucleare, la cui ovvia interpretazione richiede l'esistenza di livelli energetici. Le prime righe di emissione di radiazione gamma, e quindi i primi indizi dell'esistenza di livelli energetici, furono osservate un decennio prima della scoperta del nucleo.

Moltiplicatisi i mezzi di indagine, soprattutto con acceleratori artificiali (**Van de Graaff, 1929; Cockroft-Walton, 1932**), si vennero analizzando gli spettri e quindi le strutture dei nuclei, producendo carte che contengono almeno decine di livelli per ogni nuclide.

A titolo di esempio, in Fig. 1 riporto il diagramma di p.593, del testo di *R. Leighton, Principles of Modern Physics, 1959*, in cui è concentrato tutto quello che si sapeva sessant'anni fa del nucleo N(14) fino a circa 14 MeV dallo stato fondamentale.

Penso che si possa affermare con sicurezza che i livelli di energia nei nuclei esistono.

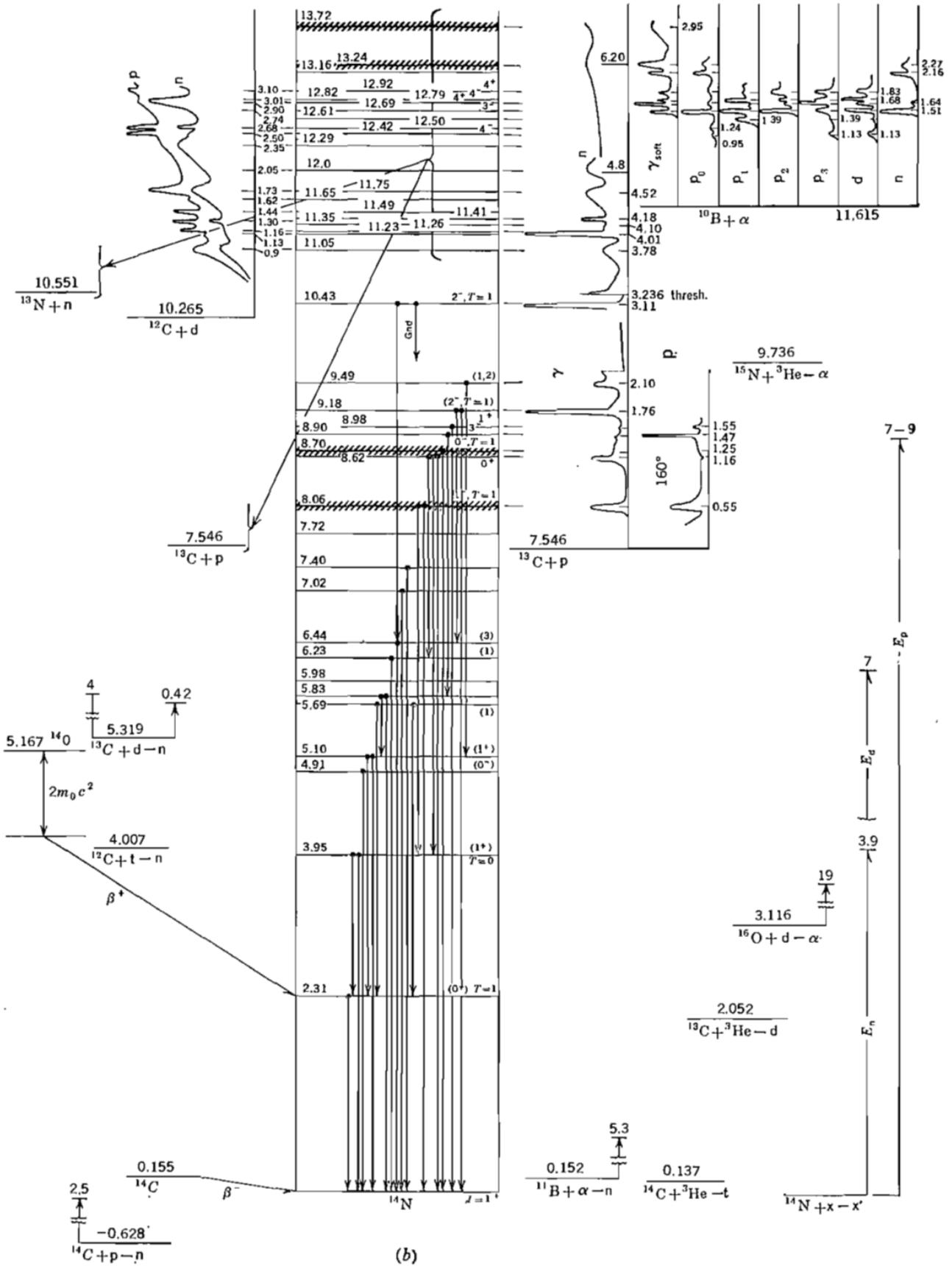


FIG. 17-8. (Continued)

Fig.1:

Schema dei livelli energetici del nuclide N(14)

Per dare un'idea della distribuzione dei livelli energetici di cui parliamo, riporto la tavola XVII.3, pag 589 del testo di R. Leighton, *Principles of Modern Physics*, 1959).

Spaziatura media dei livelli energetici nucleari

	$E_{\text{exc}} \approx 0$	$E_{\text{exc}} \approx 8 \text{ MeV}$	$E_{\text{exo}} \approx 15 \text{ MeV}$
$A \approx 10$	$\sim 10^6 \text{ eV}$	$\sim 10^4\text{--}10^5 \text{ eV}$	$\sim 10^3 \text{ eV}$
$A \approx 150$	$\sim 10^5 \text{ eV}$	$\sim 10\text{--}100 \text{ eV}$	$\sim 10^{-2}\text{--}1 \text{ eV}$

TAV. I:

Le spaziature sono date per energie del livello eccitato (1) vicino allo stato fondamentale, (2) vicino all'energia di legame dell'"ultimo" nucleone; (3) ben al di sopra di questo livello. I raggi Gamma emessi in una transizione fra livelli in ciascuna di queste regioni hanno energie che sono multipli della spaziatura fra livelli.

A è il numero di nucleoni presenti nel nucleo.

II. *La distribuzione dei nucleoni varia a seconda del modello.* Esistono risultati sperimentali, accumulatisi nel tempo, che sembrano indicare che nel nucleo i nucleoni sono distribuiti in gusci (o shell) e che determinati shell, o gusci, o livelli energetici "completi" mostrano simili proprietà. Si notò sperimentalmente che nuclei in cui Z (numero di protoni) o N (numero di neutroni) sono eguali a **6, 14, 28, 50, 82, 126...**

- hanno una maggiore energia di legame
- sono più stabili degli altri (qualcosa di simile ai gas nobili in chimica),
- sono più abbondanti in natura,
- hanno più isotopi (stesso Z) o più isotoni (stesso N)
- sembrano indicare che il guscio o livello energetico a cui corrispondono è totalmente occupato, per cui è separato dal livello nucleare superiore più vicino da un intervallo maggiore della media.
- hanno bassi valori del quadrupolo elettrico, corrispondenti a una forma più sferica.

Di qui nasce l'idea che un nucleo abbia una struttura affine a quella dell'atomo. Si potrebbe eventualmente pensare alla formazione di "molecole nucleari". Tuttavia, il concetto dell'esistenza di "molecole nucleari", anche se tutt'ora in vita **(1)**, non fu accettato al punto di creare una tavola come quella di Mendelejev. Si preferì invece costruire altre tavole (come quella di Segre) che riguardano la stabilità dei nuclei in funzione del numero di protoni (Z) e del numero di Neutroni (N), e i modi di decadimento dei nuclei instabili.

I. *La risposta dipende da quanto si vuol spingere l'analogia.* Nell'atomo, gli elettroni hanno carica elettrostatica negativa, opposta a quella del nucleo che, grazie alla forza attrattiva che ne nasce, crea quello che almeno nei modelli più rozzi è rappresentato come una sorta di sistema planetario. Nel nucleo i protoni hanno carica elettrostatica positiva e i neutroni carica zero, ma questo fatto sembra essere poco importante. Si pensava anzi che sussistesse una certa democrazia nucleonica, nel senso che non ci sono nucleoni nobili centrali e altri reietti alla periferia. Ora si dubita di questo, almeno nel contesto del modello a shell, di cui parleremo (vedi le Conclusioni). Era del resto noto che i nuclei che hanno uno o due nucleoni più del numero magico hanno proprietà che fanno pensare che ci siano dei nucleoni periferici almeno temporaneamente. Questo, evidentemente, rende il nucleo più simile all'atomo.

Risposta lunga.

III. Esistono anche qui dei livelli energetici?

La risposta breve è "SI".

L'esistenza di livelli energetici nei nuclei è nota da tempo, in certo senso fin da prima della scoperta del nucleo, *ciò che rende impossibile assegnarne la scoperta a un solo scienziato.* Si veda la Tav.I

Tav. I: Cronologia delle **scoperte essenziali per giungere al concetto di livello di energia.**

- 1885 : **Balmer** scopre che le lunghezze d'onda λ di quattro righe ben visibili nello spettro ottico solare seguono una formula che lui diede come

$$\lambda = B \frac{m^2}{m^2 - 4}$$

dove B è una costante da lui calcolata, e m è un numero intero maggiore di 2.

Queste quattro righe sono solo l'inizio di una serie di righe, a cui fu dato il nome di Serie di Balmer.

- 1888: **Rydberg** generalizza la formula di Balmer nella più nota:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

In cui $R(H)$ è la costante di Rydberg per l'idrogeno, e n , per la cosiddetta "serie (di righe) di Balmer", valeva 2. La formula di Rydberg vale per altre serie di righe, sempre dell'idrogeno, con diversi valori di n . Vale sempre $m > n$.

- 1895: **Roentgen** scopre i raggi X
- 1895: **Becquerel** scopre la radioattività
- 1896: **J.J. Thomson** scopre l'elettrone e dà le prime misure di massa e carica del medesimo.

