

Riassunti del corso di Fisica Nucleare e Subnucleare

Aurora Leso

June 2021

Contents

1	Disclaimer	1
2	Fisica Nucleare	2
2.1	Ripasso	2
2.1.1	Potenziale centrale	2
2.1.2	Momento angolare	2
2.2	Unità e proprietà	2
2.2.1	Definizioni all'interno del nucleo	2
2.2.2	Massa nell'atomo	3
2.2.3	Carta dei nuclidi	4
2.3	Modelli	5
2.3.1	Modello a gas di Fermi	5
2.3.2	Modello a goccia di liquido	5
2.3.3	Deutone	5
2.3.4	Modello a shell atomico e nucleare	5
2.3.5	Modello collettivo	5
2.4	Reazioni nucleari	5
2.4.1	Fissione nucleare	5
2.4.2	Fusione nucleare	5
2.5	Decadimenti	5
2.5.1	Alpha	5
2.5.2	Beta	5
2.5.3	Gamma	5
2.6	Interazione radiazione-materia	5
2.6.1	sezione d'urto	5
2.6.2	Radiazioni EM	5
2.6.3	Particelle cariche	5

1 Disclaimer

2 Fisica Nucleare

2.1 Ripasso

2.1.1 Potenziale centrale

Se un potenziale $V(\vec{r})$ è tale che $V(\vec{r}) = V(r)$, $r = |\vec{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ allora posso dividere l'Hamiltoniana in parte radiale + angolare, risolvendo il problema studiando una soluzione fattorizzata in parte radiale ad angolare del tipo $\Psi(r, \theta, \phi) = R(r)Y_{lm}(\theta, \phi)$ dove abbiamo riconosciuto in queste ultime le armoniche sferiche, ortogonali tra loro e la cui forma analitica dipende dai polinomi di Legendre e hanno parità $PY = (-1)^l Y$ dove si è ridotta la notazione da Y_{lm} a Y e basta. l, m sono **numeri quantici**, in particolare **l è il numero quantico orbitale ed m è il numero quantico magnetico, che va da $-l$ a $+l$ per passi interi**, essi vanno a caratterizzare gli autovalori del momento angolare.

2.1.2 Momento angolare

Ricordando come definiamo l'operatore T in campo centrale, ossia

$$T = \frac{\vec{p}^2}{2m} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \underset{\text{coord sfer}}{=} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial r^2} r^2 \frac{\partial}{\partial r} - \frac{\vec{L}^2}{r^2} \right] \quad (1)$$

ho che $\vec{p}^2 = \vec{p}_r^2 + \frac{\vec{L}^2}{r^2}$. Questo operatore \vec{L} è il **momento angolare orbitale** e le sue componenti sono descritte da operatori differenziali (\vec{L}_i con i da 1 a 3, che sono tutte quantizzate e di spettro $m\hbar$) nelle componenti $(\theta, \phi) \in S^2$, che soddisfano l'algebra di Lie di $SO(3)$ e per cui i commutatori valgono

$$[L_i, L_j] = i\hbar \epsilon_{ijk} L_k \quad [\vec{L}^2, L_i] = 0 \quad \forall i \quad (2)$$

Dal secondo commutatore evinco che posso trovare autofunzioni comuni a \vec{L}^2, L_i che sono proprio le armoniche sferiche.

I momenti angolari $\vec{L} = \vec{L}_1 + \vec{L}_2$ si compongono secondo la relazione $|l_1 - l_2| \leq l \leq |l_1 + l_2|$.

2.2 Unità e proprietà

2.2.1 Definizioni all'interno del nucleo

Ricordiamo subito una relazione fondamentale, ossia $1eV = 1.6022 \cdot 10^{-19} J$.

Collocando centralmente il nucleo atomico, di $r \propto fm = 10^{-15}$, $E \simeq 8MeV$, ad energie inferiori troviamo gli **stati eccitati** mentre ad energie maggiori abbiamo i **gradi subnucleari**.

Utili le seguenti tabelle

Ordini di grandezza		
-	Scala nucleare	Scala atomica
Lunghezza	$fm (= 1 \times 10^{-15} m)$	$\text{\AA} (= 1 \times 10^{-10} m)$
Energia	MeV	eV
Conversioni utili		
$\hbar c$	$197.327 MeV fm$	$1973.27 eV \text{\AA}$
$e^2/4\pi\epsilon_0$	$1.44 MeV fm$	$14.4 eV \text{\AA}$

Particella	Massa (MeV/c^2)	Carica (e)	Spin (s)	Raggio ($\sqrt{\langle \vec{r}^2 \rangle}$)	Vita media
Elettrone (e)	0.510998	-1	1/2	?	∞
Protone (p)	938.272	+1	1/2	$\sim 0.87 fm$	∞
Neutrone (n)	939.565	0	1/2	$\sim 0.1 fm$	$\sim 15 min$

Tutte e tre le particelle sopra elencate sono **fermioni** dato che hanno spin semintero. Interessante notare che l'elettrone ha raggio che si prospetta nullo, il protone certo fino al secondo decimale e il neutrone ha raggio negativo poichè ha carica complessiva nulla e deve esser fatto da componenti non neutre disposte in modo eterogeneo: pesando per carica i componenti, il raggio medio viene minore di zero. Vita media infinita di p ed e indicano che sono stabili, mentre il neutrone decade spontaneamente in protone+ altre cose. **Protoni e neutroni sono chiamati nucleoni**, e hanno massa molto simile.

