

Fisica nucleare

Emissione ed assorbimento della luce

Dicesi **radiatore** un generatore di energia raggiante cioè un emettitore di onde elettromagnetiche qualunque ne sia la lunghezza d'onda. I fenomeni più semplici della **spettrografia** hanno indotto a credere che l'emissione luminosa dovesse essere localizzata nell'atomo o, al più, nella molecola. L'**analisi spettrale** si fonda sulla constatazione che lo spettro di emissione dei corpi aeriformi luminosi è uno **spettro a righe** e che ogni riga deve essere attribuita alla presenza nel corpo luminoso di atomi (o molecole) di determinata natura chimica. Analogamente, gli aeriformi danno uno **spettro di assorbimento a righe** ed ogni riga di assorbimento deve essere attribuita alla presenza nell'aeriforme di atomi o molecole assorbenti, di determinata natura chimica. Per l'emissione e l'assorbimento della luce vale la seguente **legge di Kirchhoff**: una sostanza emette radiazioni di una lunghezza d'onda purché, in uguali condizioni fisiche, tale sostanza sia anche capace di assorbirla (non è vero il viceversa) cioè **un corpo è capace di assorbire solo le radiazioni che è capace di emettere**. Diversamente: <<**Ogni sostanza assorbe da una sorgente luminosa quelle stesse radiazioni che, poi, quando si trova alla stessa temperatura della sorgente, è in grado di emettere.**>> Si può dire “grosso modo” che la spettroscopia, sia di emissione che di assorbimento, permette lo studio della costituzione molecolare e, successivamente, della costituzione dell'atomo, fino ai strati più profondi di questo, fino a quelli più prossimi al nucleo.

Spettri luminosi

L'analisi di una radiazione visibile eseguita mediante opportuni strumenti porta, come risultato, ad una rappresentazione della radiazione stessa su lastra fotografica o

Fisica nucleare

su schermo, che viene detta **spettro**. Il metodo più elementare di analisi per un raggio di luce consiste nel farlo cadere su un prisma che lo rifrange e lo disperde in tanti raggi, ciascuno dei quali corrisponde ad una delle frequenze componenti: raccogliendo i raggi emergenti su uno schermo, per ogni frequenza (cioè per ogni componente monocromatica) appare una **riga colorata**, o meglio, essendo in genere le singole frequenze troppo fitte per risultare visibili separatamente, appare una striscia continua di colori diversi di intensità variabile.

Lo strumento usato per questo tipo di analisi, puramente qualitative, è lo **spettroscopio**. Per ottenere e analizzare gli spettri si può ricorrere anche a mezzi diversi e più dispersivi del prisma ad esempio a **interferometri**. In questo caso una luce policromatica è l'insieme di immagini colorate, ciascuna per ogni componente monocromatica, che lo strumento fornisce della fenditura illuminata dalla luce in esame. Lo spettro di una sostanza è caratteristico e non confondibile con quello di qualsiasi altra sostanza.

Classificazione degli spettri

Gli spettri luminosi sono di due tipi: spettri di emissione e spettri di assorbimento.

(a) Spettri di emissione: Sono gli spettri della luce emessa da sorgenti luminose. Essi si suddividono in tre categorie: **spettri continui**, **spettri a righe**, **spettri a bande**.

Spettri continui: Sono emessi da corpi solidi o dai liquidi incandescenti. Negli spettri continui sono presenti tutte le frequenze.

Spettri a righe: tali spettri sono caratterizzati dal fatto che l'intensità luminosa appare concentrata attorno ad un certo numero discreto di frequenze. In questo caso si osservano soltanto poche righe colorate in un campo nero. Tali righe rappresentano le immagini monocromatiche della fenditura. Gli spettri a righe sono emessi da

Fisica nucleare

aeriformi portati all'incandescenza ed aventi molecola monoatomica. Il numero delle righe osservate negli spettri della luce emessa dai diversi elementi chimici, il colore di tali righe, la loro posizione nello spettro, sono caratteristiche dipendenti soltanto dalla natura degli elementi. Il sodio (N_A) se vaporizzato emette sempre uno spettro con due righe gialle molto vicine; il Litio (L_i) ne emette uno con riga arancione ed una gialla. Nessun altro elemento conosciuto emette spettri uguali a quelli che abbiamo descritto.

Spettri a bande: Sono spettri a righe, nei quali però le righe sono talmente numerose e vicine da formare delle zone colorate dette bande. Sono emessi da aeriformi aventi molecole poliatomiche e portati all'incandescenza.

Spettri di assorbimento

Gli spettri di assorbimento sono degli spettri continui solcati da righe o bande nere in base alle quali è possibile conoscere i tipi di radiazione che sono stati assorbiti dall'aeriforme posto tra la sorgente luce bianca e la fenditura dello spettroscopio.

Interpretazione degli spettri Boschi Mariani Pagina 557

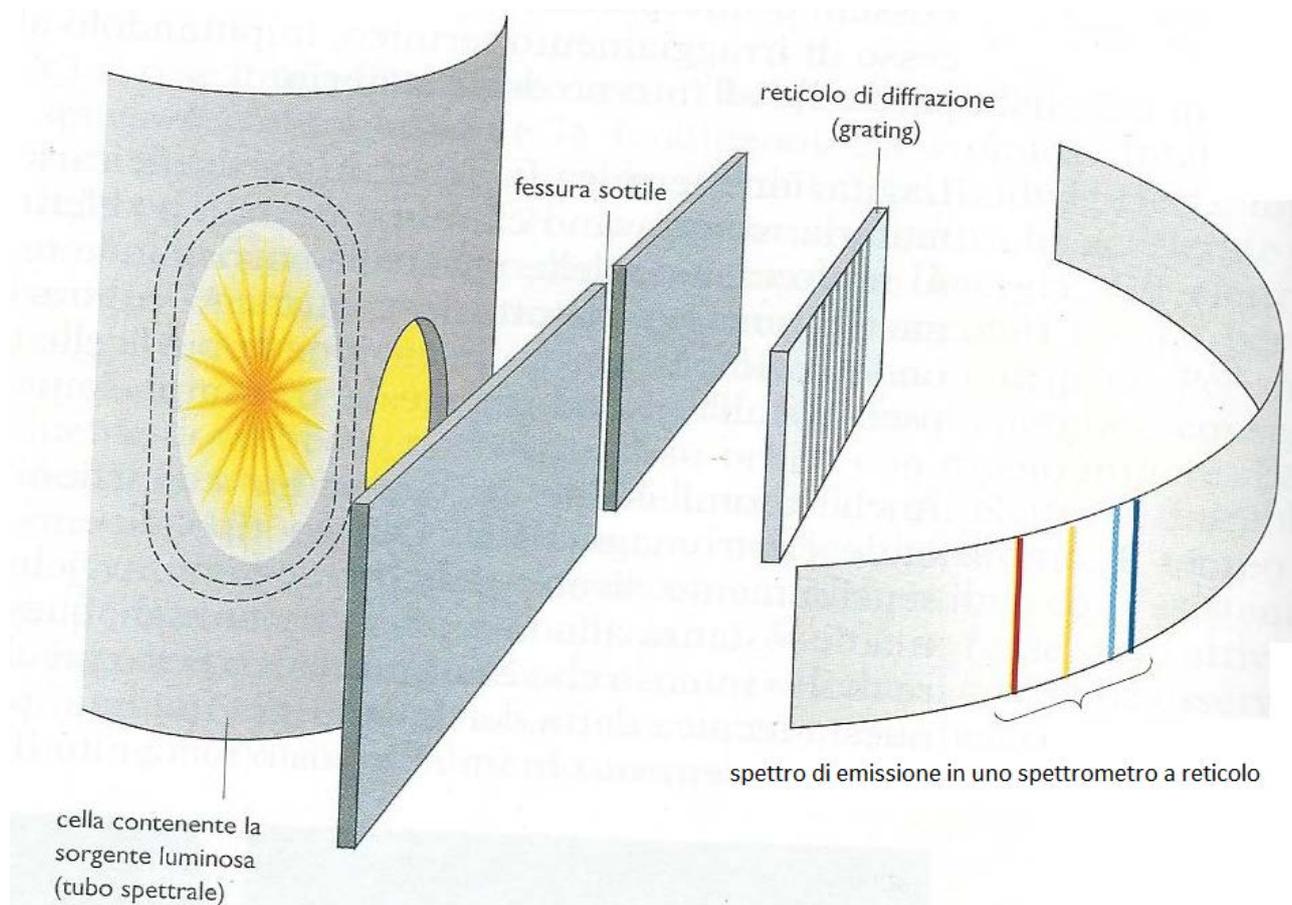
Gli spettri a righe sono quelli che risultano dalle radiazioni emesse da atomi eccitati appartenenti ad uno stesso. Ogni riga rappresenta la transizione di un elettrone orbitale tra due livelli energetici, ed essendo quest'ultimi quantizzati anche gli spettri

