

# Fisica Nucleare e Subnucleare

Prof.ssa S. Leoni, a.a. 2024-25

Leonardo Cerasi<sup>1</sup>, Lucrezia Bioni

GitHub repository: [LeonardoCerasi/notes](#)

<sup>1</sup>[leo.cerasi@pm.me](mailto:leo.cerasi@pm.me)

---

# Indice

Indice	ii
Introduzione	1
<b>I    Fisica Nucleare</b>	<b>3</b>
<b>1    Nuclidi</b>	<b>4</b>
1.1    Definizioni e nomenclatura . . . . .	4
1.1.1    Unità di misura . . . . .	4
1.1.2    La tavola di Segré . . . . .	5

---

# Introduzione

**Scale di grandezza** Nello studio della fisica dei nuclei e delle particelle subatomiche, le scale di grandezza tipiche sono estremamente piccole: la scala tipica delle dimensioni di un atomo è  $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ , mentre quella del nucleo è di 4 ordini di grandezza minore ( $10^{-14} \text{ m} = 10 \text{ fm}$ ); per un singolo nucleone, invece, le dimensioni sono dell'ordine di  $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ , e il range tipico delle interazioni deboli è  $10^{-18} \text{ m}$ .

Per quanto riguarda la scala di energie, i processi atomici hanno energie solitamente attorno a  $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ , mentre quelli nucleari arrivano anche a  $10 \text{ MeV}$ ; per le interazioni ad alte energie studiate dalla fisica particellare, i moderni acceleratori arrivano a scale di  $1 \text{ TeV}$ .

Per studiare la struttura dei costituenti della materia a vari livelli, è necessario utilizzare fasci di particelle (fotoni, elettroni, etc.) con determinate lunghezze d'onda (relazioni di de Broglie  $\lambda = \frac{h}{p}$ ), corrispondenti a determinate energie: per sondare i nuclei atomici sono necessari  $\lambda \sim 10 \text{ fm}$  ed  $E \sim 1 \text{ MeV}$ ; per evidenziare la struttura a molti corpi del nucleo atomico servono  $\lambda \sim 1 \text{ fm}$  ed  $E \sim 10 \text{ MeV}$ ; se si vogliono studiare gli stati eccitati dei singoli nucleoni occorrono  $\lambda \sim 10^{-3} \text{ fm}$  ed  $E \sim 1 \text{ GeV}$ ; infine, se si vuole mettere in luce la struttura composta da quark dei nucleoni, bisogna raggiungere  $\lambda < 10^{-4} \text{ fm}$  ed  $E > 200 \text{ GeV}$ .

**Interazioni fondamentali** I vari costituenti della materia interagiscono tramite 4 interazioni fondamentali:

1. interazione elettromagnetica: mediata dal fotone ( $m_\gamma = 0$ ), con coupling constant  $\alpha \approx 1/137$  e raggio d'azione infinito (essendo il fotone massless);
2. interazione debole: mediata dai bosoni  $W^\pm$  e  $Z^0$  ( $m_W = 80.4 \text{ GeV}$ ,  $m_Z = 90.1 \text{ GeV}$ ), con coupling constant  $G_F \approx 1 \cdot 10^{-5}$ ) e raggio d'azione  $< 10^{-3} \text{ fm}$ , dovuto al fatto che i bosoni  $W^\pm$  e  $Z^0$  sono molto pesanti e dunque, per il principio d'indeterminazione ( $\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$ ), possono essere prodotti solo come particelle virtuali in processi di scattering per periodi di tempo estremamente brevi;
3. interazione forte: mediata dai gluoni ( $m_g = 0$ ), con coupling constant  $\alpha_s \approx 1$  e raggio d'azione  $\approx 1 \text{ fm}$ , dovuto al fatto che i gluoni, sebbene massless, possono interagire tra loro;
4. interazione gravitazionale: mediata dall'ipotetico gravitone ( $m_G = 0$ ), con coupling constant  $G_N \approx 6 \cdot 10^{-39}$  e raggio d'azione infinito.

Come si può notare, la gravità ha un'intensità di decine di ordini di grandezza inferiore alle altre interazioni fondamentali, per questo in ambito atomico, nucleare e particellare può essere trascurata.