- 1900: **M. Planck** introduce la costante omonima, che stabilisce il legame tra frequenza e energia della radiazione elettromagnetica.
- 1900 **P. Villard** scopre radiazione gamma dal Radium (studiandone la radiazione Beta, elettroni), ma non le dà un nome.
- 1903: **E. Rutherford** scopre la radiazione di Villard concomitante con la radiazione Alfa, e la battezza radiazione Gamma
- 1907: **Rutherford** e collaboratori identificano le particelle Alfa con nuclei di Elio (si noti che a quel tempo non si conosceva ancora l'esistenza del neutrone, scoperto nel 1932)
- 1908, esperimento di **H. W. Geiger** e **E. Marsden**, che verrà correttamente interpretato da Rutherford nel 1911.
- 1911: **Rutherford** chiarisce che l'esperimento di **Geiger** e **Marsden** evidenzia l'esistenza di un nucleo atomico. Ne nasce il modello atomico corrente, costituito da un nucleo centrale con un raggio circa dieci-centomila volte più piccolo della nuvola di elettroni che lo circonda.
- 1913: **N. Bohr** propone il suo modello atomico, con elettroni in moto su diverse orbite stabili intorno al nucleo, con energie diverse, fissate dalle regole di quantizzazione. Gli elettroni possono saltare da un'orbita a un'altra assorbendo o emettendo radiazione di frequenza (e quindi, energia) pari alla differenza di energia delle due orbite, che divengono così "livelli energetici". Con questo vengono spiegate le righe spettrali dell'idrogeno, serie di Balmer e altre.
- 1922-23 **A. Compton** dimostra la natura duale della luce, corpuscolare oltre che ondulatoria.

Da questo elenco incompleto di scoperte essenziali per giungere al concetto di livello energetico si vede come questo concetto non si sia imposto linearmente nel tempo. Tuttavia, in pratica, si vede come esso si sia affermato a partire dal modello di Bohr dell'atomo nucleare (1913), e dal concetto di natura duale (ondulatoria e corpuscolare) della radiazione elettromagnetica. Una volta stabilito il concetto, si poterono ri-interpretare risultati precedenti, tra i quali le righe di emissione Gamma di Villard e Rutherford, che, avendo energie ben definite, lasciavano intuire che corrispondessero alla diseccitazione di opportuni livelli energetici dell'"atomo", in realtà del nucleo (il quale, come tale, fu studiato solo in seguito). Inoltre, una volta inventati gli acceleratori di particelle (**Van de Graaff, 1929**) che permettevano di bombardare i nuclei, e quindi di portarli a uno stato eccitato, la spettroscopia nucleare divenne lo strumento per eccellenza per scoprire le proprietà dei nuclei.

Ad ogni modo, che il genere umano abbia riconosciuto con cammino più o meno lungo e tortuoso l'esistenza di livelli di energia nel nucleo non ha nulla a che vedere col fatto che essi esistano o meno. La loro esistenza è da circa un secolo l'opinione generale dei fisici nucleari.

A questo si può aggiungere che l'esistenza dei livelli energetici nel nucleo ha aiutato molto alla costruzione dei modelli nucleari, assicurando in fin dei conti che anche il nucleo segue la meccanica quantistica, nel senso che, da un punto di vista matematico, "un sistema legato prevede sempre dei livelli energetici" e un nucleo è un sistema "legato" per definizione, altrimenti i nucleoni se ne andrebbero ciascuno per proprio conto (una

spiegazione intuitiva della connessione stati legati -livelli energetici è data nel testo dello Schiff, *Quantum Mechanics*, 1960, § 8).

Per quanto riguarda la **spaziatura media dei livelli nucleari** (da cui si possono dedurre le energie tipiche dei raggi gamma dovuti a transizioni fra livelli), si veda la Tav.I, data nella "Risposta breve".

La Fig.1 rappresenta le conoscenze che si avevano del nucleo di N(14) circa sessant'anni fa. Come si vede, il diagramma è estremamente compatto, e rivela una fenomenologia estremamente ricca.

In effetti, *la spettroscopia nucleare è assai più complicata di quella atomica*, che pure non scherza. Ma le transizioni tra livelli energetici atomici riguardano usualmente un solo atomo, mentre la radioattività, che assume molte forme, riguarda nuclei di elementi diversi trasmutati l'uno nell'altro. Detto A il numero di nucleoni, Z il numero di protoni, N il numero di neutroni (questi furono scoperti da **Chadwick** nel 1932) con $A = N+Z$, le tre forme di radioattività inizialmente individuate da Rutherford agiscono nel seguente modo

(Tav.II):

Tipo di radioattività su nucleo con valori A, Z, N	Effetto su A, N, Z
Alfa	A-4, N-2, Z-2
Beta	A, N-1, Z+1
Gamma	A, N, Z

Quindi, solo la radioattività Gamma lascia apparentemente invariato il nuclide. La radiazione Gamma può avvenire immediatamente dopo l'eccitazione di un nucleo (anche solo 10^{-12} s), ma può anche attendere a lungo: abbiamo così il fenomeno di un nucleo in uno stato metastabile, che viene detto isomero (la scoperta dell'isomeria nucleare è attribuita a **Otto Hahn**, 1921; la spiegazione teorica a **Weizsäcker**, 1936). In breve, due nuclei sono detti isomeri (dal greco: "che hanno parti eguali") se hanno eguali A, N, Z.

E qui incontriamo un fenomeno notevole: si sa che il Tantalio-180 (Z=73, A= 180) ha una piccola percentuale (0.012%) di un isomero metastabile (= quasi stabile) il cui decadimento non è mai stato osservato. Come si fa a sapere che non può essere classificato come un nuclide stabile? Perché si sa da altre misure che si trova in un livello eccitato, e prima o poi un nucleo in un livello eccitato *deve decadere* nello stato di minima energia.

Se la vita media è quella valutata dall'ottobre 2016, di $45 \cdot 10^{15}$ anni, bisognerà aspettare un pezzo (la vita dell'universo è stata fin qui circa $1.3 \cdot 10^{10}$ anni...). Resta un bel problema, quello di spiegare come questo straordinario nucleo si sia formato. Forse nell'esplosione di una supernova? In quanto al motivo della sua lunga vita, si pensa che alla base della spiegazione ci sia la conservazione del momento angolare, nel senso che esperimenti indicano che lo stato eccitato metastabile del nucleo ha momento angolare

("spin") = 9, e i due soli livelli più bassi hanno spin rispettivamente 2 e 1. Quindi lo stato metastabile deve scaricare in un colpo almeno sette unità di momento angolare, il che (facendo gli opportuni calcoli) risulta estremamente improbabile: un fotone, di suo, ha spin =1. Come se non bastasse, dalla sua struttura ci si aspetta che, oltre all'emissione Gamma, Ta 180-m possa decadere in altri due modi trasformandosi in Tungsteno 180 per decadimento beta, o in Hafnio 180 per cattura elettronica, decadimento proprio dello stato fondamentale con vita media o emivita di circa 8 ore. Ma non si è mai osservato un solo decadimento di Ta 180m per una delle tre vie possibili. Si tratta di un esempio fisico di un personaggio di Kipling, the *Cat who walked by himself* ("il Gatto che se ne andava sempre solo").



Fig.2

Tantalio 180-m nel ruolo del "Gatto che se ne andava sempre solo" e se ne va diritto per la sua strada (disegno originale di R. Kipling).

II. Come varia la distribuzione di neutroni e protoni in un nucleo atomico al variare del numero atomico e di quello di massa?

I nuclei si comportano in modo assai diverso dagli atomi. Essi possono trasmutarsi l'uno nell'altro, secondo certe regole; due nuclei possono fondersi in un nucleo con A, N, Z dati (almeno in primo tempo) dalla somma delle componenti; un nucleo può subire il fenomeno della fissione.

In un primo tempo si pensò che in effetti potessero formarsi "Molecole nucleari" (1), formate da due nuclei legati insieme, ciascuno dei quali mantiene la propria individualità.

Gli studi sul soggetto continuano, ma non vanno oltre la predizione di nuclei esistenti o loro isotopi di breve vita. Una tavola come quella del sistema periodico di Mendelejev non esiste. Anche se certe proprietà dei nuclei, specie in vicinanza dei cosiddetti “numeri magici” sono simili, una vera periodicità delle proprietà dei nuclei non esiste.

Esiste però da tempo una “mappa dei nuclidi” secondo i numeri Z e N (la cui somma è A). Essa risponde alla seconda parte della domanda “*Come varia la distribuzione di neutroni e protoni in un nucleo atomico al variare del numero atomico e di quello di massa?*” ed è nota anche come “Mappa (o carta) di E. Segre”, anche se fu pubblicata per la prima volta da **K. Guggenheimer** nel 1934, e può essere arricchita di infiniti dettagli, come si può vedere dalle diverse versioni esistenti in rete. Il numero di nuclidi inclusi nella mappa varia non solo in base alla data di compilazione della medesima e alle scoperte fatte fra un’edizione e l’altra, ma anche in base alla vita media del nuclide in questione. Si può, per esempio stabilire di escludere i nuclidi la cui vita media è inferiore a un giorno, o a un secondo eccetera. Considerare solo i nuclei stabili eliminerebbe lo studio nei nuclidi vicini, un brulicare di decadimenti e transizioni di nuclidi di cui si conosce più o meno perfettamente l’esistenza. Non considerare questo mare di vita sarebbe un poco come studiare la vita umana usando come unico strumento di studio un cimitero.

Come si vede, i tipi di decadimento non sono più soltanto i tre tipi di Rutherford. Tuttavia, si possono riscontrare alcune regolarità.

Note alla Fig.3

Anzitutto in figura i **nuclidi stabili sono colorati in nero**, e formano una linea quasi continua con relativamente pochi nuclidi, 92. Secondo me, **spiegare perché i nuclidi stabili sono solo 92 è la prima e più importante sfida proposta dalla carta di Segre** (o chi per esso).

I nuclidi che hanno eguale Z e diverso N (cioè sono in colonna) sono detti “isotopi”, mentre quelli che hanno eguale N e diverso Z (cioè sono in riga) sono detti “isotoni”. Ma la maggior parte dei nuclidi occupa un’area oblunga detta “vallata di stabilità”. Il nome “vallata” indica la concezione abituale dei fisici che lo stato di equilibrio stabile sia il più basso e quindi i nuclidi stabili occupino il fondo della valle, qui indicato appunto dalla loro linea, un po’ spezzata, nera.