risultano discontinui:
$$\nu = f = \frac{E_n - E_s}{h}$$

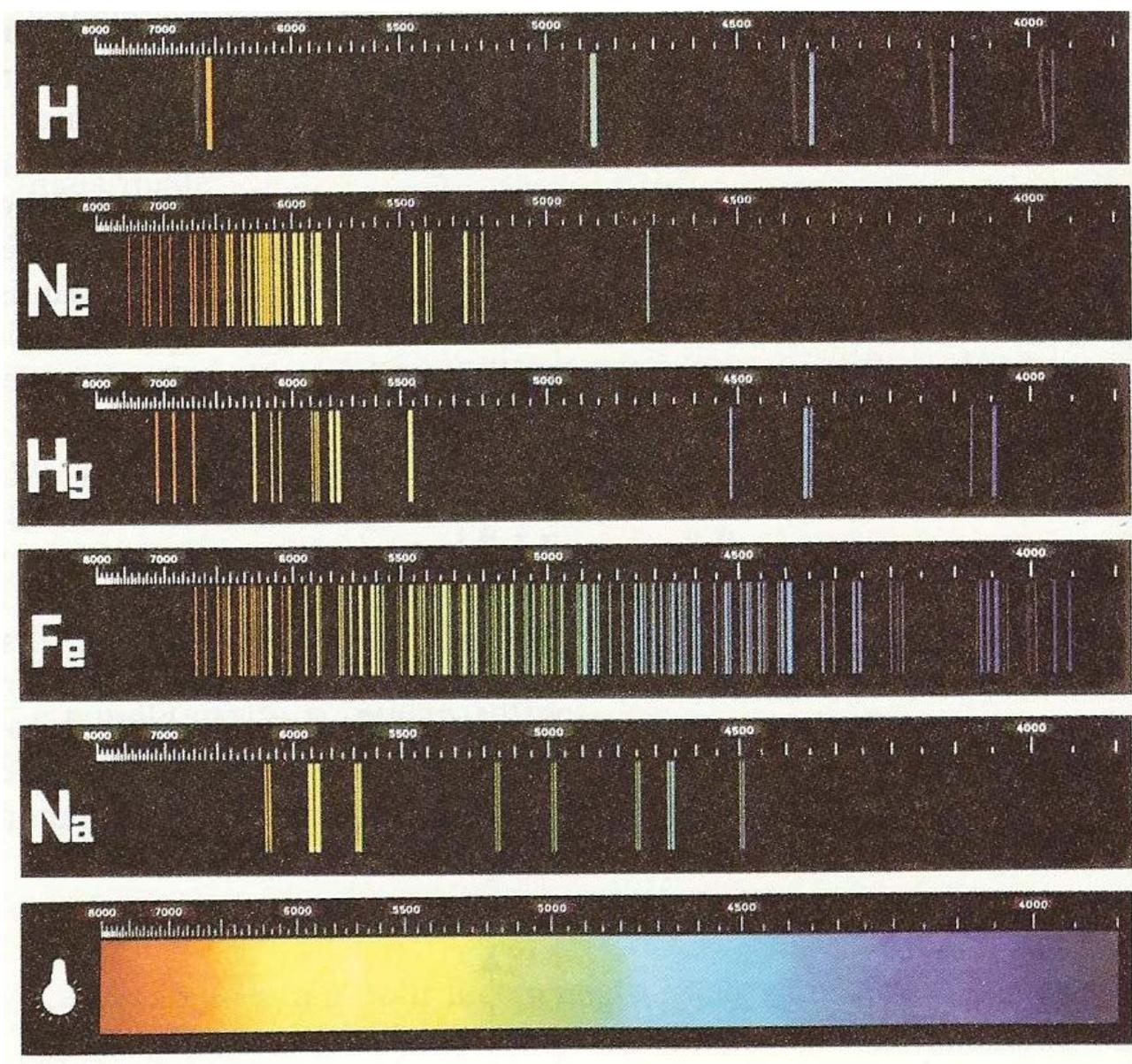
Il numero più o meno elevato delle righe di emissione dello spettro di un certo elemento è dovuto al numero più o meno elevato di passaggi (o transizioni) di elettroni da un'orbita all'altra, mentre il colore di ogni riga è dovuto al passaggio tra due determinate orbite di determinato livello energetico. Gli **spettri di assorbimento** degli elementi sono invece costituiti da righe nere, dovute all'assorbimento di quelle radiazioni aventi energia tale che, se assorbite per intero,

Fisica nucleare

permette ad essi di effettuare gli stessi passaggi di quando emettono, però in verso opposto. Gli **spettri continui** sono emessi da solidi, liquidi ed aeriformi aventi molecole poliatomiche. Sono dovuti a vari tipi di vibrazioni delle molecole e trovano una soddisfacente spiegazione in meccanica quantistica. Gli **spettri molecolari** consistono di righe molto ravvicinate, raccolte in gruppi chiamati **bande**. Le righe di una banda appaiono separate solo se osservate mediante spettroscopi ad alto potere separatore. Quando le righe non sono separate, ogni banda appare simile ad un tratto di spettro continuo.

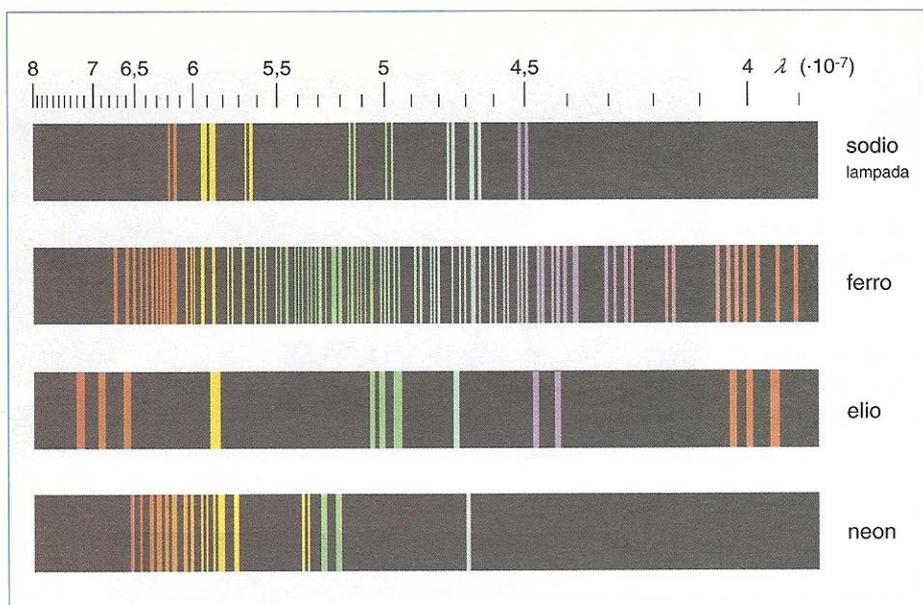


Fisica nucleare

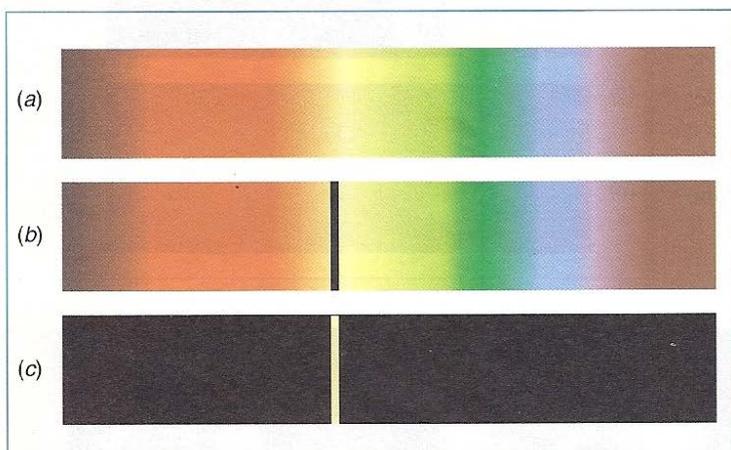


Spettri di emissione di idrogeno, neon, mercurio, ferro, sodio allo stato aeriforme a confronto con lo spettro di emissione del filamento incandescente di una lampadina. Agli elementi di maggiore numero atomico, dotati cioè di un maggiore numero di elettroni orbitali, è associato uno spettro con un numero maggiore di righe.