**Esperimenti** A differenza della fisica atomica, che è descritta completamente dalla QED (Quantum Electrodynamics), la fisica nucleare non ha un'unica teoria coerente: la teoria fondamentale dell'interazione forte, la QCD (Quantum Chromodynamics), descrive le interazioni tra quark (mediate da gluoni), non quelle tra nucleoni (mediate da mesoni virtuali); inoltre, in ambito atomico le energie che entrano in gioco nei decadimenti ( $\sim 10$  MeV) sono meno dello 0.1% della massa del nucleo (espressa in unità naturali), dunque gli effetti relativistici possono essere ignorati, mentre per quanto riguarda i processi tra nucleoni le energie possono essere anche 100 volte la massa equivalente del protone, rendendo necessario l'utilizzo della meccanica quantistica relativistica; infine, bisogna considerare che sia il nucleo atomico che i nucleoni sono sistemi complessi a molti corpi, dunque, anche avendo una teoria dell'interazione tra singole coppie di costituenti, è estremamente difficile sviluppare modelli teorici per descrivere questi sistemi, e la trattazione è principalmente di natura fenomenologica, con tante teorie dei singoli processi che vengono sviluppate a partire dai dati sperimentali.

Gli esperimenti in fisica nucleare (utilizzati anche per studiare gli adroni in generale) sono principalmente di due tipi:

1. scattering: un fascio di particelle, di cui si conoscono energia e momento lineare, è diretto verso l'oggetto bersaglio da studiare e, attraverso le variazioni di quantità cinematiche misurabili, è possibile studiare le proprietà dell'interazioni e la struttura del bersaglio (risoluzione data dalla relazione di de Broglie);
2. spettroscopia: nucleoni (o anche mesoni e barioni) vengono eccitati e si studiano i prodotti del decadimento di questi stati eccitati, inferendo le proprietà degli stati eccitati e le interazioni tra i prodotti di decadimento.

Sia esperimenti di scattering che esperimenti spettroscopici necessitano di energie di ordini di grandezza simili.

Nel caso dello scattering è importante studiare la sezione d'urto d'interazione (cross section), ovvero la probabilità che avvenga una determinata reazione: in base all'angolo solido  $\Delta\Omega$  del rivelatore, alla cross section  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ , all'intensità  $I_0$  del fascio incidente e alla densità numerica di particelle  $n_0$  che attraversano lo spessore  $dz$  del rivelatore, si può calcolare il numero di particelle rilevate in funzione dell'angolo d'emissione:

$$\frac{dn(\theta)}{dt} = I_0 n_0 dz \frac{d\sigma}{d\Omega} \Delta\Omega \quad (1)$$

La cross section è un'area geometrica (l'area effettiva di collisione) ed è solitamente misurata in barn:  $1 \text{ barn} = 100 \text{ fm}^2$ ; questa sezione d'urto è in realtà molto grande e misure più tipiche sono espresse in microbarn.

**Parte I**

**Fisica Nucleare**

# Nuclidi

## 1.1 Definizioni e nomenclatura

Un nuclide (o nucleo) è una specifica combinazione di protoni e neutroni: si definiscono il numero atomico  $Z$  come il numero di protoni, il numero di neutroni  $N$  ed il numero di massa  $A = Z + N$  come il numero di nucleoni. In un atomo neutro,  $Z$  è anche il numero totale di elettroni negli orbitali. Il simbolo completo di un nuclide è  ${}_Z^AX_N$ , dove  $X$  è il simbolo della specie chimica: tale scrittura è però ridondante, poiché la specie chimica definisce di per sé il numero di protoni nel nuclide, dunque è sufficiente scrivere  ${}^AX$ .

Nuclidi con lo stesso  $Z$  sono detti isotopi, con lo stesso  $A$  isobari e con lo stesso  $N$  isotoni.