Per bassi valori di N e di Z si vede che le pendici estreme per N inferiore a quello del fondo della valle possono decadere per **perdita diretta di protoni** (colore rosso).

Viceversa, un nucleo che avesse troppi neutroni, si libererebbe direttamente dei neutroni di troppo (colore violetto) nelle pendici estreme al di sopra del fondo valle. Questo, solo in casi estremi. In generale, la maggioranza dei nuclidi che hanno troppo pochi neutroni decade per emissione di positroni (=elettroni negativi) da parte di protoni, o, *assai più*

frequentemente, per **cattura di un elettrone**, per lo più dell'atomo stesso da parte di un protone (colore arancione). I nuclei che hanno troppi neutroni decadono per emissione di elettroni da parte di neutroni (colore indaco). Entrambi questi tipi decadimenti sono detti “**decadimenti Beta** (rispettivamente positivi o negativi)”

Ad esempio, perdendo un positrone, il nuclide trasforma un protone in un neutrone: Z diminuisce di 1, N aumenta di 1. Va notato che l'emissione di un positrone da un nucleo, in seguito alla conversione di un protone in un neutrone, è osservata assai di rado in natura, in genere indotta da collisioni con raggi cosmici. Un decadimento su 100000 del Potassio(40) avviene spontaneamente per emissione di un positrone. D'altra parte, la trasformazione di un protone in un neutrone tramite emissione di un positrone, non va confusa col favoleggiato “decadimento del protone”, previsto nel 1967 da **A. Sakharov**. Qui il protone dovrebbe decadere in particelle più leggere, pioni e positroni. Si è calcolato che la vita media del protone per questo tipo di decadimento sia almeno $1.64 \cdot 10^{34}$ anni.

Possiamo quindi continuare la Tav II::

Tipo di radioattività su nucleo con valori A, Z, N	Effetto su A, Z, N
Emissione di positroni o cattura di elettroni (arancio)	A, N+1, Z-1
Emissione di elettroni (indaco)	A, N-1, Z+1
Perdita o sgocciolamento di protoni, <i>proton drip</i> (rosso)	A-1, N, Z-1
Perdita o sgocciolamento di neutroni, <i>neutron drip</i> (violetto)	A-1, N-1, Z

In ogni caso, i nuclidi instabili rotolano verso il fondo-valle.

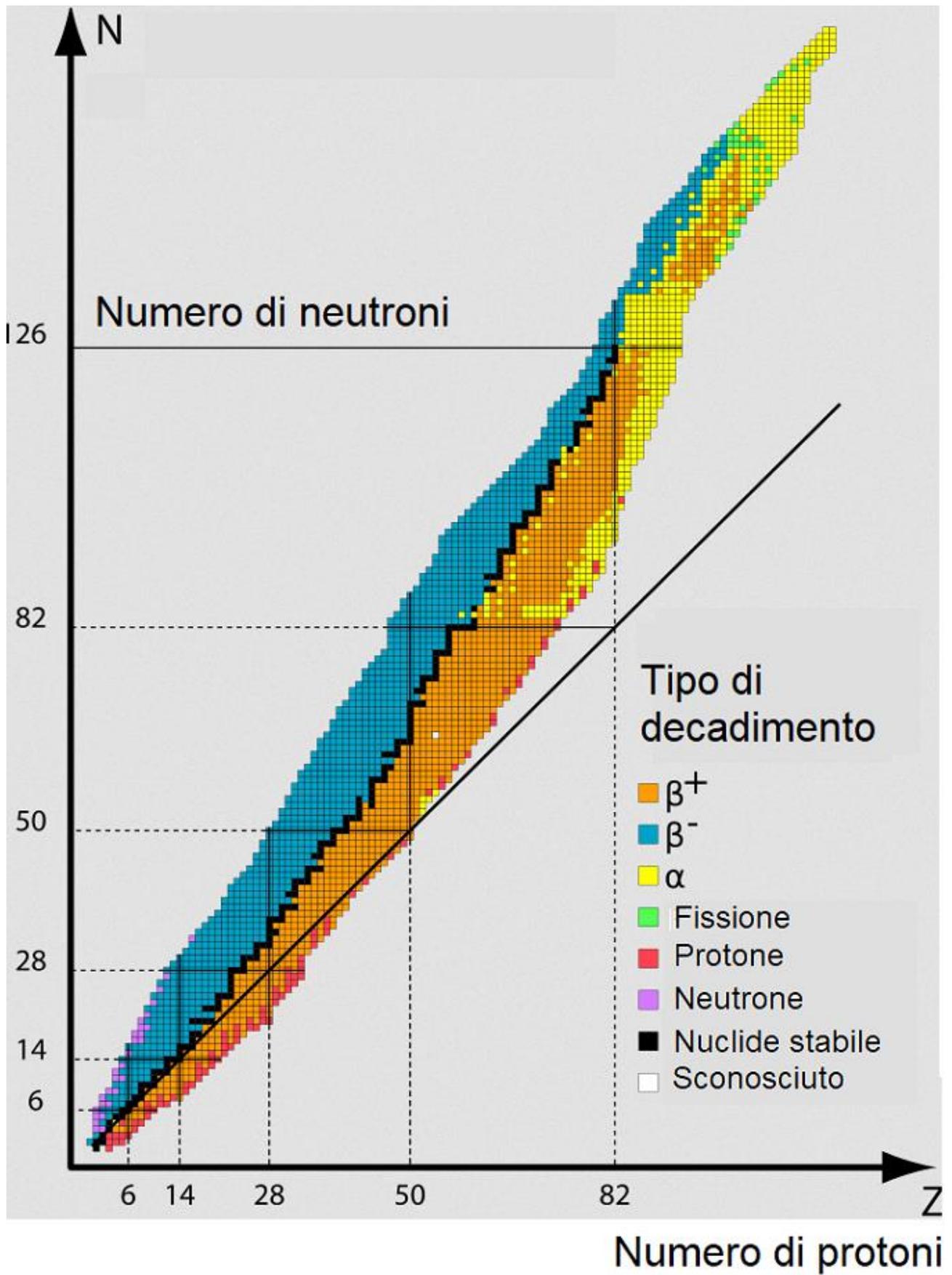


Fig.3: Carta dei nuclidi detta di Segre. (Sono indicati i numeri magici. I nuclidi con $N=6, Z=6$; $N=14, Z=14$; $Z=82, N=126$ sono doppiamente magici)

La fissione (color verde, in alto a destra, scoperta da **Hahn e Strassmann** nel 1938) spezza un nucleo in due nuclei, di solito abbastanza differenti in A , N , Z l'uno dall'altro. Questa dissimmetria fu spiegata alquanto tardi, e fu uno dei successi del *modello nucleare a gusci* rispetto al *modello a goccia*, che prevedeva che il nucleo originale si fendesse in due nuclei più o meno eguali. Vedremo brevemente più avanti entrambi i modelli. Per quanto riguarda la scoperta della fissione, non è improbabile che Hahn e Strassmann fossero stati preceduti dal gruppo di Fermi fin dal 1934 (bombardamento di Torio e Uranio con neutroni "lenti"). Fermi e i suoi inizialmente pensavano di aver ottenuto per primi la creazione di elementi trans-uranici, ovvero di elementi con un numero atomico superiore a quello dell'uranio, battezzati *Ausonio e Esperio* (da due nomi antichi dell'Italia). La notizia fu subito pubblicata sotto pressione politica, con scarso entusiasmo di Fermi che riteneva i risultati non ancora maturi. Aveva ragione: in realtà il suo gruppo aveva ottenuto per primo la fissione del nucleo e non se ne era accorto. Forse per questo motivo la scoperta non fu rivendicata da Fermi e dal suo gruppo.

Nella tavola sono segnate alcune linee (rispettivamente orizzontali e verticali) che corrispondono, per N e per Z , ai "**numeri magici**" **6, 14, 28, 50, 82**. Possiamo aggiungere con certezza anche il **126**, e forse il 184. Molti altri "numeri magici" sono stati proposti. (L'introduzione del termine "numeri magici" è attribuita a **E. Wigner**. Pare che l'aggettivo "magici" significasse non solo la loro importanza, ma anche la loro inspiegabilità).

Nuclei che presentano numeri magici di neutroni o protoni o entrambi sarebbero assai più strettamente **legati**, e quindi sono più **stabili** o almeno con vita media più lunga dei vicini, e quindi più **abbondanti** in natura, di quelli con numero non magico di nucleoni. Inoltre hanno un maggior numero di isotopi e isotoni. Si riconoscono dei segmenti verticali o orizzontali presenti nella riga nera di stabilità in Fig. 3. (Nuclidi per i quali tanto N quanto Z corrispondono a un numero magico sono detti "**doppiamente magici**", e, come ci si può attendere, sono nuclidi ancora più stabili di quelli magici solo in N o Z)

Inoltre, le proprietà dei nuclei che presentano valori di N e Z dati da un **numero magico più uno** hanno alcune proprietà affini tra loro.

La spiegazione dei "numeri magici" per mezzo del modello a gusci è forse il principale motivo per cui questo modello si affermò, come vedremo nella successiva sezione. In seguito, una messe di altre osservazioni e predizioni rafforzò le basi del modello.

Alcuni fisici pensano che nuclei con particolare stabilità (quanto meno con emivite o vite medie lunghe) possano ancora esistere lungo la "vallata di stabilità", per valori molto elevati di N e Z . Per uno di questi più o meno ipotetici raggruppamenti, il fisico **Seaborg** promosse il nome marittimo di "isola di stabilità", invece di quello montano di "conca di stabilità", secondo me più coerente con la vallata. La (ipotetica) conca o isola che sia,

appare come in figura 3, e prolungherebbe la regione di stabilità verso Nord-Est (in Fig. 3).

Comunque, una cosa è chiara: se esistono **92 elementi stabili**, che creano l'intera varietà della chimica e della biologia, e con la loro struttura elettronica danno vita alla tavola di Mendelejev, il motivo risiede nella stabilità dei **nuclei**, che ne determina il numero. Lo studio della stabilità dei nuclei è quindi uno studio di interesse generale e della massima importanza.