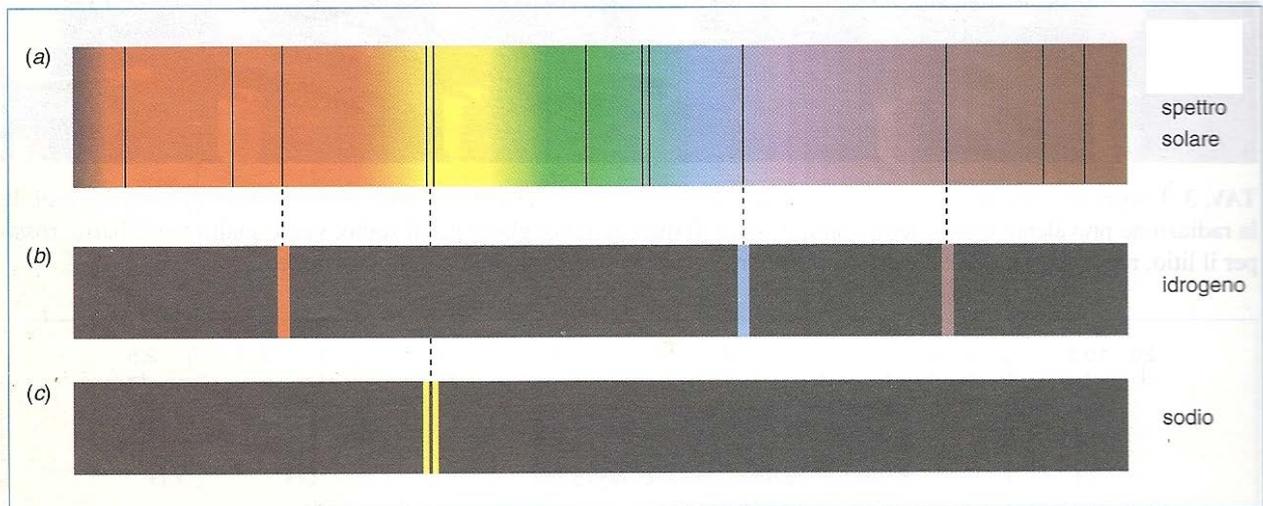
Fisica nucleare



TAV. 5 Spettri di emissione di due metalli (sodio e ferro) e di due gas nobili (elio e neon). Le lunghezze d'onda sono riportate su scala logaritmica.



TAV. 6 (a) Spettro continuo; (b) spettro di assorbimento del sodio; (c) spettro di emissione del sodio.



TAV. 7 (a) Spettro solare con righe di Fraunhöfer; (b) spettro di emissione dell'idrogeno; (c) spettro di emissione del sodio a bassa temperatura.

Seconda legge di Kirchhoff

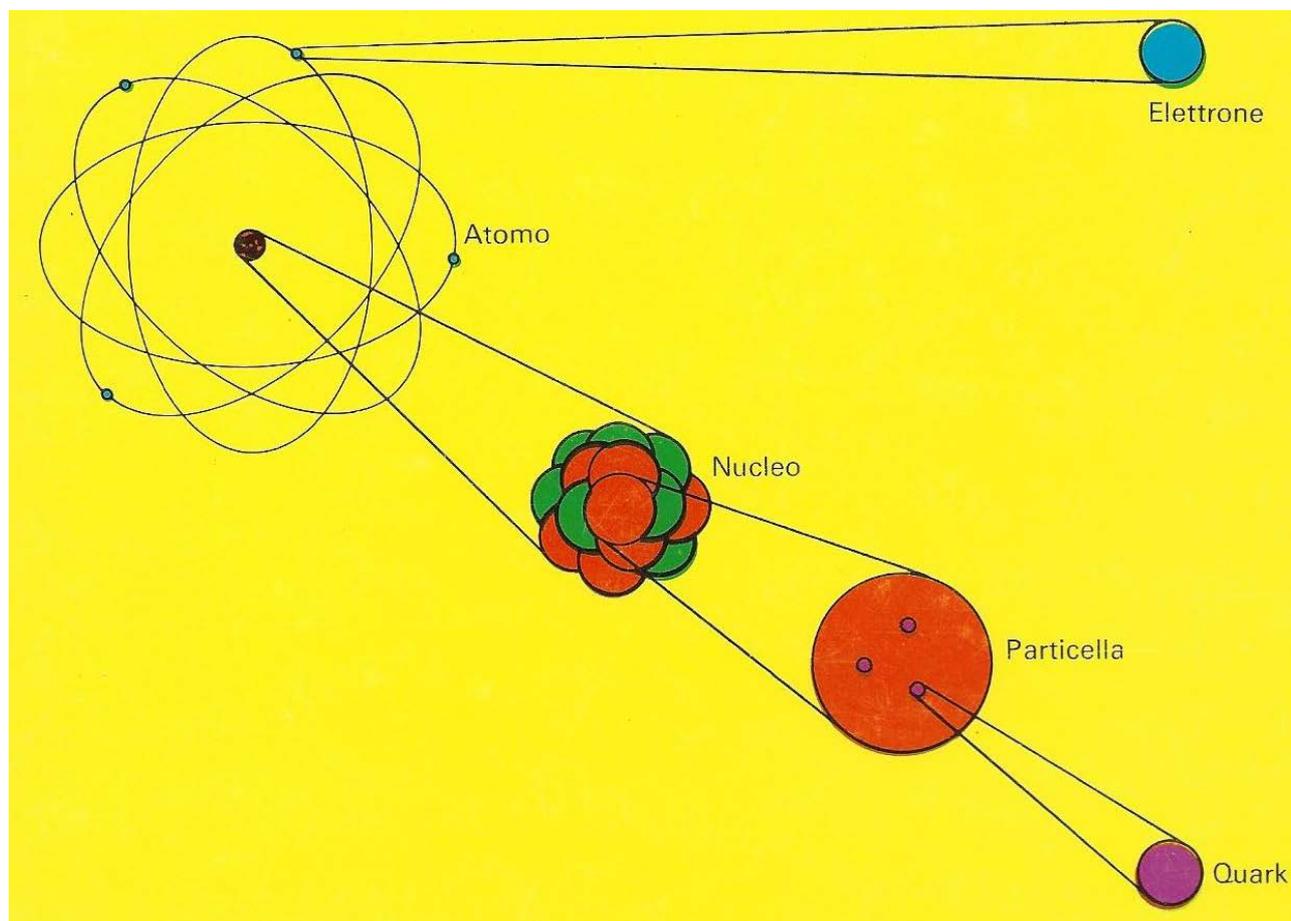
Per il flusso $d\phi$ di energia emessa in tutte le direzioni (cioè l'energia radiante emessa in tutte le direzioni riferita al tempo t), in un campo spettrale $\nu, \nu+d\nu$ dalla superficie emettente dS di area dA , vale la seguente formula: $d\phi = b \cdot dA \cdot d\nu$ dove $b = b(\nu, T)$ dicesi **potere emittente** o **brillanza energetica spettrale** della sorgente a temperatura T .

Alla stessa maniera si definisce il **potere assorbente** o **fattore di assorbimento** $a(\nu, T)$: $d\phi = a \cdot dA \cdot d\nu$ dove $d\phi$ è la **potenza radiante assorbita** dalla superficie dS di area dA quando su essa incide un fascio di raggi la cui frequenza è compresa tra ν e $\nu+d\nu$. (**potenza radiante** = **energia radiante** assorbita riferita al tempo t).

La seconda legge di **Kirchhoff** afferma che: $\frac{b(\nu, T)}{a(\nu, T)} = i(\nu, T)$ dove $i(\nu, T)$ è una funzione universale delle sole variabili ν e T .

Fisica nucleare

Modello di Atomo



I nucleoni e gli isotopi

I nuclei degli atomi contengono protoni e neutroni. Il numero dei protoni contenuti nel nucleo si chiama **numero atomico** ed è contraddistinto dal simbolo **Z**. Il numero dei neutroni è contraddistinto dal simbolo **N**. Il numero totale dei protoni e dei neutroni contenuti nel nucleo di un atomo è chiamato **numero di massa** ed è contraddistinto dal simbolo **A**: $N + Z = A$. Protoni e neutroni, considerati nel loro insieme, sono chiamati **nucleoni**.

