

Introduzione alla Fisica Nucleare e Subnucleare (1ª lezione)

Fisica Nuc. e Subnuc. → studia proprietà individuali e collettive di particelle e nuclei e i processi che li coinvolgono. Questi possono riguardare una **singola particella o nucleo**, o essere dovuti al concorso di **più particelle o nuclei**:

- **primo caso:** *propagazione* di una particella libera, o *decadimento*, in cui particella o nucleo spontaneamente si trasformano in altre particelle o nuclei. **sempre rispettando i principi di conservazione ...**
- **secondo caso:** *reazioni nucleari* provocate da interazione di particella o nucleo, con altre particelle o nuclei.

Per descrivere molecole e atomi → meccanica quantistica non relativistica, poiché i costituenti si muovono, al loro interno, con velocità tipicamente molto inferiori a “ c ” e le energie cinetiche sono molto inferiori agli equivalenti energetici delle masse delle strutture coinvolte.

Ciò vale per lo più anche per i componenti dei nuclei, i nucleoni, all’interno dei nuclei stessi.

I costituenti delle particelle adroniche (*quark e gluoni*) si muovono invece a velocità molto alte, prossime a “ c ”, e le energie cinetiche associate sono dell’ordine o maggiori agli equivalenti energetici delle loro masse, da cui la necessità di un approccio relativistico.

I costituenti fondamentali della materia

A fine 19° secolo si era convinti che la materia fosse composta da atomi. L'esistenza di un centinaio di elementi diversi con proprietà periodicamente ricorrenti, era però chiara indicazione che anche gli atomi hanno una struttura interna e non sono *indivisibili*.

Atomo composto da un ***nucleo denso*** circondato da una ***nuvola di elettroni***. Nucleo a sua volta decomponibile in costituenti più piccoli detti ***nucleoni***, e questi sono di due tipi: ***protoni*** e ***neutroni***.

Prima che Chadwick (1932) scoprisse il neutrone, si pensava che i nuclei contenessero protoni ed elettroni, ma questi ultimi non possano essere annoverati fra i costituenti dei nuclei!

Per capirlo si può ricorrere al principio di conservazione del momento angolare totale per un sistema fisico isolato, qual'è un nucleo, e anche al principio di indeterminazione di Heisenberg.

- Conservazione del momento angolare totale

Ogni sistema fisico ha due contributi possibili di momento angolare: - orbitale con analogo classico
- intrinseco o di spin

Ogni momento angolare è quantizzato.

Del momento angolare orbitale $\vec{\ell}$ di un sistema fisico si possono conoscere contemporaneamente, al più, il suo modulo quadro $|\vec{\ell}|^2 = \ell(\ell + 1)\hbar^2$ e il massimo valore della proiezione ℓ_z lungo una direzione di riferimento convenzionale z , $\ell_z = \ell\hbar$, con ℓ intero ≥ 0 .

ℓ_z può assumere solo i $(2\ell + 1)$ valori scalari fra loro di un'unità di \hbar che soddisfano $-\ell\hbar \leq \ell_z \leq +\ell\hbar$.

Per un nucleo, in aggiunta all'eventuale momento angolare orbitale, si considera che protoni e neutroni hanno entrambi momento angolare intrinseco o *spin*, con numero quantico associato s che vale $\pm 1/2$.

Lo spin può dunque assumere i soli due stati parallelo o antiparallelo alla direzione di riferimento z ; le componenti s_z valgono $+\hbar/2$ e $-\hbar/2$, e il quadrato dello spin vale $s(s + 1)\hbar^2 = 3\hbar^2/4$.

Il mom. angolare totale \vec{J} di un nucleo è la somma vettoriale dei vari momenti angolari orbitali dei suoi nucleoni e dei loro spin

$$\vec{J} = \sum_{i=1}^A \vec{\ell}_i + \sum_{i=1}^A \vec{s}_i = \vec{L} + \vec{S}$$

\vec{J} ha valori pari a un multiplo rispettivamente intero o semi-intero di unità di \hbar per nuclei con A pari o con A dispari.

Ogni livello nucleare è caratterizzato dal proprio momento angolare totale \vec{J} che per l'isotropia dello spazio si conserva.

L'operatore che lo rappresenta commuta con l'Hamiltoniana \rightarrow il suo valore può sempre essere determinato assieme all'energia del livello.

Spesso ci si riferisce allo "spin" di un nucleo come al suo momento angolare totale \vec{J} , e non \vec{S} .