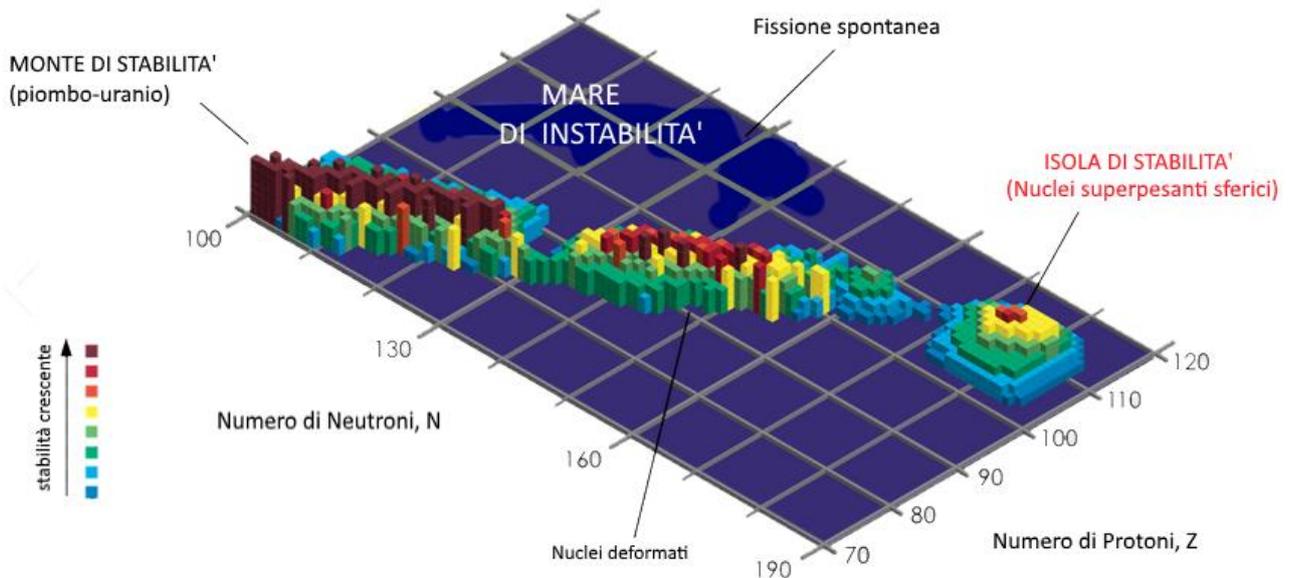


Fig. 4

Dalla figura si vede come la stabilità o meno di un nucleo sia considerata una differenza quantitativa (quanto a lungo può sopravvivere un nucleo?) piuttosto che qualitativa (il nucleo è stabile o instabile?)

I. "La distribuzione di neutroni e protoni in un nucleo atomico è in qualche modo analoga a quella degli elettroni attorno al nucleo?"

La risposta a questa prima parte della domanda, dipende

(a) dal modello nucleare che si adotta;

(b) da fin dove si vuole spingere l'analogia, cioè fino a che punto ci si spinge con la locuzione "in qualche modo".

Anzitutto, si vede subito che la principale analogia non pare sussistere: l'atomo è costituito da un nucleo positivo che esercita una forza elettrostatica "centrale", a lungo raggio (potenzialmente infinito) sugli elettroni, tutto sommato di forma analitica assai semplice. Matematicamente, almeno l'atomo dell'idrogeno e degli atomi idrogenoidi (ioni

che hanno conservato un solo elettrone), è trattabile, e ci dà utili informazioni sugli altri elementi. Il nucleo invece è composto da particelle (nucleoni) che sono protoni positivi e neutroni neutri. La forza elettrostatica, che pure è assai intensa a distanze così ravvicinate, gioca dunque al massimo un ruolo di disturbo nel nucleo, che deve essere in qualche modo tenuto insieme da interazioni assai più forti. Come è tenuto insieme il nucleo? Esiste un nucleo del nucleo?

Concetto di modello.

In generale, in fisica, se la rappresentazione completa di un oggetto fisico nuovo presenta una fenomenologia a cui non siamo avvezzi, per avere un'idea di questo oggetto in termini della fisica a noi nota, siamo costretti a ricorrere a una rappresentazione parziale basata su quello che sappiamo, cioè a un **"modello"**. Occorre restare avvertiti: se si parla di modello, vuol dire che la spiegazione della realtà che diamo in termini di esso non è ancora considerata come conclusiva. Se emergono proprietà non incluse nel modello, occorre tentare di adattarlo. Se le nuove proprietà sono incompatibili col modello, abbiamo due vie: (1) si abbandona il modello e non se ne parla più, se non nei libri di storia della scienza; (2) si utilizza il modello solo nel contesto delle proprietà che esso spiega meglio. Il modello (a *"plumcake"*) dell'atomo di Thomson fu abbandonato quasi subito quando Rutherford propose il suo modello, mentre, nel caso del nucleo, il modello a goccia e il modello a gusci (shell) convivono ancora.

Per una trentina d'anni, a partire dal 1932, anno della scoperta del neutrone, si seguirono due filoni paralleli di ricerca sul nucleo. Il primo studiava con vari metodi le proprietà globali dei nuclei; l'altro invece cercava di definire la natura delle forze che legano due nucleoni, sperando di poter risalire di lì alla forza che tiene insieme un nucleo contenente decine o centinaia di nucleoni. A questo scopo gli studi si concentrarono da principio sul sistema a due nucleoni, protone-protone, neutrone-neutrone (dineutrone), protone - neutrone o deuterone. L'unico esistente in natura è l'ultimo, gli altri due essendo instabili.

Questo semplicissimo nucleo da un lato rivelò *"troppo"*, dall'altro *"troppo poco"*. Non solo, ma oggi si pensa che l'approccio non sia del tutto corretto, nel senso che modelli più avanzati richiedono che si consideri anche l'interazione di tre nucleoni come tale, non derivabile dalle tre interazioni fra le possibili coppie.

In quanto al *"troppo"*, fu presto chiaro che le forze che legavano neutrone e protone erano assai più complicate della forza elettrostatica. Erano forze indipendenti dalla carica elettrica delle particelle coinvolte, non erano forze centrali, erano forze tensoriali, che dipendevano dall'orientamento relativo degli spin delle due particelle, erano forze di scambio **(2)**, e potevano dipendere dal momento relativo delle due particelle.

Presentavano un corto raggio di attrazione ($1.5 \cdot 10^{-15} \text{m}$), e un ancor più corto raggio, $0.7 \cdot 10^{-15} \text{m}$, di repulsione (che è quello che dà una dimensione al nucleone). Questa

repulsione si intende che sorga dal principio di esclusione di Pauli, che impedisce a due particelle identiche di occupare lo stesso stato quantico.

D'altra parte il deutone diceva troppo poco sugli altri nuclei, in quanto esso possiede un solo livello di energia, e nessun decadimento gamma, oltre al fatto che non potrebbe illuminarci sulle forze che agiscono direttamente fra tre o più nucleoni.

https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_force

Tre modelli nucleari

Il classico Blatt & Weisskopf (*Nuclear Physics*, 1952) elenca una dozzina di modelli e loro varianti). Su Wikipedia, che viene una sessantina d'anni dopo, i modelli si sono moltiplicati e le varianti complicate. Io citerò tre modelli, il primo (*modello a particelle α*) perché è il più antico, il secondo (*modello a goccia*) perché, pur avendo novant'anni e manchevolezze ben note, è di facile uso, e, soprattutto, ha posto le basi del successo del terzo *modello, a gusci* ("shell").

1) Modello a Particelle Alfa.

Senza elencare i vari modelli, proprietà, pregi e difetti, vale la pena menzionare il primo modello, il modello a particelle alfa (Rutherford): evidentemente – si pensava - se vi sono dei nuclei che emettono particelle alfa, vuol dire che i nuclei contengono particelle alfa. Questo concetto si dimostrò nel tempo largamente erroneo. Il nucleo emette elettroni, ma non contiene gli elettroni fra i suoi elementi costitutivi; un neutrone decade in un elettrone e neutrini, ma normalmente non contiene né gli uni né gli altri; in una collisione, due particelle ne producono altre, ma non per questo le "contengono". Il modello a particelle alfa spiegava alcuni fenomeni nucleari, per esempio il fatto che i numeri magici (per N e per Z) noti assai per tempo, erano tutti pari. A parer mio la critica più importante fu che c'erano evidenze che la particella alfa si formasse immediatamente prima dell'emissione. Ovviamente, se la particella alfa si forma "subito prima" di lasciare il nucleo, non si può dire che esso sia costituito da particelle alfa.

2) Modello a Goccia

Nonostante alcuni dati nucleari mostrassero una certa analogia con il modello dell'atomo di Bohr, i primi modelli del nucleo *rinunciarono* a vedere pure il nucleo atomico come un micro-sistema planetario. **Gamow**, nel 1929, introdusse il modello a goccia di liquido, in cui, appunto, *il nucleo era considerato come una goccia di liquido uniforme di alta densità* (10^{14} g/cm³) rotante. Bohr stesso, e Wheeler in seguito (1939) utilizzarono il modello per

spiegare la fissione nucleare. *Inutile dire che, se questo modello prevalesse tutt'ora, non potremmo dire che il nucleo presenta analogia con l'atomo.*

Il risultato principale del modello fu quello di produrre (Weiszaecker, 1935) una semplice **formula semi-empirica per la massa** di un nucleo di dati A e Z (=numero di protoni; $A-Z=N$, numero di neutroni), che si applica a valori di A superiori a 20 circa. La massa del nucleo evidentemente non può essere eguale o superiore alla somma delle masse dei neutroni e dei protoni: se la massa del nucleo fosse tale, o maggiore, la differenza fra essa e la somma delle masse dei nucleoni, grazie alla formula $E=mc^2$, sarebbe identificabile con una energia cinetica, che permetterebbe ai nucleoni di abbandonare il nucleo. Grazie alla medesima formula di Einstein ($E = mc^2$) si può dire che la massa mancante è data dall'energia necessaria a "legare il nucleo" (diviso c^2). Il calcolo della massa del nucleo e quello dell'*energia di legame* sono quindi equivalenti.