Fisica nucleare

Noi sappiamo che ogni atomo allo stato neutro è caratterizzato da

$$\begin{array}{ccc} N + Z = A & \{ \text{Numero di massa} \\ \swarrow & \searrow \\ \text{numero} & \text{numero di protoni} \\ \text{di neutroni} & \end{array}$$

A = numero di massa (atomica) **Z** = numero atomico

N=A-Z = numero di neutroni

Col termine **nucleone** si indica un protone o un neutrone considerato come costituente del nucleo di un atomo. Col termine **nuclide** si indica una <<specie>> di atomo allo stato neutro caratterizzato dal suo nucleo che possiede **A** nucleoni di cui **Z** sono protoni ed **N** sono neutroni. Il simbolo di nuclide sarà indicato così: ${}^A_Z X$

Ad esempio il simbolo ${}^{35}_{17}C_l$ rappresenta un atomo di cloro allo stato neutro avente **35 nucleoni**, precisamente **17 protoni** e **18 neutroni**. Accettato questo simbolo di nuclide allo stato neutro si sottintende che nel suo edificio entrano anche gli **elettroni** della nuvola elettronica circostante il nucleo. Tuttavia questo simbolo di nuclide non è sufficiente quando si studia fisica nucleare. D'altronde è un simbolo non proprio logico perché vuole indicare l'intero atomo (allo stato neutro) con le sole indicazioni nucleari cioè con i simboli **A**, **Z**. Occorre un simbolo per il solo nucleo;

esso sarà: $\left(\begin{array}{c} A \\ Z \end{array} X \right)$. Occorre anche un simbolo che indichi anche quanti elettroni sono

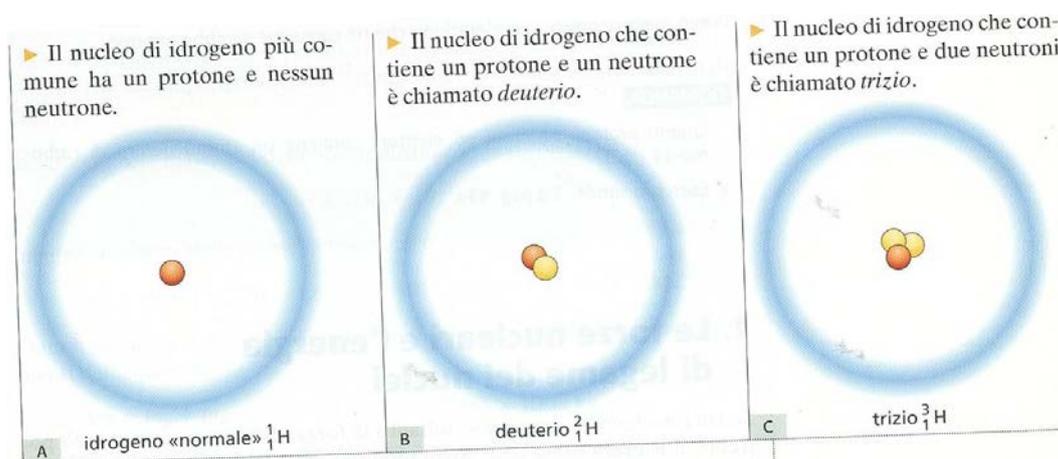
presenti nella nuvola elettronica. Si userà il simbolo: $\left(\begin{array}{c} A \\ Z \end{array} X \right)^{z'}$ (xx) dove **z'** indica il numero di questi elettroni. Per convenzione si intende che **Z** è il numero delle cariche elementari positive (protoni) del nucleo e **Z'** è il numero delle cariche elementari negative (elettroni) della nuvola ed il posto di **Z** e di **Z'** è quello indicato nel simbolo (xx).

Fisica nucleare

Per $Z=Z'$ il nuclide è allo stato neutro, come vuole la definizione originaria.
 $Z-Z'>0$: siamo presenza di un ione positivo (difetto di elettroni) $Z-Z'<0$ siamo in presenza di un ione negativo (eccesso di elettroni).

Invece il simbolo generalmente usato è ${}^A_Z X^{n+}$ oppure ${}^A_Z X^{n-}$ secondo che l'atomo è ionizzato n volte positivamente o negativamente. Qualche autore usa il simbolo ${}_Z X^A$ al posto del simbolo ${}^A_Z X$.

Il simbolo ${}^A_Z X$ è atto ad indicare una specie di atomo X avente A nucleoni di cui Z sono protoni; si dice che indica un **nuclide**. Se nulla si aggiunge, si immagina che esso sia allo stato neutro, allora è dotato di una nuvola di Z elettroni. Gli **isotopi** sono nuclidi aventi lo stesso numero (Z) di protoni ma non hanno lo stesso numero di neutroni. Pertanto gli **isotopi** sono nuclidi aventi lo stesso numero atomico Z ma diverso numero di massa (A). Pertanto quando due nuclei hanno lo stesso valore di Z ma diversi valori di A si dice che sono **isotopi** dell'elemento di numero atomico Z . Gli isotopi hanno le stesse caratteristiche chimiche ma hanno masse diverse ed occupano lo stesso posto nella tavola periodica di Mendeleev.



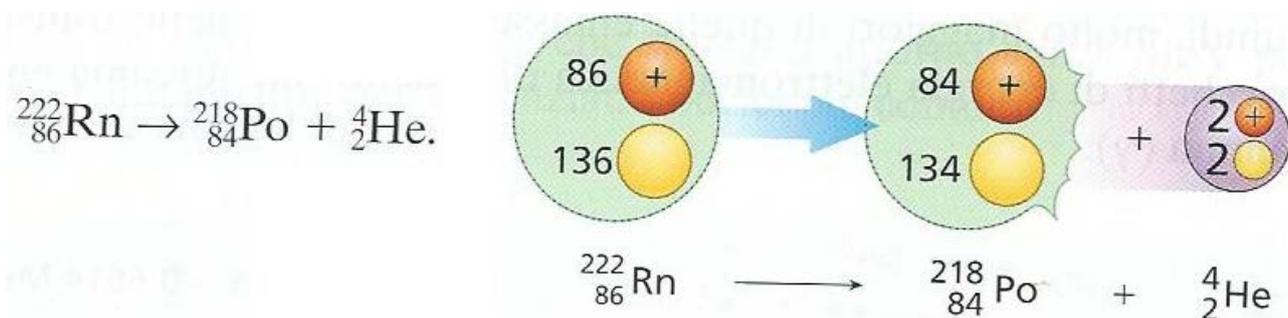
I tre nuclei di idrogeno hanno lo stesso valore di $Z(=1)$ ma diversi valori di A .
Pertanto hanno un diverso numero di neutroni N .

Fisica nucleare

In conclusione è perfettamente conciliato il modello del nucleo di un atomo costituito da un numero intero di nucleoni (protoni e neutroni) e con valori non interi della massa atomica A . Infatti ogni elemento è una opportuna miscela di isotopi. Inversamente uno stesso numero di massa atomica A può essere presente in atomi chimicamente diversi. Ad esempio i due atomi ${}^{64}_{28}\text{Ni}$, ${}^{64}_{30}\text{Zn}$ rispettivamente aventi numeri di massa (protoni) 30 e 30 , uno è nichel, l'altro è zinco. Ma essi hanno lo stesso numero di massa (28 protoni e 36 neutroni il primo, 30 protoni e 34 neutroni il secondo). Elementi di questo tipo prendono il nome di **isobari**: ${}^{116}_{48}\text{Cd}$; ${}^{116}_{50}\text{Sn}$.

Radioattività naturale

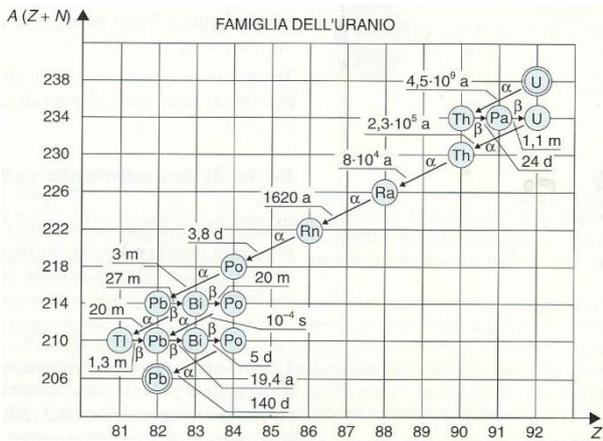
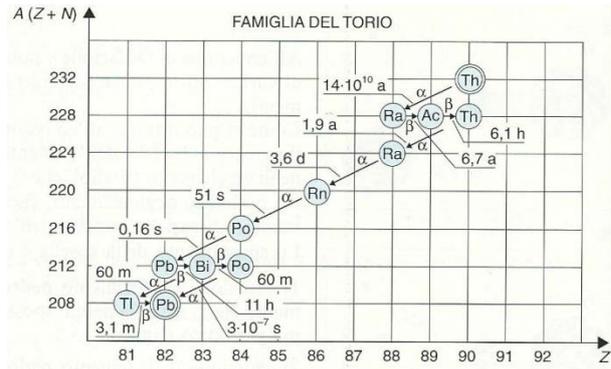
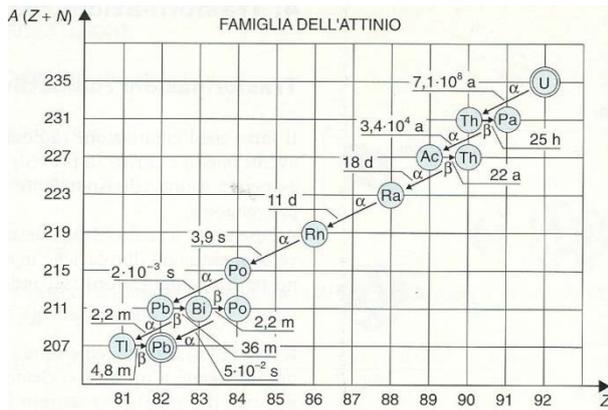
La radioattività è la proprietà dei nuclei di alcune sostanze (radio, attinio, torio.... E loro composti) di disintegrarsi spontaneamente emettendo radiazioni (α, β, γ) particolarmente intense trasformandosi in nuclei di elementi più leggeri.