Ogni misura di \vec{J} da' risultati coerenti con le regole illustrate e ciò portato ad escludere gli elettroni quali componenti dei nuclei. Si trova infatti ad esempio che ${}^2\text{H}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^{14}\text{N}$ hanno tutti spin pari ad \hbar , in accordo con la regola indicata, avendo un numero pari di nucleoni.

Se tali nuclei fossero costituiti da p ed e , il numero dei costituenti sarebbe dispari, per rendere conto della loro carica elettrica, e conseguentemente il loro spin totale sarebbe un multiplo dispari di $\hbar/2$, **contrariamente all'evidenza sperimentale.**

- Principio di Indeterminazione (Heisenberg)

Dal Princ. di Indet. $\Delta p \Delta x \sim h$, con Δx l'incertezza nella posizione dell'elettrone nel nucleo, dell'ordine delle dimensioni lineari del nucleo, circa 10^{-14} m, si deduce un'incertezza sull'impulso dell'ordine di

$$\Delta p \sim \frac{h}{\Delta x} \sim 4.14 \times 10^{-7} \text{ MeV s m}^{-1}$$

Detta $m_e \simeq 0.51 \text{ MeV}/c^2$ la massa dell'elettrone, e assunto che il suo impulso p_e nel nucleo sia dell'ordine di Δp , si deduce, ricordando che $c \simeq 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ una grezza stima della sua energia totale nel nucleo

$$E_{tot}^2 = p_e^2 c^2 + m_e^2 c^4 \simeq 124 \text{ MeV}$$

che rappresenta l'estremo superiore dell'energia cinetica di un ipotetico elettrone libero di muoversi nel nucleo.

Tale energia non è però compatibile con un nucleo legato, che ha un'energia media di legame per nucleone di 8 MeV, e neppure con le energie misurate degli elettroni emessi da nuclei per decadimento β , al massimo dell'ordine di alcuni MeV.

Rapida carrellata cronologica ...

Nel 1928 Dirac, lavorando a un'estensione relativistica dell'equazione di Schrodinger, formulò un'equazione che prevede come soluzioni, anche *elettroni di energia negativa*. Tre anni dopo concluse che questi andavano interpretati come elettroni che si muovono *a ritroso nel tempo*, ovvero come nuove particelle che rispetto al tempo si muovono nel solito modo, ma hanno carica elettrica opposta a quella dell'elettrone, essendo per il resto uguali a quest'ultimo.

Positroni, o anti-elettroni: 1932 Anderson, Blackett e Occhialini nei prodotti delle interazioni dei raggi cosmici con l'atmosfera. Il concetto di **antiparticella** si estese e si assume che ad ogni particella sia associata un'antiparticella (talvolta le due coincidono, come per fotone).

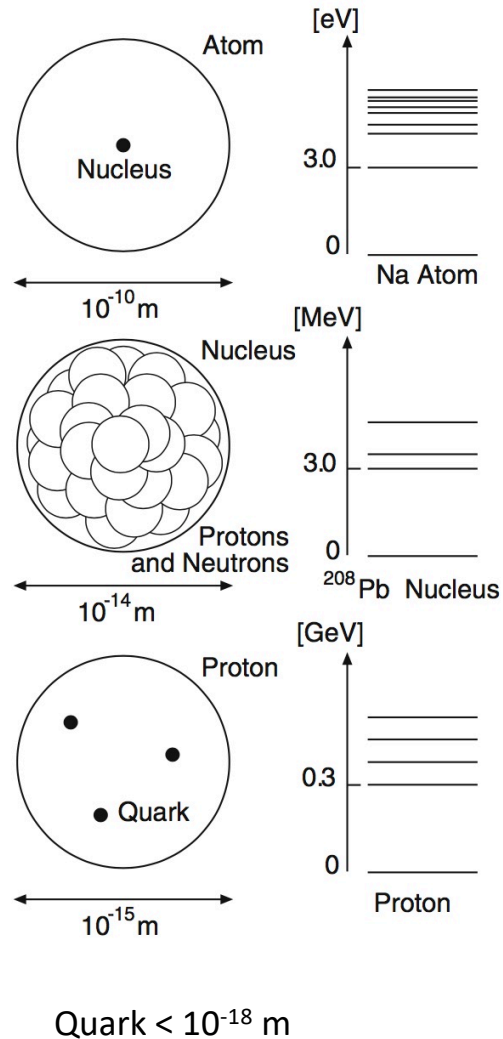
Un'anti-particella ha massa, spin e vita media uguali, carica elettrica, momento magnetico, numero barionico, leptonico o altro numero quantico uguali in valore assoluto, ma di segno opposto rispetto alla particella associata.