Un elemento X della tavola periodica si indica come

$${}^A_Z X_N$$

Con A numero di massa pari a somma di protoni e neutroni, N numero di neutroni e Z numero di protoni, dunque $A=Z+N$.

2.2.2 Massa nell'atomo

In ogni processo nucleare vale la legge di conservazione per la carica q , per l'energia complessiva E e quindi per la massa m , e per il momento angolare \vec{J} nelle sue componenti orbitale e di spin.

Utile definire la **densità numerica di materia**, ossia il numero di massa A rapportato al volume di una sfera con raggio r , dunque si ha $\int \int_0^\infty \rho_m(r) r^2 dr d\Omega = A$, generalmente espressa in fm^{-3} e ha profilo

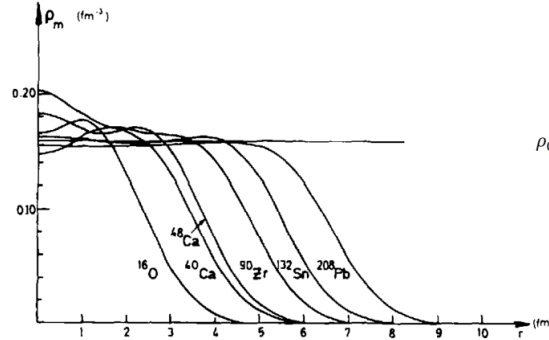


Figura 1.2: Profilo della densità di massa

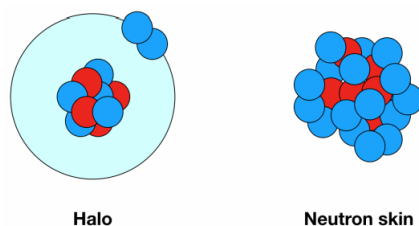
studiato mediante **electron scattering**, e si nota che

- A piccole distanze dal centro è costante, **densità di saturazione** e per ogni elemento $\rho_0 \simeq 0.15 - 0.2 \text{ fm}^{-3}$
- la pendenza di decrescenza è circa uguale per ogni elemento
- vale la **relazione di fermi** $r = r_0 \sqrt[3]{A}$, $r_0 \simeq 1.2 \text{ fm}$ dove r è la distanza dal centro del nucleo per cui la densità numerica è dimezzata rispetto al valore di saturazione. Aspettandomi $V \propto A$ dato che sperimentalmente per ogni A ho $\rho_0 \simeq \frac{A}{V}$ costante, allora $r \propto \sqrt[3]{A}$.

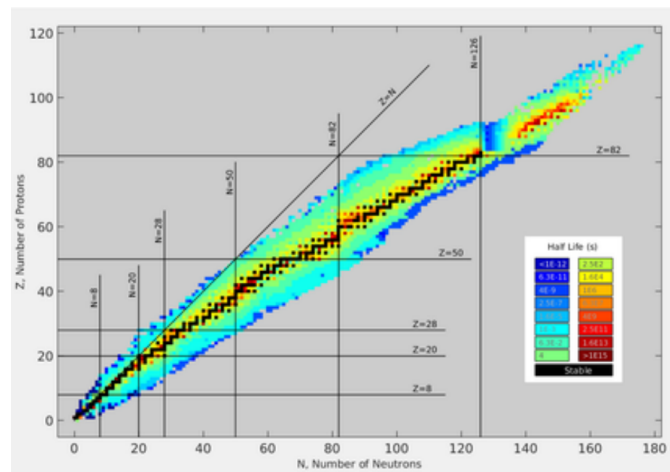
Si indica con **funzione di fermi** la Funzione $F(r) = \frac{1}{1+e^{r-r_0/a}}$ che si può parametrizzare per usarla nelle densità, ottenendo $\rho_m(r) = \frac{\rho_0}{1+e^{r-r_0/a}}$ dove ricordiamo che ρ_0 era la densità di saturazione.

Infine definiamo la **diffusività** come il parametro a che ci è uscito nell'equazione sopra, caratteristico di ciascun elemento e che è **indice di quanto rapidamente la densità vada a zero**, e si ha $\lim_{a \rightarrow 0} \rho_m(r) = \rho_0 \Theta(r_0 - r)$ dove ricordiamo che $\Theta(r)$ è la funzione di Heaviside. Due casi limite sono

- Effetto alone (**Halo**) per cui in nuclei leggeri la densità protonica va a zero velocemente mentre quella neutronica va giù più lenta, generando una zona di qualche femtometro dove ci sono solo neutroni sparsi.
- Effetto di pelle neutronica (**Neutron skin**). Per elementi pesanti si possono avere molti più neutroni che protoni, ma la densità centrale di saturazione è circa fissa e i neutroni in eccesso vanno a depositarsi sulla superficie nucleare creando una pelle neutronica che avvolge il nucleo.