Il fenomeno, scoperto da **Becquerel (1896)**, venne successivamente studiato da **Pierre e Marie Curie (1898)** e da **Rutherford** e da **Saddy (1896)**.

Si sono individuate in tutto tre serie o **famiglie** di sostanze radioattive: famiglia dell'**uranio**, dell'**attinio**, del **torio**.

Fisica nucleare



Le tre famiglie radioattive naturali. I numeri interni ai grafici indicano i periodi di semitrasformazione (**s = secondi** ; **m = minuti** ; **h = ore** ; **d = giorni** ; **a = anni**). In queste tabelle compare, in corrispondenza di ogni elemento il **numero atomico Z** (che designa il numero dei protoni di cui è costituito il nucleo) e il **numero di massa A** (che designa la somma dei protoni e dei neutroni)

Per valutare le masse degli atomi e dei nuclei si usa l'unità di **massa atomica**, indicata indicato col simbolo **u** (oppure **u.m.a.**, oppure **UMA**) e scelta in modo che la massa dell'atomo neutro (non del solo nucleo) del carbonio $^{12}_6\text{C}$ valga esattamente **12u**. Tale unità è collegata all'unità di massa del **S.I.** (il **chilogrammo**) dalla seguente relazione: **$1u = 1u.m.a. = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$**

massa protone = 1,007276u **massa neutrone = 1,008665u**

massa atomo di idrogeno (protone + elettrone) = 1,007825u

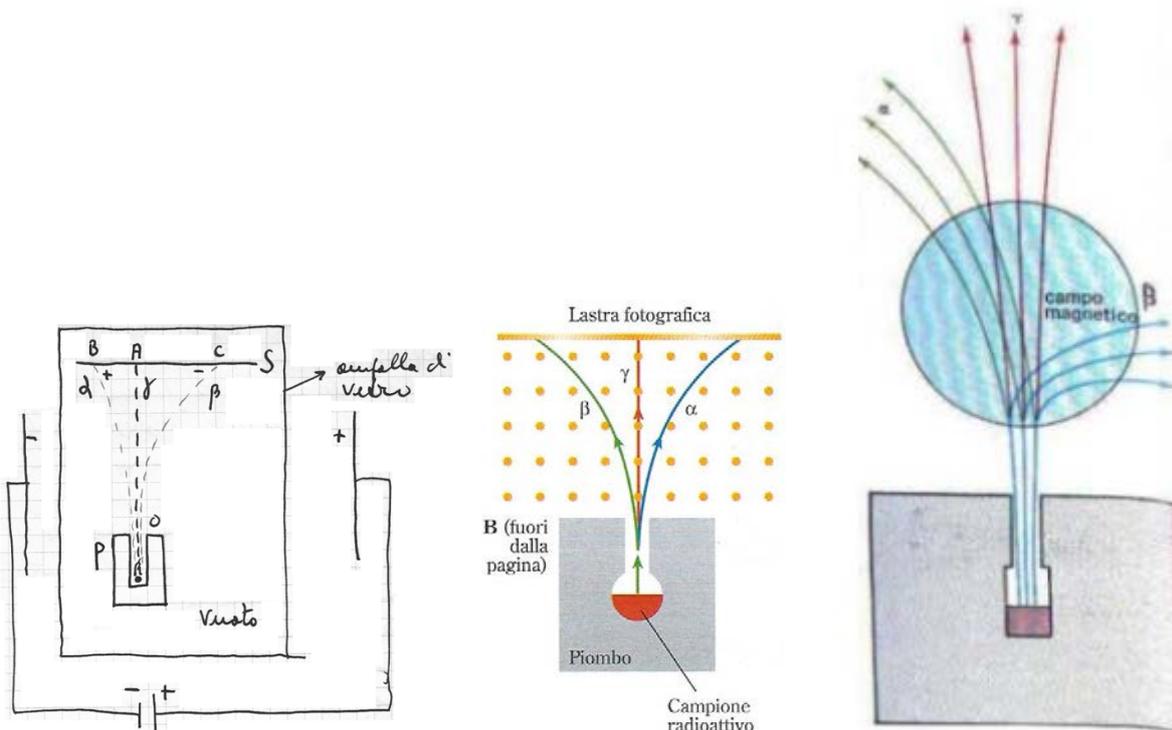
Perché per le masse del protone, del neutrone e dell'idrogeno troviamo i seguenti valori non espressi da numeri interi? Perché nella definizione di unità di misura della massa atomico abbiamo incluso gli elettroni orbitali del carbonio $^{12}_6\text{C}$.

Esse contengono una quarantina di elementi chimici radioattivi, tutti di **massa atomica A** elevatissima (da **238** a **206**). Tra questi elementi particolarmente noto

Fisica nucleare

è l'uranio ($A=226$, $Z=88$). Esso è uno delle poche sostanze radioattive naturali che può essere preparato, in quantità misurabile, dai minerali che lo contengono (pechblenda, carnotite,...). L'esperienza fondamentale sulla natura delle radiazioni emesse dai corpi radioattivi è la seguente.

Sul fondo di un foro fatto in un blocchetto **P** di piombo è posta una certa quantità (diciamo 10^{-6} kg) della sostanza radioattiva **R** che si vuole studiare. Tale sostanza deve essere solida ma non volatile. **S** è una lastra fotografica o uno schermo fluorescente. Il tutto è racchiuso in un'ampolla dove è fatto il vuoto. In **A**, sullo schermo fluorescente, appare una tacca luminosa. Dal cannoncino **RO** escono i raggi emessi da **R**, i quali, poi, procedono liberamente in linea retta nel verso **OA**. Se poi **S** è una lastra fotografica, in **A** essa risulta impressionata. L'analisi dei raggi si compie mediante l'azione di un campo elettrico o di un campo magnetico trasversali rispetto al tragitto **ROA** dei raggi.

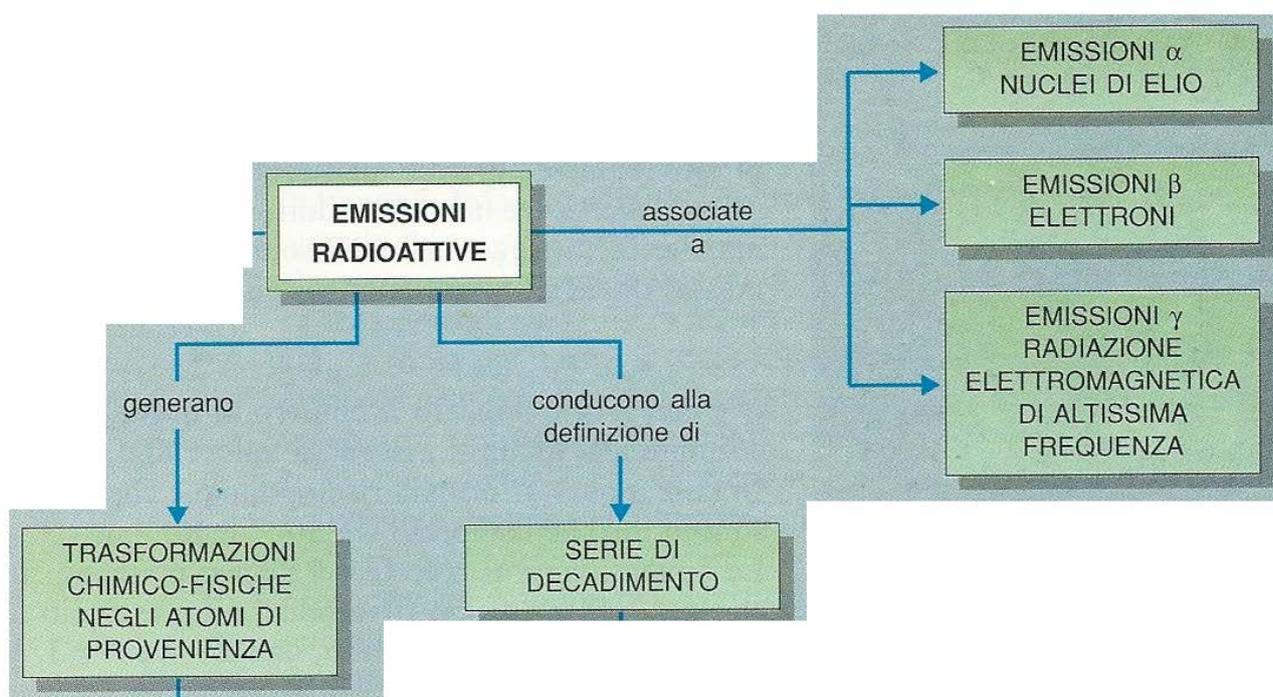


La radiazione emessa da un campione radioattivo è separata nei suoi tre componenti da un campo magnetico o da un campo elettrico.