### 1.1.1 Unità di misura

Nell'ambito della fisica nucleare e particellare è sconsigliato utilizzare le unità di misura del Sistema Internazionale: unità di misura tipiche sono il fermi  $1\text{ fm} = 10^{-15}\text{ m}$ , l'elettronvolt  $1\text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19}\text{ J}$  e l'unità di massa atomica  $1\text{ u} = 1.6606 \cdot 10^{-27}\text{ kg} = 931.502\text{ MeV}/c^2$  (definita come  $1/12$  della massa di un atomo di  ${}^{12}\text{C}$ ).

Per semplificare le equazioni, è utile porre le costanti fondamentali  $c = \hbar = 1$ : questo sistema di misura è detto Sistema Naturale e in esso massa, momento lineare, energia, lunghezza $^{-1}$  e tempo $^{-1}$  hanno la stessa unità di misura, poiché le equazioni di Einstein, Plank e de Broglie diventano rispettivamente  $E^2 = m_0^2 + p^2$ ,  $E = 2\pi\nu$  e  $\lambda = \frac{2\pi}{p}$ .

#### 1.1.1.1 Masse e costanti

Nel SI, è utile ricordare i seguenti valori approssimati delle costanti fondamentali:

$$c = 2.99792458 \cdot 10^8\text{ m/s} \approx 3 \cdot 10^8\text{ m/s}$$

$$\hbar = 6.58211928 \cdot 10^{-22}\text{ MeV s} \approx \frac{2}{3} \cdot 10^{-21}\text{ MeV s}$$

$$\hbar c = 197.3269718\text{ MeV fm} \approx 200\text{ MeV fm}$$

Si possono quindi esprimere le masse dei nucleoni e dell'elettrone in varie unità di misura:

$$m_p = 1.673 \cdot 10^{-27}\text{ kg} = 1.00728\text{ u} = 938.279\text{ MeV}/c^2$$

$$m_n = 1.675 \cdot 10^{-27}\text{ kg} = 1.00867\text{ u} = 939.573\text{ MeV}/c^2$$

$$m_e = 9.110 \cdot 10^{-31}\text{ kg} = 0.511\text{ MeV}/c^2$$

### 1.1.2 La tavola di Segré

Al pari delle specie chimiche nella tavola periodica, anche i nuclidi possono essere messi in una tabella, tipicamente in un piano  $Z - N$  (Fig. 1.1): questa viene detta tavola di Segré e permette di tracciare facilmente i vari decadimenti radioattivi dei nuclidi, visualizzando efficacemente le decay chains.

Come si vede in Fig. 1.2, è possibile distinguere la tavola dei nuclidi in due regioni separate da due linee: queste sono dette nuclear driplines e distinguono tra configurazioni di protoni e neutroni che possono effettivamente formare dei nuclidi (sia stabili che instabili, ovvero radioattivi) e configurazioni nelle quali invece l'interazione forte non riesce a mantenere insieme i nucleoni per formare un nucleo. Si stima che possano esistere oltre 7000 nuclidi nell'Universo, ma di questi solo circa 3000 sono stati effettivamente scoperti (di cui solo 251 nuclidi stabili): si parla in questo caso di "Terra incognita" per indicare il teoricamente alto numero di nuclidi ancora ignoti; in particolare, è stata teoricamente prevista un'"isola" di elementi super-pesanti attorno a  $Z = 114$  ed oltre, con nuclidi con vite medie dell'ordine di minuti o giorni: sebbene non ancora osservati, si pensa che la chimica degli elementi super-pesanti con  $Z > 118$  sia di natura relativistica, dunque incomparabile a quella degli elementi fin'ora scoperti.