Nella forma classica, la formula è data da cinque termini, che dipendono da A e Z (o N). La forma della dipendenza da A e Z (o N) di ogni termine è data dalla teoria, mentre il coefficiente è dato da opportuni esperimenti, ciò che spiega il termine "semi-empirica". Il punto di partenza sperimentale, in seguito giustificato teoricamente, fu che si trovò che l'energia di legame "dell'ultimo nucleone" per "numero di massa A" compreso tra 20 e 200 era compresa fra 8 e 9 MeV per nucleone. Il modello a goccia, di fatto, non si applica bene per valori di A inferiori a circa 20.

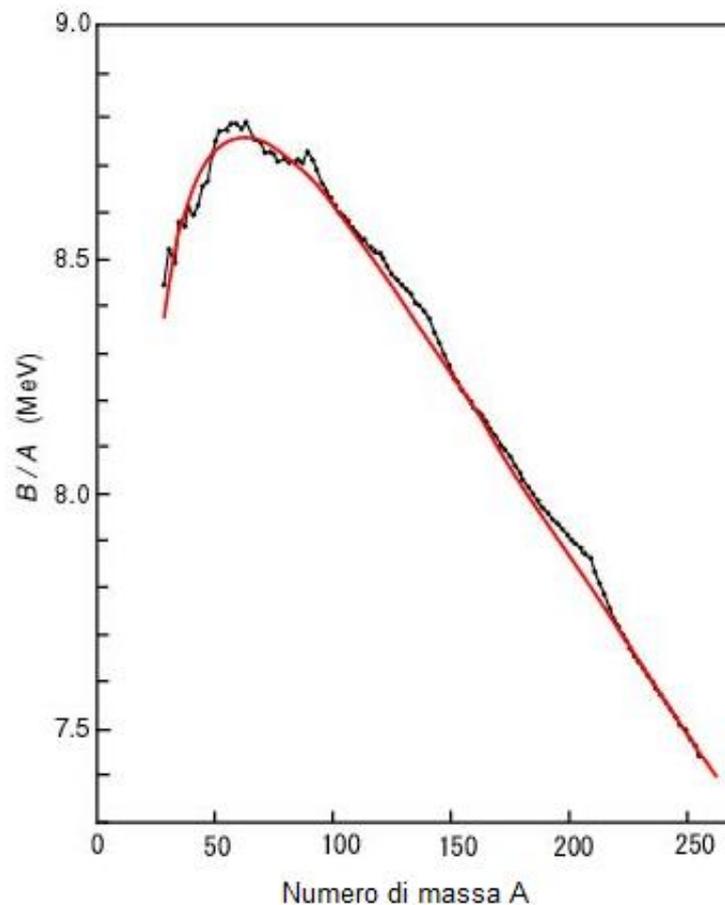


Fig.5

Differenza fra l'energia di legame per nucleone misurata sperimentalmente (linea nera) e quella data dal modello a goccia (linea rossa). La scala verticale è molto dilatata. Si notano le maggiori differenze nelle zone corrispondenti a 28, 50, 82. **Nondimeno, si vede come il modello a goccia dia un'idea corretta dell'energia di legame totale di un nucleo.**

La formula non è solo utile per calcolare con buona precisione la massa di un nucleo, ma permette svariate deduzioni, per le quali si può leggere utilmente

https://en.wikipedia.org/wiki/Semi-empirical_mass_formula

La versione italiana non dà esempi delle applicazioni, quali la deduzione del rapporto ideale N/Z, dato A, e quindi il valore di Z ideale (cioè *l'elemento più stabile dato A*), nonché l'energia liberata in caso di disintegrazione di un nucleo e applicazioni affini.

Particolarmente utili sono le applicazioni della formula semi-empirica di massa all'analisi della stabilità e instabilità dei nuclei, quali la stabilità dei nuclei rispetto al decadimento α e il calcolo della "barriera di fissione" per un nucleo contro la "fissione spontanea".

Mettendo insieme quel che il modello a goccia ci dice, possiamo dedurre perché i nuclei stabili terminino "tra Z= 90 e 100". Fermi (*Nuclear physics, 1949*) afferma che *l'energia di legame di una particella α (l'energia con cui una particella α è legata al nucleo) è data da*

$$\text{Energia di legame } (\alpha) = M(A-4, Z-2) + \text{massa della particella } \alpha - M(A, Z)$$

in cui il primo e l'ultimo termine sono determinati dalla formula semiempirica. Questa energia diviene negativa (non lega più la particella) verso la metà della tavola del sistema periodico, molto prima di raggiungere la zona in cui si trovano gli elementi che emettono particelle α naturalmente. Nondimeno gli elementi intermedi sono stabili per decadimento α solo perché le energie delle particelle α sono così basse, che le vite medie sono proibitivamente lunghe (3). La tavola del sistema periodico termina nella regione Z = 90-100 a causa del crescente valore negativo dell'energia di legame rispetto a decadimento α e fissione. Si vede infatti dalla Fig.3 che la linea di elementi stabili, in nero, si arresta in una zona gialla, di decadimento α , che è quindi la causa principale dell'esistenza di 92 elementi stabili e non di più.

E con questo, il modello a goccia ha risposto a un importante problema che riguarda fisica, chimica e biologia. Non male per un modello ormai quasi abbandonato.

Tuttavia, vennero presto fatte notare due manchevolezze del modello.

1) Il modello a goccia ebbe il merito di spiegare la fissione nucleare di nuclei con A molto grande (vedi Fig.2): la goccia può entrare in uno stato eccitato, sia provocato spontaneamente (per rotazione o vibrazione) o provocato dall'esterno (basta per questo l'urto di un neutrone lento). In tali casi l'eccitazione potrebbe essere sufficiente a

provocare la scissione della goccia in due gocce *più o meno eguali*. **Qui sta il problema.** Assai raramente la fissione avviene in due parti eguali. Per esempio, l'Uranio (A circa 240) tende a spezzarsi in due frammenti (A circa 90 e A circa 150). Si trovò che non c'era modo di spiegare questo fenomeno tramite il modello a goccia o sue varianti.

2) (Più importante) Il modello non spiega perché l'energia di legame sia assai maggiore di quella prevista dal modello a goccia quando N o Z hanno particolari valori, i cosiddetti **numeri magici (6, 14, 28, 50, 82, 126...)**, che (come già riferito nella "risposta breve") comportano maggior stabilità, maggior numero di isotopi (o isotoni), maggior abbondanza nell'Universo. Inoltre presentano un momento di quadrupolo elettrico vicino allo zero, che suggerisce che il nucleo sia sferico. Infine, occorre maggior energia di eccitazione per passare da un livello di energia che corrisponde a un numero magico al livello successivo.

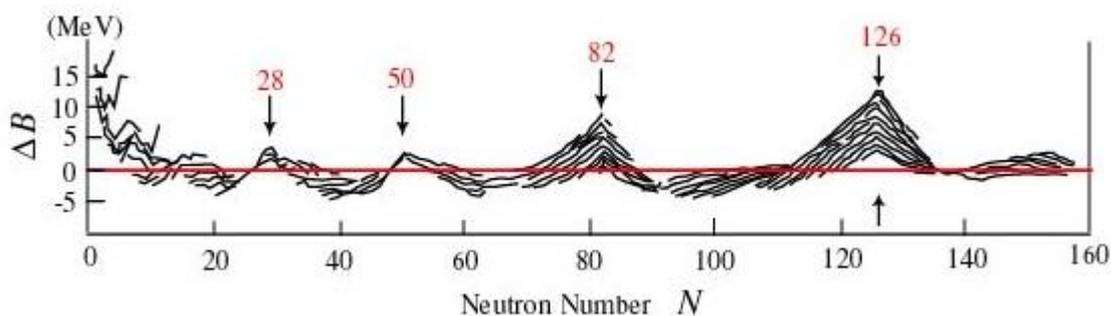


Fig.6

Differenza fra energia di legame totale (non per nucleone) e il risultato calcolato per il modello a goccia. Le curve sono date per vari nuclei che hanno lo stesso valore di N (e diverso Z).

Entrambe le figure, 5 e 6, sono tratte da http://ne.phys.kyushu-u.ac.jp/seminar/MicroWorld3_E/3Part2_E/3P24_E/liquid_drop_model_E.htm

Negli anni Quaranta venne fatto un notevole sforzo per spiegare in qualche modo i numeri magici. Essi indicavano che il modello a goccia non era sufficiente, e nuovi modelli andavano esplorati. Erano a quel tempo, in certo modo, la sfida della fisica nucleare.

La via più ovvia era, naturalmente, ispirarsi al modello di Bohr per l'atomo. I "numeri magici" dell'atomo (in pratica, i numeri atomici dei gas nobili), non assomigliavano a quelli dei nuclei (per gli atomi: **2, 10, 19, 36, 54, 86**), ma non ci si aspettava tanto.

Modello a gusci (shell)

Il primo modello a gusci pare sia stato proposto da **D. Ivanenko** (insieme a **E. Gapon**) nel 1932. Il modello fu sviluppato nel 1949 in seguito a lavori indipendenti di diversi fisici, in particolare **E. P. Wigner, M. Goeppert Mayer e H. Jensen**, che condivisero il Premio Nobel per la fisica del 1963.

Naturalmente si usarono i mezzi che si avevano a disposizione, cioè l'equazione di Schroedinger, come nell'atomo (il che - fortunatamente - era reso possibile dal fatto che vari esperimenti mostravano che il moto dei nucleoni era non relativistico).

Una prima difficoltà la si aveva col fatto che era difficile immaginare nucleoni che si muovessero praticamente liberi in un nucleo estremamente compatto e denso. Il cammino libero medio di un nucleone in tale situazione sarebbe una frazione di un'orbita. Questa difficoltà venne risolta osservando che, se il nucleo può essere rappresentato come un gas di Fermi, con tutti i livelli di bassa energia già occupati, un nucleone sarebbe "obbligato" a muoversi perché non può occupare alcuno stato già occupato, in base al principio di esclusione di Pauli.