Fisica nucleare

Nel caso più generale il fascio di raggio **OA** emesso dalla sostanza radioattiva naturale, sotto l'azione di uno di questi campi, si scinde in tre fascetti, **OB** (per i raggi α), **OA** (per i raggi γ), **OC** (per i raggi β).

Un fascio si flette verso il conduttore negativo e perciò è costituito da cariche positive alle quali si dà il nome di raggi α ; un secondo è attratto dal conduttore positivo e costituisce il fascio di raggi β ; il terzo invece procede in linea retta perché non è costituito da corpuscoli elettrizzati ma è formato da radiazioni analoghe ai raggi **X** che prendono il nome di raggi γ .



Proprietà dei raggi α

- (1) i raggi α sono costituiti da nuclei di elio (2 protoni e due neutroni) che hanno quindi due cariche positive
- (2) sono lievemente deviati da un campo magnetico o un campo elettrico in una direzione che ci consente di affermare che sono particelle cariche positivamente
- (3) queste particelle hanno scarso potere penetrante

Fisica nucleare

(4) hanno potere ionizzante

(5) le particelle α sono proiettate con velocità comprese tra **14000** e **21000** $\frac{km}{sec}$

(6) di solito sono emesse da nuclei di metalli pesanti (con elevato numero di massa **A**). Ad esempio: ${}_{92}\text{U}^{238} \rightarrow {}_{90}\text{Th}^{234} + {}_2\text{He}^4$

Quando un isotopo radioattivo, di numero atomico **Z** e numero di massa **A**, emette una particella α , l'atomo che si ottiene a seguito del decadimento radioattivo ha numero atomico **Z-2** e numero di massa **A-4**. Siamo in presenza del decadimento radioattivo α , cioè emissione di nuclei di elio ${}_2\text{He}^4$ secondo lo schema:



Proprietà dei raggi β

(1) sono lievemente deviati da un campo magnetico o un campo elettrico in una direzione che ci consente di affermare che sono particelle cariche negativamente

(2) i raggi β sono costituiti da elettroni dotati di grande velocità (prossima a quella della luce) ed hanno un discreto potere penetrante, essendo in grado di attraversare sottili lamine di piombo. E' stato dimostrato che le particelle beta sono elettroni "sparati" dal nucleo dell'atomo secondo questa trasformazione: nell'istante in cui un elettrone viene emesso dal nucleo radioattivo si ha la trasformazione di un neutrone in un protone (che rimane nel nucleo) e in un elettrone che viene espulso. Ma secondo il principio di conservazione della quantità di moto, se il neutrone (**N**) decadde in un protone (**P**) e in un elettrone e^- , queste due particelle dovrebbero allontanarsi in direzioni opposte. Poiché le loro direzioni formano un certo angolo il fisico austriaco **Pauli** ritenne che esistesse una terza particella, chiamata **neutrino** (ν) che completasse il bilancio della quantità di moto. In realtà si scoprì successivamente che questa terza particella è un **antineutrino**.

Fisica nucleare

Siamo in presenza del decadimento β^- con emissione di elettroni negativi o **negatoni** secondo il seguente schema: ${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z+1} X^A$

Nel caso di emissione β^+ si ha l'emissione di un elettrone positivo o **positone** secondo il seguente schema: ${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z-1} X^A$

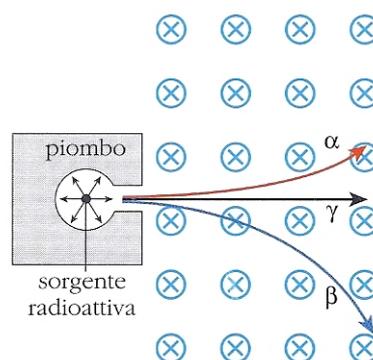
(3) i raggi β sono particelle ionizzanti

Proprietà dei raggi γ

I raggi γ non sono deviati né da campi elettrici né da campi magnetici, cioè non sono portatori di carica elettrica; non hanno massa e pertanto non sono di natura corpuscolare; si tratta di radiazioni elettromagnetiche di frequenza estremamente elevata e quindi di lunghezza d'onda molto piccola. Hanno elevatissimo potere penetrante e sono dotati di una quantità enorme di energia. Nell'emissione γ il nucleo dell'atomo varia la sua energia, ma non la sua natura. Passa da una certa configurazione eccitata dei suoi nucleoni ad un'altra più stabile avente un più alto livello di energia di legame.

Un fascio si flette verso il conduttore negativo e perciò è costituito da cariche positive alle quali si dà il nome di **raggi α** ; un secondo è attratto dal conduttore positivo e costituisce il fascio di **raggi β** ; il terzo procede in linea retta, cioè non è dovuto a corpuscoli elettrizzati, ma è formato da radiazioni analoghe ai raggi **X** che prendono il nome di **raggi γ** .

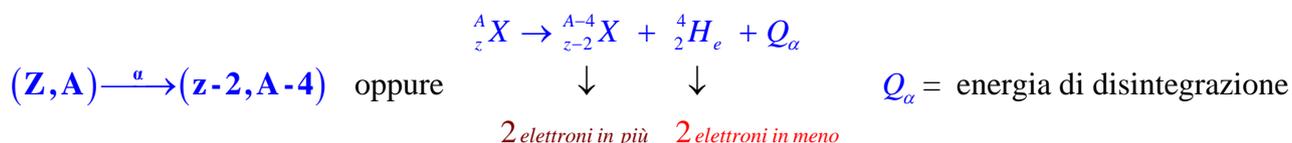
Un campo magnetico (assunto, in questo schema, perpendicolare al foglio con verso entrante) devia i raggi α e β in versi opposti, mentre lascia invariata la direzione dei **raggi γ** .



Fisica nucleare

Legge dello spostamento radiattivo

Prima legge di SODDY: Un nuclide a nucleo radioattivo, quando emette una particella α (che è il nucleo del nuclide ${}^4_2\text{He}$) si trasforma in un nuclide avente numero di carica (numero atomico) $z-2$ e numero di massa $A-4$. In simboli scriviamo:



L'atomo X , cos\`i alleggerito e carico negativamente assume lo stato neutro (ossia di nuclide in senso stretto) cedendo due degli elettroni periferici. Cos\`i costituisce un nuovo nuclide Y , cio\`e un nuovo edificio atomico ormai allo stato neutro di natura chimica e di propriet\`a fisiche diverse da quelle iniziali; esso ora appartiene alla casella di Mendeleev di due posti anteriori a quella precedentemente occupata. La particella α emessa \`e dotata di una certa energia cinetica che perde gradualmente per urto anelastico contro gli atomi del mezzo che la particella \`e costretta ad attraversare. Le molecole urtate si ionizzano; dopo un breve percorso la particella α \`e ridotta alla quiete.

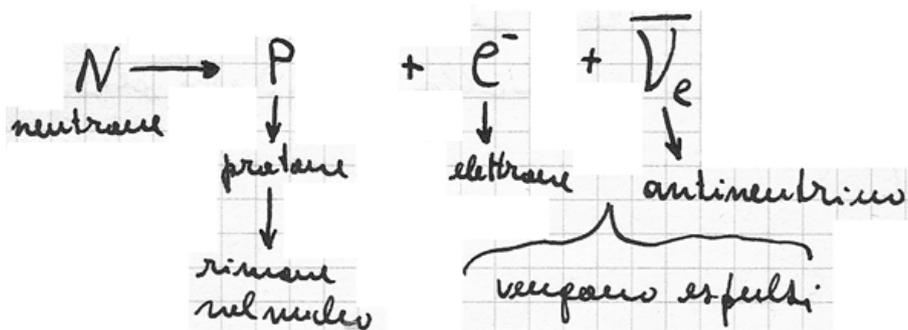
Seconda legge di SODDY

Un nuclide per emissione di una particella β^- , si trasforma in un nuclide avente lo stesso numero di massa A e di numero atomico Z superiore di una unit\`a.

Un nuclide radioattivo ${}^A_Z\text{X}$ quando emette un raggio β^- si trasforma nel nuclide ${}^A_{Z+1}\text{X}$ secondo il seguente schema: $(Z, A) \xrightarrow{\beta^-} (Z+1, A)$ oppure ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z+1}\text{X} + e^- + Q_\beta$ dove Q_β rappresenta l'energia di disintegrazione.

Il decadimento β^- si spiega ammettendo che all'interno del nucleo avvenga il seguente processo:

Fisica nucleare



L'elettrone e^- e l'antineutrino $\bar{\nu}_e$ sono creati nell'istante in cui avviene la disintegrazione (non preesistono nel nucleo) e sono espulsi dal nucleo.