Pauli, nel 1930, postulò l'esistenza del **neutrino**, per conciliare il rispetto delle leggi di conservazione di energia, impulso e momento angolare, con gli allora recenti risultati dello studio del **decadimento β** .

Con lo sviluppo degli acceleratori si trovò che ***p*** e ***n*** sono i membri più leggeri di una numerosa famiglia di particelle, gli **adroni**. Oggi se ne conoscono più di 200 e come fu per gli atomi, possono essere classificati in gruppi caratterizzati da proprietà simili.

Apparve dunque chiaro che gli adroni **non sono** costituenti fondamentali della materia e verso fine degli anni '60 del 20° secolo, il **modello a quark** mise ordine in questo zoo di adroni. Ogni adrone è descritto come opportuna combinazione di due o tre quark.

Scale dimensionali che caratterizzano le diverse gerarchie della struttura della materia allo stato attuale delle conoscenze



Elementarità

Un sistema fisico è elementare, se è privo di struttura interna e si comporta a tutti gli effetti come un punto materiale, non può quindi assorbire energia dall'esterno trasformandola in energia interna. Tutta l'energia trasferita dall'esterno a una particella elementare diventa energia cinetica di quest'ultima. Se il sistema ha gradi di libertà interni, parte dell'energia trasferita può eccitarli, e l'incremento di energia cinetica associata al moto del baricentro del sistema è inferiore a tutta l'energia trasferita.

Descrivendo il mondo microscopico si deve utilizzare l'approccio quantistico, per cui l'energia dei gradi di libertà interni di una particella non si distribuisce in modo continuo, ma può assumere solo una serie discreta di valori, E_0, E_1, E_2, \dots . Per evidenziare l'esistenza di gradi di libertà interni e determinare di conseguenza l'eventuale natura composta di una particella, si deve quindi trasferire un'energia almeno pari alla soglia $E_s = E_1 - E_0$. Sondandola con energie inferiori ad E_s , essa si comporta a tutti gli effetti come elementare.

Per questo lo studio della struttura interna delle particelle richiede energie sempre più elevate. Conseguenza inevitabile è che il carattere *elementare* di una particella non può essere definitivamente *dimostrato sperimentalmente*, ma la non-elementarità sì, anche senza osservarne i componenti, solo in base alla sua capacità di assorbire energia per eccitazione dei modi interni.

Interazioni fondamentali

- **Forza gravitazionale**: trascurabile, per la debole intensità, nei fenomeni che coinvolgono nuclei e particelle, tranne per particolari strutture cosmiche (stelle ai neutroni, buchi neri, ...)

- **Forza elettromagnetica**

- **Forza debole**: coinvolta nei decadimenti β

- **Forza forte**: lega fra loro i quark a formare protoni, neutroni, ...

La forza che lega fra loro i nucleoni a formare i nuclei, detta anche **forza nucleare**, non è fondamentale ma un effetto secondario della forza forte e può essere paragonata alle *forze chimiche*, una forma di interazioni elettromagnetiche che legano gli atomi a formare molecole.

Le interazioni fra particelle sono mediate dallo scambio di *bosoni vettori*, particelle con spin 1. Essi sono i *fotoni* per l'interazione elettromagnetica, i *gluoni* per le interazioni forti, i bosoni W^+ , W^- e Z^0 per le interazioni deboli.

A ogni interazione è associata una tipologia di *carica* che la percepisce: la carica elettrica, la carica debole e la carica forte o *di colore*.

Una particella può sentire gli effetti di una particolare forza solo se trasporta la carica corrispondente:

debole → leptoni e quark; **elettrica** → quark e da alcuni leptoni; **colore** → quark ma non leptoni.

In una scala di intensità, assegnando **1** all'interazione **forte**, l'**elettromagnetica** vale 10^{-2} , la **debole** 10^{-13} , la **gravitazionale** 10^{-38}

Il nucleo atomico

- **Nel 1896 Becquerel** osservò che una lastra fotografica vergine e protetta dalla luce, era stata "impressionata" da radiazioni emanate da frammenti di minerale d'uranio (radioattività).
- **Nel 1904 Thomson**, (1897 elettrone) propose un modello di atomo come una distribuzione diffusa di carica positiva in cui sono immersi gli elettroni negativi similmente alle *uvette candite in un panettone*, tali da rendere l'atomo globalmente neutro.
- **Nel 1909 Rutherford** condusse un esperimento, con Geiger e Marsden, in cui bombardando con **particelle α** un sottile foglio d'oro, sottopose ad analisi il modello di Thomson.