Una seconda difficoltà è che nell'atomo c'è un nucleo praticamente puntiforme di carica positiva che crea un sistema legato, che genera livelli energetici. Ma una domanda si presenta subito: Che cosa c'è nel nucleo che svolge le funzioni del nucleo atomico dell'atomo? Qual è, per così dire, il nucleo del nucleo? Risposta: il campo creato dagli altri nucleoni, campo attrattivo a somiglianza di quello elettrostatico dell'atomo di idrogeno. Ma, come si è notato, le forze che legano i vari nucleoni sono talmente complicate, che si venne alla conclusione che la più semplice approssimazione di questo campo che lega i nucleoni nel nucleo fosse una semplice "buca di potenziale" (4). Il ragionamento è semplice: un nucleone è legato al nucleo. Ciò significa che quando ne raggiungesse il contorno sarebbe respinto da una forza. Questo non è altro che l'effetto di una buca di potenziale: una biglia confinata in una scatola sferica, urtandone una parete, sentirebbe l'effetto di una forza impulsiva che la respingerebbe e non ne permetterebbe l'uscita.

Ora, qualsiasi buca di potenziale che crea un sistema legato crea allo stesso tempo un sistema di livelli energetici. Ogni livello energetico, che in tre dimensioni comparirebbe come una sorta di guscio, dovrebbe prevedere anche un numero di occupazione (come i livelli energetici nell'atomo) e, quando tutti i posti fossero occupati, il nucleo, come l'atomo, dovrebbe quanto meno presentare maggiore stabilità, ciò che è l'origine del numero magico.

Ma, così pensarono i pionieri del modello a gusci, allora non importa quale sia l'origine e neppure la forma esatta della buca di potenziale. Si prenda un singolo nucleone (puntiforme per comodità), lo si ponga in una buca di potenziale generata dagli altri nucleoni e si risolva il problema mediante l'equazione di Schroedinger. Si fecero dapprima tentativi con diverse buche di potenziale tridimensionali che presentassero un problema matematicamente solubile. Queste non sono molte: l'oscillatore armonico e la buca "quadrata" (a simmetria sferica) erano due che furono tentate. Qualche parametro era noto dall'esperimento, gli altri sarebbero stati adattati in modo di dare le risposte giuste, lasciando a un tempo successivo l'interpretazione della forma del potenziale.

Il problema fu quindi risolto per mezzo dell'equazione di Schroedinger, e si trovò che entrambi i tipi di buca e altri ancora producevano ciascuno i suoi livelli energetici, ma nessuno produceva i numeri magici noti.

Fu il successo di Maria Goeppert Mayer e di Hansen, quello di dimostrare che i numeri magici previsti erano dovuti a un effetto noto dalla fisica atomica, il cosiddetto accoppiamento spin-orbita, che sdoppiava i livelli energetici, e li spostava l'uno verso le basse e l'altro verso le alte energie. Lo spostamento era sufficiente a produrre raggruppamenti di livelli di simile energia con un numero di posti tale da produrre i numeri magici desiderati.

La (grossolana) spiegazione dell'effetto spin-orbita per l'atomo è che l'elettrone (in un dato livello energetico) nel suo sistema di riferimento vede il nucleo ruotargli intorno con momento angolare ℓ , che per l'elettrone si traduce in un momento magnetico μ . Inoltre, l'elettrone possiede un suo proprio spin (1/2), con momento magnetico associato. L'interazione dei due momenti magnetici si traduce nello sdoppiamento del livello energetico in due livelli, rispettivamente proporzionali a $\ell + 1/2$ e $\ell - 1/2$. Una volta separati, i due livelli possono contenere un solo nucleone ciascuno.

Wikipedia, nelle sue varie edizioni, sembra restia ad assegnare dei valori all'energia di spin-orbita, anche solo come ordini di grandezza), pur dando la forma da cui si possono calcolare. Ad ogni modo, l'interazione di spin-orbita nell'atomo di idrogeno produce sdoppiamenti dell'ordine di 10^{-3} eV (un millesimo degli intervalli fra livelli di energia dell'idrogeno, che sono dell'ordine di qualche eV).

Se così fosse anche nel nucleo, l'effetto dell'accoppiamento spin-orbita sarebbe trascurabile. Ma il termine di accoppiamento dipende dal rapporto μ^2/r^3 dove, nell'atomo, μ è il momento magnetico dell'elettrone, e nel nucleo è il momento magnetico del nucleone, 1000 volte più piccolo di quello dell'elettrone; r sono le dimensioni dell'atomo e del nucleo (da 10^4 a 10^5 volte più piccolo dell'atomo). Nell'atomo l'effetto spin-orbita produce sdoppiamenti di qualche millieV. Nel nucleo, l'effetto spin orbita produce quindi separazioni dell'ordine di 10^6 - 10^8 volte superiori, cioè dell'ordine di decine o centinaia di KeV.

Il termine $\ell + 1/2$ (momenti magnetici paralleli) ha il valore più basso in energia.

Note alla Fig. 7

A scopo dimostrativo vorrei dimostrare come si possa lavorare su un modello a buca di potenziale in modo da ottenere i numeri magici. Per questo mi riferisco a una vecchia illustrazione tratta dal libro già citato, di R. Leighton, *Principles of Modern Physics*, 1959). La fonte è del 1953.

Nella seguente figura la colonna A rappresenta i livelli di energia dell'oscillatore armonico; la colonna B i livelli energetici di una buca quadrata a pareti infinite *in tre dimensioni*. Entrambi queste buche sono a pareti infinite, e quindi poco realistiche, soprattutto per i livelli d'energia più alti. La colonna C rappresenta i livelli energetici di una buca quadrata a pareti finite in tre dimensioni, la colonna D presenta i livelli di una buca quadrata, ma con gli spigoli *opportunamente* arrotondati. Infine la colonna E presenta l'effetto dell'accoppiamento spin-orbita.

La prima colonna presenta i livelli energetici dell'oscillatore armonico unidimensionale. I momenti angolari compaiono a partire dalla colonna B, buca quadrata tridimensionale (sfera con pareti impenetrabili). Come è noto, i valori del momento angolare tradizionalmente hanno un nome: s=0, p=1, d=3, f = 3, g=4, h = 5 . Il passaggio alla colonna D, a parer mio, potrebbe essere chiarificato. Semplicemente, anche la buca quadrata a pareti finite (C) ha i suoi momenti angolari, che in energia corrispondono più a meno a quelli della buca quadrata a pareti infinite, ma, come si vede nella successiva colonna D, non corrispondono più in numero quantico a quelli della colonna B. Ad ogni modo qui interviene un lavoro direi "di cucina". La buca quadrata a pareti finite viene smussata in modo da renderla più realistica, e, soprattutto, da far tornare i conti. Però i conti tornano solo inserendo finalmente l'accoppiamento spin-orbita. Per indicarlo, ho dato lo stesso colore ai due livelli della colonna E che derivano da uno stesso livello della colonna D.

Per ottenere i numeri magici si calcolano i numeri di occupazione dei vari livelli. Le frazioni all'estrema destra indicano i momenti angolari del livello e i numeri di occupazione si calcolano moltiplicando le varie frazioni per 2 e aggiungendo 1 :

$(2\ell+1)$ posti. Dal basso, si ottengono i numeri **2, 4, 2, 6, 4, 2, 8, 6, 4, 2, 10** etc.

I numeri magici compaiono sommando tutti i numeri indicati fino ad un **guscio completo**, cioè un livello di energia al di sotto di un intervallo più ampio degli altri. L'effetto dell'accoppiamento spin orbita è così visibile. Per esempio, se lo strato 4f non si fosse spezzato, il numero magico 28 perderebbe molto della sua magicità, e lo stesso sarebbe del numero 50, se il 5g fosse rimasto dov'era, e lo stesso ancora per il numero 82 e il 126.