Risulta un nuovo nuclide che ha lo stesso numero di massa A ma un neutrone in meno ($N-1$) ed un protone in più ($Z+1$); esso appartiene pertanto alla casella successiva della classificazione di Mendeleev. Dopo il decadimento, l'atomo risultante è carico positivamente, ma ritorna allo stato neutro (cioè di nuclide in senso stretto) appena può acquistare dall'esterno un elettrone il quale, però, resta periferico, cioè non penetra dentro il nucleo a ripristinare il nuclide originario. Anche questa volta la trasformazione radioattiva ha dato luogo ad un nuovo edificio atomico distinto dal precedente, di numero di protoni $Z+1$, cioè ad un nuovo elemento chimico ${}_{Z+1}^A X$. Ma ora il nuclide preesistente ${}_{Z}^A X$ ed il nuclide nuovo ${}_{Z+1}^A X$ sono isobari, cioè hanno uguale numero di massa A .

Montalbetti pagina 384 terza legge di Soddy

Terza legge di SODDY

Un nuclide, per emissione di una particella β^+ , si trasforma in un nuclide avente lo stesso numero di massa ma un numero atomico inferiore di una unità.

In questo caso il nucleo, perdendo una carica positiva, diminuisce il numero atomico di una unità. Questa legge vale solo per le disintegrazioni artificiali in quanto l'emissione β^+ si riscontra solo in tali disintegrazioni. Il decadimento radioattivo β^+ avviene secondo il seguente schema: ${}_Z X^A \xrightarrow{\beta^+} {}_{Z-1} X^A$

N.B. Rispetto alle emissioni di particelle α e β^- (e nei nucl. di o nucleo instabile ottenuti artificialmente, anche di β^+ cioè di positroni), l'emissione γ appare un fenomeno meno catastrofico per il nucleo (e per il nucl. de) cioè l'emissione γ non implica una trasformazione del nucleo emettitore ma semplicemente una dissociazione dei suoi nucleoni che forniscono energia discreta.

L'emissione γ talvolta è isolata, ma spesso appare fenomeno concomitante con l'emissione β e quasi sempre, con l'emissione α . Spesso, poi, avviene che più fotoni γ accompagnino l'emissione di un solo α o di un solo β .

Mentre tutti i fenomeni noti si accordano con l'idea che il numero di particelle α emesse durante il fenomeno radioattivo seguono altrettanti nuclei radioattivi disintegrati, ciò può non accadere

quando l'evento radioattivo consista nella emissione di particelle β^- (elettroni di origine nucleare) perché, se questa emissione è accompagnata da emissioni di fotoni γ come spesso succede e questi generino elettroni e^- di conversione interna (cioè provenienti dalla nuvola elettronica) si aggiungono alle particelle β^- gli elettroni di conversione, ed il contatore delle prime, conta anche i secondi.

Ma se l'affareccio che si sequola non sarà un semplice contatore, bensì un fotone uno spettro energetico, gli elettroni di origine nucleare β^- danno uno spettro continuo, gli elettroni di conversione interna danno uno spettro a righe, e si può distinguere tra i due tipi.

Fisica nucleare

Difetto di massa

Misurando la massa di un nucleo si scopre che la sua massa è sempre minore della somma delle masse delle particelle che lo compongono. La differenza così calcolata si chiama **difetto di massa**. Il **difetto di massa** corrisponde all'**energia di legame** del nucleo, cioè all'energia necessaria per separare i costituenti del nucleo portandoli molto lontani tra loro. Infatti, se si eseguissero misure molto accurate della massa del nucleo di un qualsiasi nuclide si otterrebbe un valore inferiore a quello che si avrebbe se si sommassero matematicamente i valori delle masse dei singoli costituenti il nucleo stesso. La differenza tra il valore della somma delle masse dei nucleoni ed il valore della massa del nucleo si chiama **difetto di massa**.

massa nucleoni - massa nucleo = difetto di massa =

= massa che si trasforma nella energia necessaria per costituire il nucleo =

= energia che il nucleo libera quando si disgrega nei suoi componenti

L'esistenza di una configurazione nucleare definita, anche se stabile solo per un breve tempo, induce a considerare almeno idealmente la sua formazione da nucleoni inizialmente lontani ed a ritenere che ciò avvenga con riduzione dell'energia del sistema (formato dai nucleoni). Questa riduzione può assumersi a misura dell'**energia di legame** del nucleo perché è l'energia che bisogna fornire al nucleo di un nuclide per disgregarlo nei suoi nucleoni; è l'energia che deve essere emessa dal sistema (di nucleoni) per formarsi nella configurazione considerata. (Questa energia proviene da una parte delle masse dei nucleoni). Ecco presentarsi un fenomeno che conferma il principio di equivalenza tra massa ed energia come affermato nella teoria della relatività. La massa del nucleo ${}^A_Z X$ non è $Z \cdot m_p + N \cdot m_n$ dove m_p ed m_n sono rispettivamente le masse del protone **p** e del neutrone **n**, ma è

Fisica nucleare

sempre minore. La differenza (**difetto di massa**) è l'energia di legame che si ottiene quando più nucleoni si sono uniti per formare un nucleo. Un semplice calcolo, a titolo di esercizio, porta a stimare l'energia di legame dei quattro nucleoni presenti nel nucleo di un atomo di elio.

massa 2 protoni:	2,01495 u
massa 2 neutroni:	2,01733 u
	<hr/>
	4,03188 u
massa del nucleo di He	4,00280 u
	<hr/>
	0,02908 u

$E = mc^2$

$$1u = \text{una unità di massa atomica} = 931,504 \text{ MeV}$$

$$\text{energia di legame} = 0,02908 \cdot 931,504 = 27,09 \text{ MeV}$$

Nel nucleo di un atomo esiste quindi una enorme riserva di energia. Pertanto ogni nucleo è dotato di energia (**energia di legame**) e ne costituisce una riserva smisurata. Le forze nucleari connesse a tale energia si sentono solo alle minime distanze corrispondenti alle dimensioni del nucleo, ma sono forze formidabili di natura non completamente comprese. Un fenomeno che liberi anche solo una parte di questa energia, ma su scala macroscopica e che venga dominato dall'uomo, costituisce una sorgente di una immensa quantità di energia.

La legge del decadimento radioattivo

Non tutti i nuclidi radioattivi si disintegrano con la stessa rapidità, ed è importante conoscere con quale legge si riduce la sostanza radioattiva iniziale. Consideriamo un campione radioattivo costituito da un numero N_0 molto grande di atomi. La quantità di sostanza radioattiva che si disintegra in un tempuscolo dt è proporzionale al numero $N(t)$ degli atomi presenti al tempo t ed è indipendente da qualsiasi condizione fisica o chimica e dall'età della sostanza. Ciò si esprime con la formula:

$$-dN = \lambda \cdot N \cdot dt$$

dove λ è una costante di proporzionalità caratteristica dell'elemento considerato, chiamata **costante di decadimento** o **costante di disintegrazione**.

Integrando otteniamo: $\frac{dN}{N} = -\lambda \cdot dt$ $\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \cdot \int_{t_0=0}^t dt$ $[\ln N]_{N_0}^N = -\lambda \cdot [t]_0^t$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda \cdot t \quad \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda \cdot t \quad \frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \quad N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad [1]$$

La relazione [1] chiamata legge di decadimento radioattivo mette in evidenza quanto segue. Partendo da N_0 atomi, il numero $N(t)$ di atomi presenti all'istante t , che non si sono ancora disintegrati **decresce esponenzialmente** nel tempo.

Fisica nucleare

Per caratterizzare i fenomeni radioattivi si usa spesso, al posto della costante di decadimento λ , il periodo di dimezzamento, definito come l'intervallo di tempo T perché il numero iniziale N_0 di atomi, non disintegrati, si riduca alla metà. Ponendo

nella [1] $N = \frac{N_0}{2}$ otteniamo: $\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda T}$ $\frac{1}{2} = e^{-\lambda T}$ $\ln e^{-\lambda T} = \ln \frac{1}{2}$ $-\lambda \cdot T = -\ln 2$

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Si definisce **vita media** di una sostanza radioattiva considerata la grandezza:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{0,693} = 1,433 T$$