2.2.3 Carta dei nuclidi



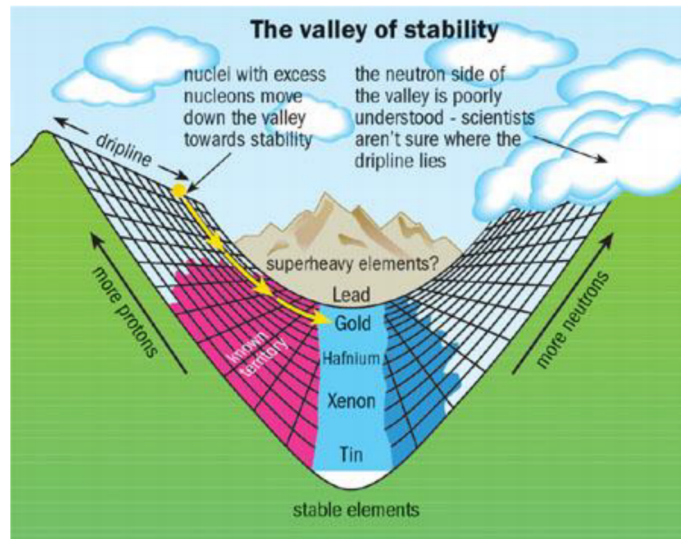
Detta anche **carta degli isotopi** o **carta di Segré**, ha come assi (di numeri interi) N (in x , da 0 a 177) e Z (in y , da 0 a 118). Definiamo

- **isotopi** elementi con stesso Z ma diverso A , nella carta dei nuclidi **stanno sulla stessa riga**.
- **isobari** hanno lo stesso numero di massa A , nella carta dei nuclidi stanno **sulla stessa diagonale secondaria**
- **Nuclei speculari**, hanno numeri di protoni e neutroni simmetrici
- **Isotoni** hanno stesso numero di neutroni N , dunque nella carta dei nuclidi sono **sulla stessa colonna**.
- **Isomeri** nuclei che con N, Z fissati si presentano in due stati energetici distinti di cui uno fondamentale e uno eccitato che poi decade lentamente detto **metastabile**.
- **vita media** τ il tempo necessario affinché il numero di nuclei si riduca di un fattore e , ricordando la relazione $N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$. **Con tempo di dimezzamento** si intende invece il tempo necessario affinché la popolazione di nuclei dimezzi, e si lega alla vita media con la relazione $T_{\frac{1}{2}} = \ln(2)\tau$.

Dalla carte vediamo che le caselle nere (**valle di stabilità**, stanno al centro della figura) sono corrispondenti ad isotopi particolarmente stabili, e al raffreddarsi dei colori la stabilità diminuisce fino al viola che corrisponde ad isotopi con vita media così breve da non presentarsi in natura. Fino a $Z \simeq 40$ la valle di stabilità segue la bisettrice, deviando un po' a destra oltre tale valore: questo perchè crescono i protoni causando repulsione coulombiana crescente tra essi e dunque la necessità di più neutroni per distanziarli e portare all'equilibrio. Oltre al ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ i nuclei diventano troppo compatti e i protoni sono troppo vicini per avere davvero stabilità, quindi avremo ancora specie longeve mentre altre esistono come decadimento di specie più pesanti. Oltre ancora, non esistono più nuclei.

Per N o Z pari ho i **numeri magici**, che presentano isotopi di grande stabilità rispetto a quelli vicini, e a incroci di N e Z entrambi magici ho **numeri doppio magici**. Essi hanno composizione interna del nucleo particolarmente ordinata e dunque molto stabile.

Immaginiamo ora la carta come un grafico 3D di funzione $\frac{1}{\tau}$:



Salendo i pendii la stabilità diminuisce, fino ai bordi detti **drip lines** di protone(superiore,sx, ben mappata) o neutrone(inferiore,dx, più fumosa) fatte dalle configurazioni nucleari per cui l'energia di separazione protonica o neutronica è nulla, determinanti il confine tra configurazioni di energia di legame positiva e quelle ignote al di fuori delle quali i nucleoni non sono tenuti assieme.

2.3 Modelli

2.3.1 Modello a gas di Fermi

2.3.2 Modello a goccia di liquido

2.3.3 Deutone

2.3.4 Modello a shell atomico e nucleare

2.3.5 Modello collettivo

2.4 Reazioni nucleari

2.4.1 Fissione nucleare

2.4.2 Fusione nucleare

2.5 Decadimenti

2.5.1 Alpha

2.5.2 Beta

2.5.3 Gamma

2.6 Interazione radiazione-materia

2.6.1 sezione d'urto

2.6.2 Radiazioni EM

2.6.3 Particelle cariche