La diffusione osservata di particelle α *contraddiceva l'ipotesi di Thomson*, mostrando un numero di particelle α deviate ad angoli grandi, 5 ordini di grandezza superiore a quanto prevedibile da sole fluttuazioni statistiche basate sull'ipotesi di Thomson.

- **Rutherford nel 1911** propose che ciò implicasse che l'atomo non è un *panettone* ma piuttosto una specie di *sistema planetario*, con le cariche positive concentrate in un **nucleo** piccolo, duro e massivo, posto al centro e gli elettroni, molto leggeri, orbitanti attorno al nucleo sottoposti al suo potenziale elettrico coulombiano.

La stima delle dimensioni del nucleo , $10^{-15} \div 10^{-14}$ m, portò Rutherford ad affermare che un atomo è sostanzialmente **vuoto**, date le dimensioni delle *orbite atomiche* $\simeq 10^{-10}$ m.

La constatata *durezza* del nucleo portò Rutherford a proporre un'immagine strutturale **naïf** ma per molti versi estremamente realistica, in cui lo si immagina come costituito da un raggruppamento di sferette quasi rigide (**nucleoni**), a **massimo impacchettamento**, da cui la forma che tende a una sfera all'aumentare del numero **A** di nucleoni, di volume direttamente proporzionale ad **A**, per cui il raggio **R** di questa "sfera" risulta proporzionale alla radice cubica del volume e di conseguenza anche ad $A^{1/3}$:

$$R(A) = r_0 A^{1/3}$$

con r_0 parametro da determinarsi.

Ulteriore conferma indiretta all'esistenza di un nucleo per ogni atomo, con le caratteristiche indicate, venne dalla «Legge semi-empirica di Moseley» che correla i numeri atomici **Z** con le frequenze ν dei raggi **X** emessi

$$\sqrt{\nu} = k_1(Z - k_2)$$

k_1 e k_2 dipendono dal tipo di riga d'emissione, e k_2 tiene conto dell'effetto di schermo sulla carica Z_e del nucleo, dovuto agli elettroni atomici delle *shell* più vicine al nucleo stesso

Essa può essere dedotta dal modello atomico di Bohr che ha come cardine l'ipotesi di un nucleo alla Rutherford per ogni atomo.

Nomenclatura

Il nucleo di un generico atomo X è convenzionalmente indicato con ${}^A_Z X$, con Z il numero atomico dell'atomo X ed A il numero di nucleoni nel suo nucleo.

Il numero N di neutroni è $N = (A - Z)$. Un nucleo può anche essere indicato specificando il numero dei suoi neutroni come: ${}^A_Z X_N$.

Ogni diversa combinazione di Z e N , o Z e A , è detta *nuclide*.

- Z si determina per via chimica (spettrometria atomica, legge di Moseley)
- A si determina tramite spettrometria di massa o studio di reazioni nucleari

I volumi nucleari tipici sono $\sim 10^{-44} \text{ m}^3$; la densità media ρ_0 dei nucleoni in un nucleo è dell'ordine di $0.17 \text{ nucleoni/fm}^3$

Carica elettrica di ogni protone: $q_p = +1.602176 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Neutroni hanno momento magnetico intrinseco $\neq 0$, pari in modulo a $\approx 68 \%$ di quello del protone \rightarrow chiaro indizio di una struttura interna per il neutrone.

Sostanziale corrispondenza fra masse di p ed n , che differiscono per meno dell'1.4 %, è fra i motivi che ha suggerito di introdurre il concetto di *nucleone* inteso come particella componente un nucleo, indifferentemente dallo specifico stato di carica elettrica.

Ogni atomo nello stato fondamentale è elettricamente neutro, dato che il suo nucleo è circondato da Z elettroni.

Nuclei con ugual numero Z di protoni ma diversi numeri N_i di neutroni, indicati con ${}^A_Z X$, sono detti *isotopi* e gli atomi cui appartengono hanno proprietà chimiche simili.

Due nuclei di ugual numero A di nucleoni, ma diversi numeri Z e Z' di protoni, indicati con ${}^A_Z X$ e ${}^A_{Z'} X$, sono detti *isobari*.

Nuclei con ugual numero di neutroni sono invece detti *isotoni*.