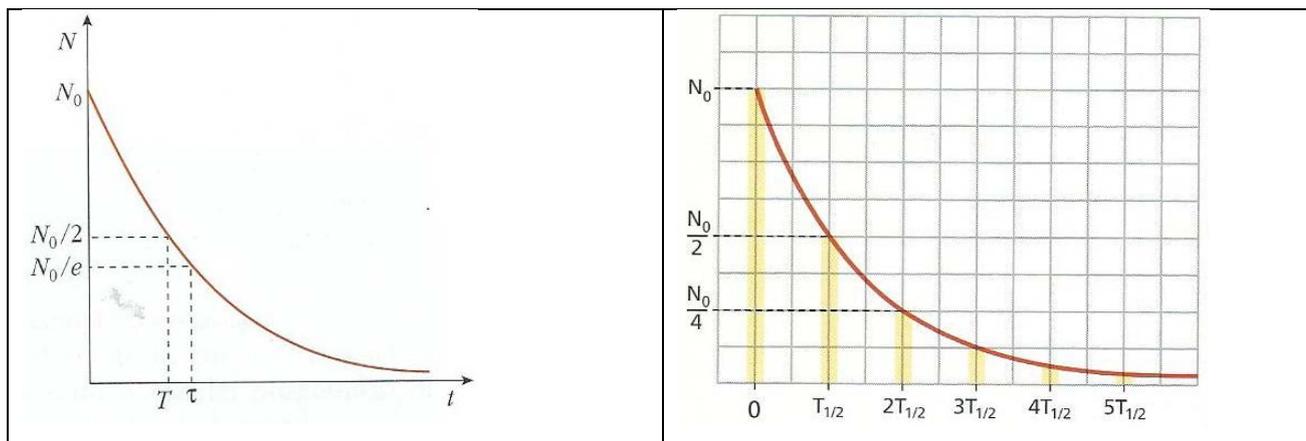
Tale vita media rappresenta l'intervallo di tempo necessario perché gli atomi dell'isotopo radioattivo si riducano alla frazione $\frac{1}{e} = 0,368$ del numero iniziale, essendo tutti gli altri decaduti. Infatti, ponendo nella [1] $t = \tau$ con τ tale che risulti

$\lambda \tau = 1$ otteniamo: $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} = N_0 \cdot e^{-1}$ cioè: $\frac{N}{N_0} = \frac{1}{e}$

$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{0,693} = 1,433 T$ dicesi **vita media** del nuclide radioattivo considerato

λ esprime la probabilità che, riferita al tempo, che un nuclide della specie radioattiva decada.

Fisica nucleare



Numero N di nuclei radioattivi non ancora decaduti in funzione del tempo t . Sono indicati il periodo di dimezzamento T , cioè il tempo dopo il quale il numero iniziale di nuclei si è ridotto alla metà, e la vita media τ , cioè il tempo necessario perché il numero dei nuclei del radioisotopo originaria si sia ridotto alla frazione $\frac{1}{e}=0,368$ del valore iniziale.

Il rapporto $R = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$ dicesi velocità di decadimento ed esprime il rapporto fra il numero di nuclei che decadono in un intervallo di tempo Δt e l'intervallo di tempo stesso. Il segno meno sta a rappresentare che $N(t)$ diminuisce all'aumentare dell'intervallo di tempo.

Per l'elemento radioattivo radio ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ che decade con emissione α abbiamo:

$$\tau = 2340 \text{ anni} \quad T = 1622 \text{ anni}$$

Per l'elemento radioattivo uranio ${}^{238}_{92}\text{U}$ che decade con emissione α abbiamo:

$$\tau = 6,5 \cdot 10^9 \text{ anni} \quad T = 4,51 \cdot 10^9 \text{ anni}$$

Per l'elemento radioattivo polonio ${}^{210}_{84}\text{Po}$ che decade con emissione α abbiamo:

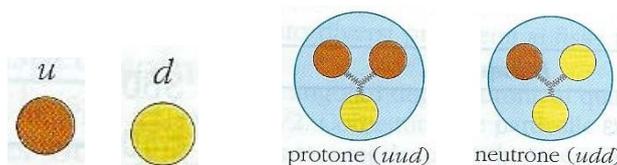
$$\tau = 199 \text{ giorni} \quad T = 138 \text{ giorni}$$

Fisica nucleare

Per il polonio ${}_{84}^{212}\text{Po}$ si ha la vita più breve tra tutte quelle dei nuclidi a nucleo instabile <<naturali>> cioè esistenti in natura. $\tau = 4,38 \cdot 10^{-7} \text{ sec}$ $T = 3 \cdot 10^{-7} \text{ sec}$

Neutrino, particella elementare, indicato normalmente col simbolo ν , avente carica nulla e massa a riposo molto piccola, forse nulla, la cui esistenza deve essere ipotizzata per evitare le contraddizioni che sorgono nella descrizione di un decadimento radioattivo β . I neutrini sono, sostanzialmente, degli elettroni neutri che corrispondono alle particelle e, μ, τ e si indicano con i simboli ν_e, ν_μ, ν_τ . Il neutrino è presente in natura in tre differenti tipi: **neutrino elettronico** (ν_e), **neutrino muonico** (ν_μ), **neutrino tau** (ν_τ). Le particelle e, μ, τ e i neutrini ad esse associati sono detti **leptoni**, il cui nome deriva da una parola greca che significa <<leggero>>. Tutte le particelle che conosciamo risultano formate dalla combinazione di tre unità di materia chiamate **quark** e indicate, nel modello iniziale, con i simboli **u** (**up**), **d** (**down**), **s** (**strange**). La previsione teorica dei tre quark implica quella dei tre antiquark $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$. Ad ogni quark viene associato un colore corrispondente ad un numero quantico supplementare. Naturalmente in questo caso il concetto di colore non ha alcun legame con il colore inteso dal punto di vista dell'ottica. Il quark è una unità elementare costituente fondamentale delle particelle che interagiscono attraverso la forza nucleare forte. Esistono sei tipi di quark denominati **sapori**:

u (**up**), **d** (**down**), **s** (**strange**), **charm**(c), **top**(t), **bottom o beauty**(b).



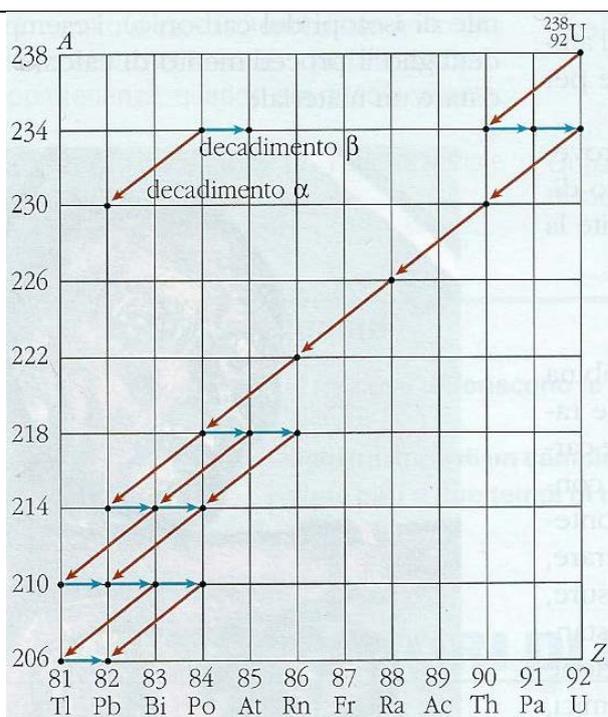
Fisica nucleare

Le famiglie radioattive

Quando una data specie nucleare instabile decade originando un prodotto radioattivo, che, a sua volta, decade in un altro pure radioattivo, e così di seguito, attraverso una catena di decadimenti, fino a raggiungere un nucleo stabile, diciamo che si è formata una **famiglia** o una **serie radioattiva**. Attualmente si conoscono quattro serie radioattive:

- la **serie del torio**, che inizia col torio ${}^{232}_{90}\text{Th}$ e termina con il piombo ${}^{208}_{82}\text{Pb}$
- la **serie dell'attinio**, che inizia con l'uranio ${}^{235}_{92}\text{U}$ e termina col piombo ${}^{207}_{82}\text{Pb}$
- la **serie dell'uranio**, che inizia con l'uranio ${}^{238}_{92}\text{U}$ e termina col piombo ${}^{206}_{82}\text{Pb}$
- la **serie del nettunio**, che inizia con il nettunio ${}^{237}_{93}\text{Np}$ e termina col piombo ${}^{209}_{82}\text{Pb}$

Serie dei decadimenti radioattivi dell'isotopo dell'uranio ${}^{238}_{92}\text{U}$. I nuclei originati dai decadimenti sono specificati mediante un punto, cui corrispondono determinati valori del numero di massa **A** e del numero atomico **Z**. La figura illustra la catena del decadimento dell'uranio **238**: attraverso l'emissione di una particella α , l'isotopo ${}^{238}_{92}\text{U}$ si trasforma nel torio ${}^{234}_{90}\text{Th}$ che a sua volta, con l'emissione di radiazione β , decade nel protoattinio ${}^{234}_{91}\text{Pa}$ e così di seguito. Nel diagramma un decadimento α è caratterizzato da uno spostamento di due unità **Z** a sinistra e di quattro unità **A** verso il basso.



Un decadimento β è rappresentato da uno spostamento di una unità **Z** verso destra.

Fisica nucleare

La figura mostra la famiglia radioattiva dell'uranio $^{238}_{92}\text{U}$. La famiglia inizia con l'uranio $^{238}_{92}\text{U}$ e termina col piombo $^{206}_{82}\text{Pb}$, che è l'elemento stabile della famiglia.