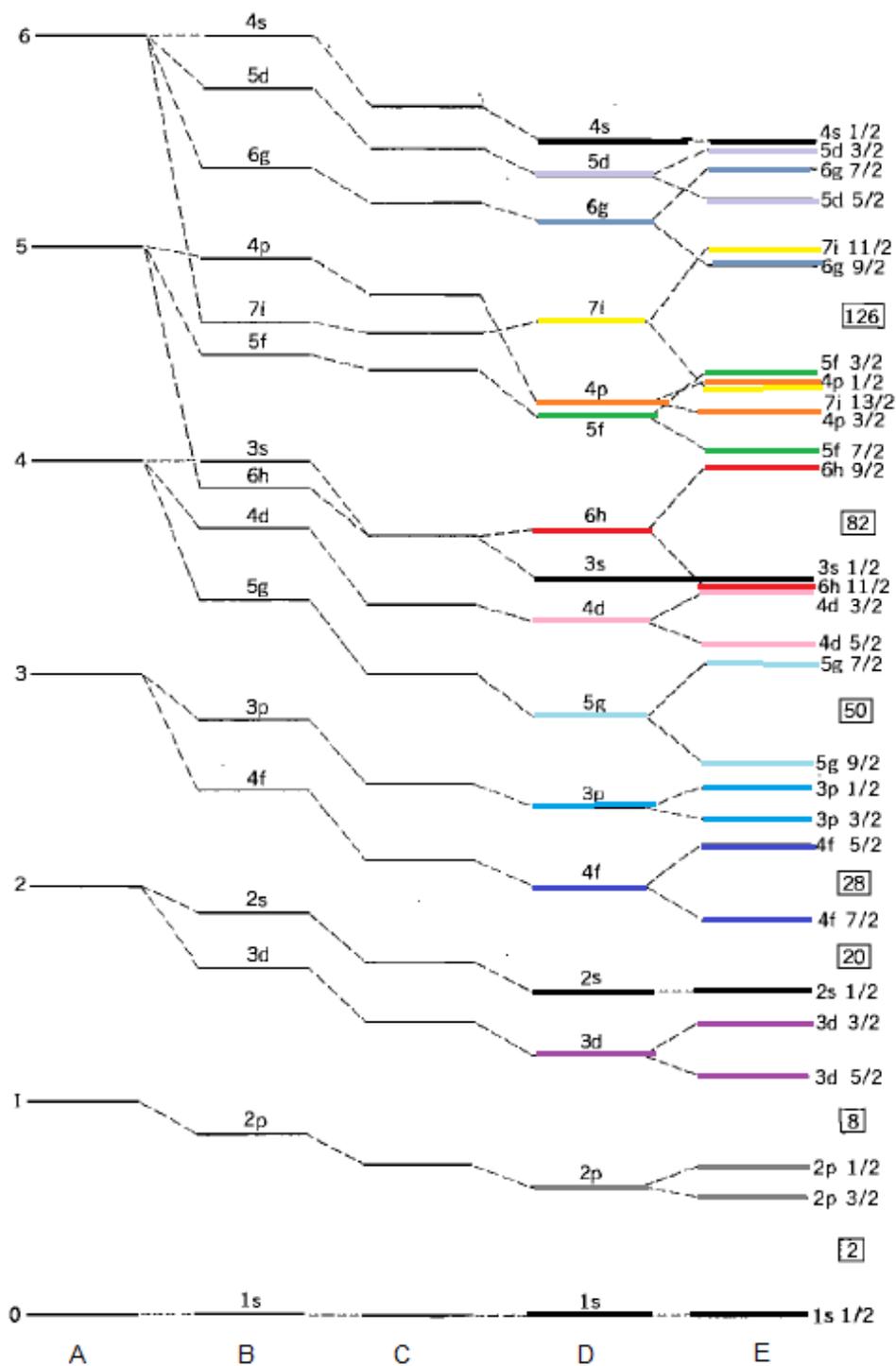


FIG. 18-2. Ordering of states according to the shell model, using various potentials (schematic). [After Feld, *Ann. Rev. Nuclear Sci.*, **2**, 239 (1953).]

Fig.7.

Genesi dei numeri magici (la spiegazione precede la figura).

Va notato che nel nucleo convivono due buche di potenziale indipendenti, una per i neutroni e una per i protoni, che quindi possono avere numeri magici indipendenti.

Conclusione.

Il modello a shell, col suo successo nello spiegare i “numeri magici”, ci porta a concludere che il moto dei nucleoni non sia molto diverso da quello degli elettroni nell’atomo. Come già notato, se il modello a goccia avesse avuto la prevalenza sul modello a shell, nuclei e atomi avrebbero una struttura assai diversa gli uni dagli altri nella nostra visualizzazione. Naturalmente, in ogni caso il moto è un moto quantistico, che non ha molto in comune con il moto dei pianeti intorno al Sole: inoltre, al posto del Sole, il modello a shell nella versione originale era basato su un campo di forza prodotto dagli altri nucleoni, le cui funzioni d’onda sono simili tra loro, nel rispetto del principio di esclusione di Pauli. Oggi si pensa che i nucleoni possano essere divisi in due classi, (i) una sorta di nucleo nel nucleo, composto da nucleoni che occupano i livelli energetici più bassi e restano inerti, e (ii) un guscio o più “di valenza”, analogo a quello degli atomi, in cui i nucleoni muovono più liberamente.

Una volta accertato il successo della spiegazione dei numeri magici, con le conseguenze che essi comportano, si procedette a studiare meglio il modello, che diede altre spiegazioni e predizioni, anche al prezzo di ulteriori complicazioni. Si tratta in gran parte di fenomeni di fisica nucleare, che richiedono qualche conoscenza del soggetto, e non è questo il luogo per trattarli. Nella sua forma più semplice, questo modello può spiegare come lo stato fondamentale dei nuclei pari-pari (con Z pari e N pari) abbia spin zero; può spiegare gli spin nucleari osservati dei nuclei con A dispari adiacenti a nuclei doppiamente magici, come $Pb(208,82)$; può spiegare i valori dei momenti di quadrupolo elettrico nucleari, dà una spiegazione semi-quantitativa dell’isomeria nucleare (che abbiamo già incontrato).

L’accordo con gli esperimenti è eccellente per i nuclei *sferici* con i numeri dei nucleoni (A,N,Z) vicini ai numeri magici. *Il modello a guscio sferico, tuttavia, non concorda bene con le proprietà dei nuclei che hanno altri numeri di nucleoni, ad esempio i nuclei degli elementi lantanidi e attinidi, con i numeri dei nucleoni lontani dai numeri magici.*

Ma, a parte queste discrepanze, che forse potrebbero essere sanate nel contesto del modello stesso, perché, ci si potrebbe chiedere, questo modello non è accettato come la descrizione standard del nucleo atomico? **Perché il modello è certamente provvisorio, anche se non sappiamo su quale scala di tempo.** È ormai comune opinione dei fisici nucleari che il nucleo di un atomo è costituito da neutroni e protoni, che a loro volta sono la manifestazione di particelle ancora più elementari, chiamate **quark**, che sono tenute insieme dalla forza nucleare in certe combinazioni stabili di **adroni** (particelle che rispondono alle interazioni forti), chiamate **barioni** (“particelle pesanti”, tra cui protoni e neutroni).

La forza nucleare forte si estende abbastanza lontano da ciascun barione da legare insieme i neutroni e i protoni nonostante la forza elettrica repulsiva tra i protoni carichi positivamente. La forza nucleare forte ha un raggio molto corto e sostanzialmente scende a

zero appena oltre il bordo del nucleo. La forza nucleare che noi vediamo all'esterno del nucleone, ed è sufficiente a tenere insieme il nucleo prevalendo, fino a un certo punto, sulla forza elettrostatica, è quindi quello che resta ai confini del nucleone della forza che tiene insieme il medesimo: è analoga alla forza di London, che agisce tra molecole, forza debole e a corto raggio, che altro non è che un residuo della forza elettrostatica che tiene legato un atomo.

https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_force

Ma il problema di creare un modello nucleare a partire dal modello standard presenta notevoli difficoltà, che finora si sono rivelate insormontabili. Ciò è dovuto a due motivi:

- 1) In linea di principio, la fisica all'interno di un nucleo può essere interamente derivata dalla **Cromodinamica Quantistica (QCD)**. In pratica, tuttavia, gli attuali approcci computazionali e matematici per applicare la QCD a sistemi a bassa energia come i nuclei hanno finora incontrato un successo limitato, perché è difficile costruire un modello accurato delle forze tra i nucleoni derivato dalla QCD. (In figura N2, che non spiego, mostro quanto complicata possa essere l'interazione fra un protone e un neutrone in base al modello standard. Per la comprensione di questa figura mi affido al fatto che il lettore di buona volontà legga la fonte citata. Ma certo, la maggior complicazione balza agli occhi).
- 2) È necessaria una significativa potenza di calcolo per calcolare accuratamente le proprietà dei nuclei *ab initio*. Gli sviluppi nella teoria dei molti corpi (*many-body theory*) hanno reso possibile il calcolo *ab initio* delle proprietà di molti nuclei a bassa massa e relativamente stabili, ma sono necessari ulteriori miglioramenti sia della potenza di calcolo che degli approcci matematici prima di poter affrontare nuclei pesanti o nuclei altamente instabili.

Su questa base il lettore stesso può rispondere alla domanda *“La distribuzione di neutroni e protoni in un nucleo atomico è in qualche modo analoga a quella degli elettroni attorno al nucleo?”* La situazione l'ho descritta. Vede lui “in qualche modo” una sufficiente “analogia”?

NOTE

- (1) In un primo tempo si pensò che in effetti potessero formarsi **“Molecole nucleari”**, formate da due o più nuclei legati insieme, ciascuno dei quali mantiene la propria individualità, ma tali che la “molecola” abbia proprietà completamente diverse da quelle

dei nuclei componenti. Questa opinione non ottenne il consenso della comunità dei fisici, ma rappresenta un filone parallelo di ricerca. Si veda ad esempio:

http://www.scholarpedia.org/article/Clusters_in_nuclei, e la relativa figura di quattro particelle alfa raggruppate in un nucleo di O(16).

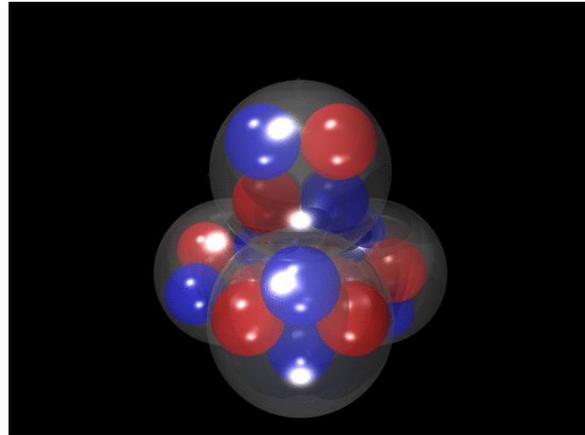


Fig. N1:

Nucleo di O(16) presentato come "molecola" di quattro nuclei di He(4).

Un concetto affine è quello dei "Nuclei di Alone" (Halo Nuclei), i quali esistono certamente e danno in certo senso il limite assoluto effettivo del raggio d'azione della forza nucleare (noto anche come forza forte residua). Questi nuclei di alone sono ad esempio il Litio-11 o Boro-14, in cui i dineutroni, o altri gruppi di neutroni, orbitano a distanze di circa 10 fm (approssimativamente simile al raggio di 8 fm del nucleo di uranio-238). Questi nuclei non hanno una densità massimale. Essi si formano ai bordi estremi della carta dei nuclidi - la linea di perdita (drip line, letteralmente "sgocciolamento") dei neutroni e la linea di perdita dei protoni - (Vedi Fig. 3) e sono tutti instabili, con emivite brevi, dell'ordine di millisecondi. Per esempio, il Litio-11 ha un'emivita di 8,8 ms.

(2) Forza/interazione di scambio. Questa espressione può generare confusione, in quanto indica due fenomeni indipendenti.

I. Nel caso della fisica delle particelle elementari, si ha una forza di scambio quando l'interazione è spiegata mediante lo scambio di una particella: questa è un fotone nelle interazioni elettromagnetiche, un mesone π nelle forze nucleari, un gluone nelle interazioni forti fra quark. Le particelle scambiate sono i "portatori" (carrier) della forza.