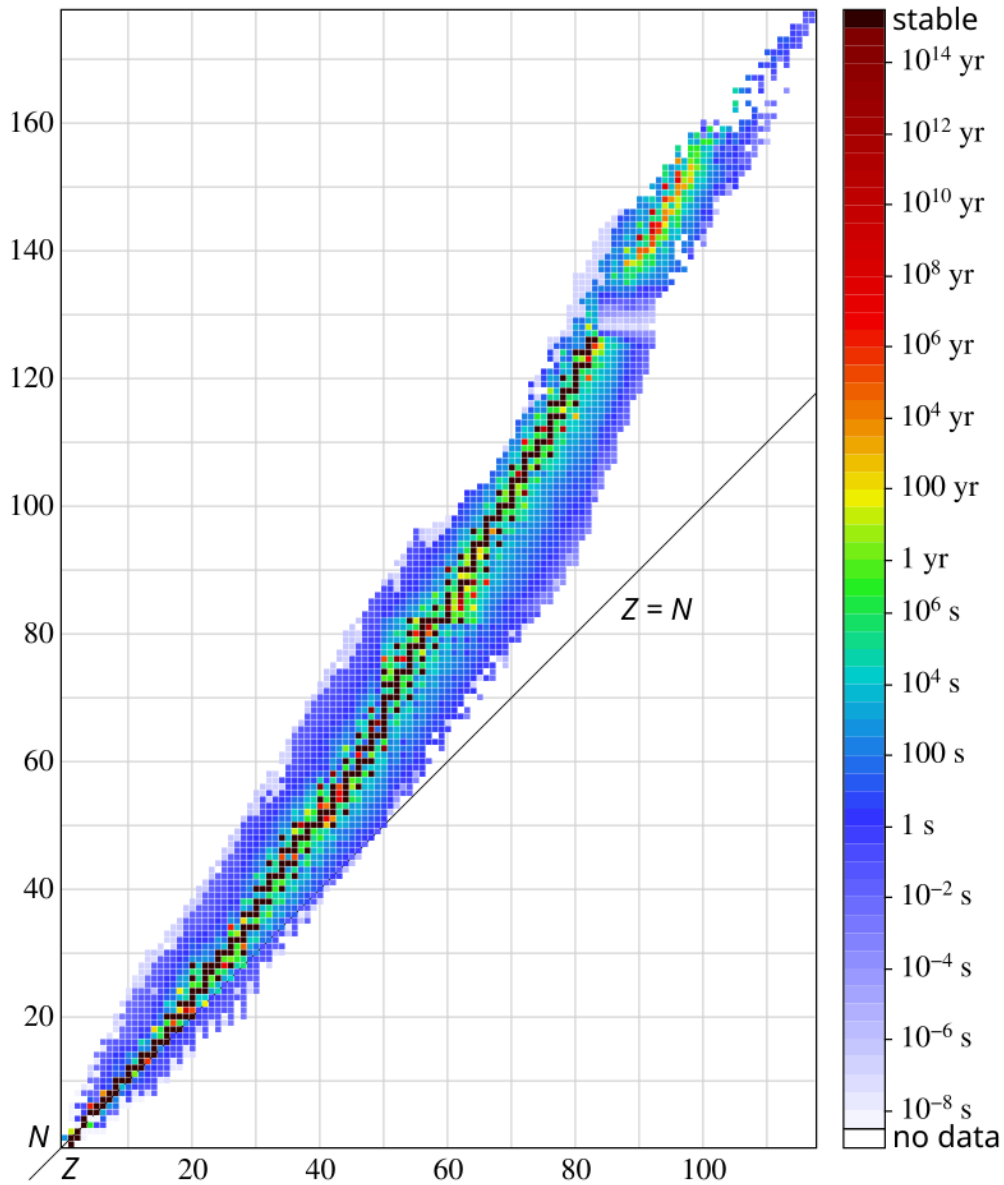


Figura 1.1: Tavola di Segré.

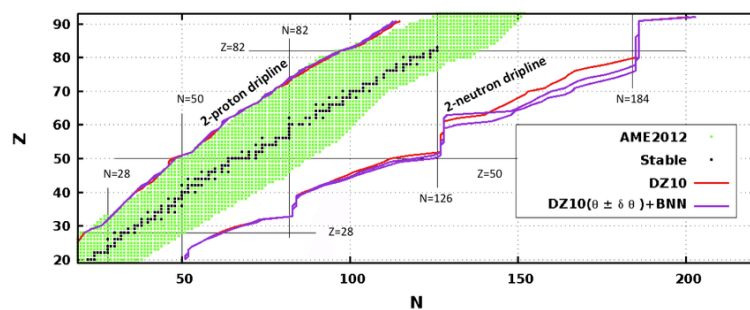


Figura 1.2: Nuclear driplines.