(Il concetto di forza di scambio fu introdotto nel 1935 da H. Yukawa)

Si potrebbe obiettare: supponiamo di avere due protoni, che hanno una data energia (inclusa quella di massa). Il mesone scambiato ha pure lui la sua energia. Da dove viene

l'energia del mesone se nel contempo l'energia dei due protoni non muta? La risposta è che la massa/energia del mesone viene dal principio di indeterminazione, nel senso che, per un intervallo di tempo sufficientemente piccolo, l'energia è indeterminata, fino ad un valore inversamente proporzionale all'intervallo di tempo. Il pione di massa m vive soltanto per un tempo Δt tale che $mc^2 \Delta t < h/(4\pi)$. Se vogliamo m , dobbiamo conoscere in qualche modo Δt . Ma noi sappiamo che le forze tra nucleoni sono "a corto raggio", di circa un raggio nucleonico, R . La velocità della particella scambiata sarà all'incirca c , per cui $\Delta t = R/c$. Quindi si ricava la massa: $m = h/(4\pi Rc)$, che, usando $h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ J*s, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, $R = 1.5 \cdot 10^{-15}$ m, produce un valore di circa 131 MeV (il valore oggi accettato è 139.6 MeV).

Una tale particella di scambio, che vive soltanto per il tempo concesso dal principio di indeterminazione, è detta "virtuale".

Per coloro che hanno qualche nozione dei diagrammi di Feynman e con il modello standard delle particelle elementari, riproduco qui una figura che mostra il concetto di forza di scambio come fu ideato nel 1935, e come sarebbe interpretato oggi in termini del modello standard delle particelle nucleari.

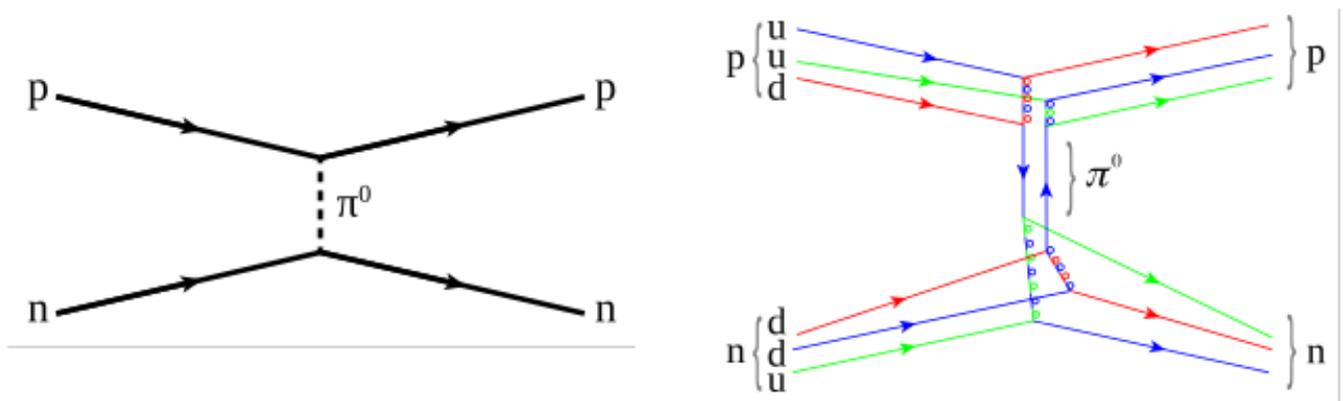


Fig. N2

Per una spiegazione si veda https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_force.

La figura lascia intuire in modo grafico quanto complicato diventerebbe (assai probabilmente) il calcolo delle forze nucleari partendo dal Modello Standard delle particelle nucleari.

II: **Nel contesto delle forze nucleari**, invece, la forza di scambio è sinonimo di interazione di scambio (con una energia di scambio e un termine di scambio), che è un effetto meccanico quantistico che si verifica solo tra particelle identiche. Nonostante a volte venga

chiamata “forza” di scambio, essa non è una vera forza intesa in senso quantistico, in quanto manca di un “portatore” (carrier), come le forze citate in I.

L'effetto è dovuto alla funzione d'onda delle particelle indistinguibili, che sono soggette a simmetria di scambio, nel senso che le funzioni possono rimanere invariate (funzioni simmetriche) o cambiare segno (funzioni antisimmetriche) quando vengono scambiate due particelle. Sia bosoni che fermioni possono sperimentare l'interazione di scambio. Per i fermioni (particelle a spin semintero), questa interazione è talvolta chiamata repulsione di Pauli ed è correlata al principio di esclusione di Pauli. Per i bosoni (particelle a spin intero), l'interazione di scambio assume la forma di un'attrazione efficace che fa sì che particelle identiche si avvicinino tra loro, come nella condensazione di Bose-Einstein.

L'interazione di scambio altera il valore atteso della distanza quando le funzioni d'onda di due o più particelle indistinguibili si sovrappongono. Questa interazione aumenta (per i fermioni) o diminuisce (per i bosoni) il valore atteso della distanza tra particelle identiche (rispetto alle particelle distinguibili). Tra le altre conseguenze, l'interazione di scambio è responsabile del ferromagnetismo e del volume della materia. Non ha analoghi classici.

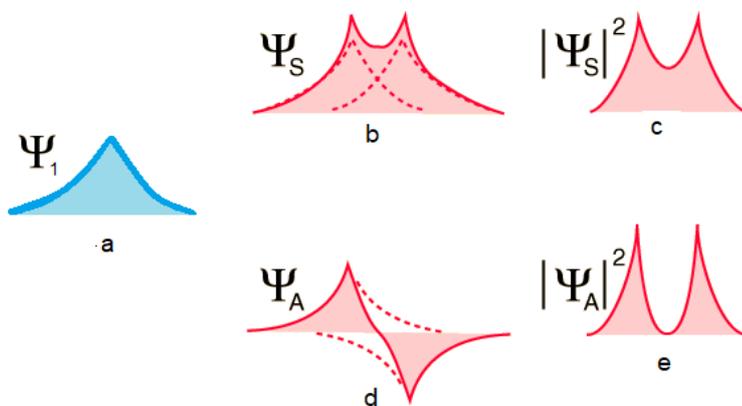


Fig. N3

$\Psi(1)$ è la funzione d’onda (ampiezza di probabilità) di una particella; (b) è la somma delle ampiezze di probabilità di due particelle identiche, con spin intero, e quindi bosoni; (c) è il modulo quadrato di (b), che dà la probabilità della posizione delle due particelle identiche di spin intero. Si vede che le due particelle si attraggono (combinazione simmetrica, indice S).

(b) è la “somma” delle ampiezze di probabilità di due particelle identiche, con spin semi-intero, e quindi fermioni. Tale somma è in realtà una differenza; (c) è il modulo quadrato di (b), che dà la probabilità della posizione delle due particelle identiche di spin semi-intero. Si vede che le due particelle si respingono (combinazione anti-simmetrica, indice A)

Gli effetti di interazione di scambio furono scoperti indipendentemente dai fisici Werner Heisenberg e Paul Dirac nel 1926.

(3) Probabilità del decadimento α - spiegazione qualitativa.

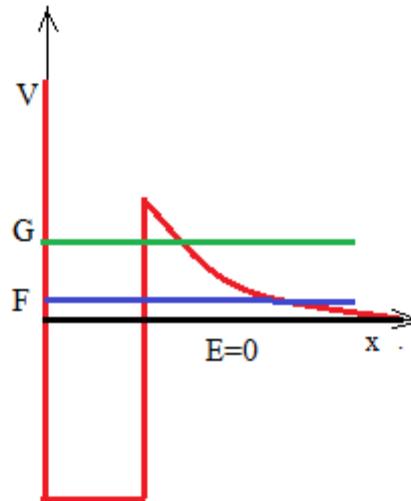


Fig. N3

Per lasciare il nucleo, con energia superiore a $E=0$, la particella α deve attraversare la barriera di potenziale coulombiano (*la particella α e il nucleo sono entrambi positivi*) repulsiva. Quanto più la barriera è spessa, tanto più bassa è la probabilità di attraversarla. Può quindi avvenire che per i nuclei con $A = 50 - 100$ la particella α abbia energia positiva, ma sia così bassa che lo spessore della barriera ne rende praticamente impossibile l'attraversamento.

(4) Il concetto di buca di potenziale, ho notato, non è immediato, ed è sovente destinato a restare vago nella mente dello studente alle prime armi. Esso può tuttavia chiarirsi pensando in termini di forze. Se abbiamo due o più particelle confinate in una regione ristretta, possiamo pensare in prima approssimazione a una regione di spazio sferica ai confini della quale agisce una forza che respinge verso il centro della buca la particella che vi arriva. Il diagramma allegato può spiegare ciò che avviene *in una dimensione*.

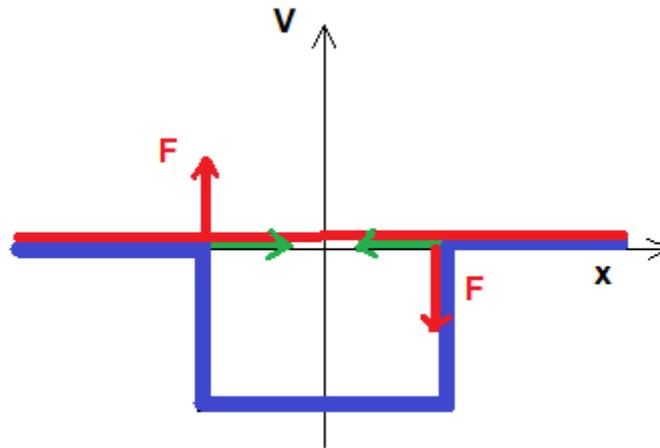


Fig. N3

Buca quadrata di potenziale unidimensionale

La buca di potenziale è disegnata in blu. Al limite destro (A) la derivata del potenziale, approssimabile con una funzione a gradino, è una funzione δ negativa (freccia rossa). Sull'asse x essa è una forza diretta verso l'origine. Il contrario avviene al limite sinistro (B). In rosso sono segnate le forze, segno e intensità, come derivata del potenziale. In verde è l'effetto della forza, sull'asse x .