Dalla voce

La radioattività naturale e artificiale

di Franco Rasetti

Enciclopedia Treccani, anno 1935

§1 Gli elementi radioattivi
§2 Cronologia della scoperta della radioattività
§3 Metodi di osservazione
§4 Misure di attività e unità relative
§5 Proprietà dei raggi α
§6 Proprietà dei raggi β. Natura dei raggi β
§7 Proprietà dei raggi γ
§8 L'atomo e il nucleo
§9 La massa dell'atomo e l'isotopia
§10 Il nucleo e la disintegrazione radioattiva
§11 Le famiglie radioattive
§12 Spettri α, β e γ delle sostanze radioattive. Teoria di Fermi dello spettro continuo dei raggi β
§13 Radioattività artificiale

Nella voce originale sono state apportate lievi modifiche linguistiche; sono stati inoltre operati alcuni tagli, indicati da […], nei passi giudicati di minore interesse per il lettore o perché troppo obsoleti o perché troppo specialistici. Le figure non esplicitamente richiamate nel testo sono state aggiunte.

§1 **Gli elementi radioattivi**

Alcuni elementi pesanti [tra cui uranio (U), radio (Ra), torio (Th), attinio (Ac), polonio (Po)] emettono spontaneamente radiazioni, che non vengono percepite direttamente dai nostri sensi; la loro esistenza viene rivelata da vari effetti che esse producono. Per es., un tubetto di vetro, contenente sali di uranio in quantità sufficiente, posto accanto a una lastra fotografica per qualche ora, la impressiona. L'effetto si osserva anche se tra tubetto e lastra sono interposte sottili lamine metalliche. Da questa esperienza si deduce che la radiazione emessa dai sali di uranio, o almeno alcune componenti di essa, hanno un potere penetrante che ricorda quello dei **raggi X**. Gli elementi che godono delle proprietà descritte vengono detti 'radioattivi'.

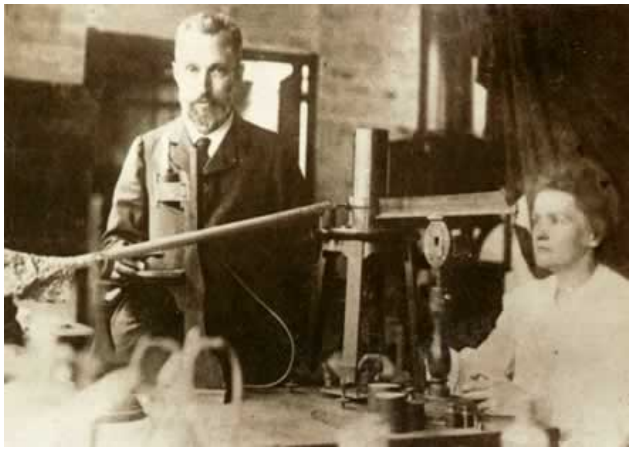


figura 1 Marie e Pierre Curie nel loro laboratorio a rue Lhomond all'epoca della scoperta del radio e del polonio, 1898. Musée du Laboratoire Curie, Institut du Radium, 11, rue P. et M. Curie, Paris.

Un'altra importante proprietà di queste radiazioni è la seguente: poniamo due lastrine metalliche affacciate a una distanza di qualche centimetro una dall'altra e portiamole a diverso potenziale. Da una lastrina all'altra non passa, quasi, corrente; l'aria interposta è un buon isolante; se ora si accosta un preparato radioattivo, si constata che l'aria diventa conduttrice; ciò è dovuto alla formazione di ioni (**ionizzazione**). Le radiazioni emesse dai corpi radioattivi ionizzano fortemente l'aria. Azione fotografica e azione ionizzante forniscono i due mezzi più potenti per rivelare e studiare le radiazioni emesse dai corpi radioattivi. La radioattività, diversamente dalla stragrande maggioranza dei fenomeni fisici e chimici, non è affatto influenzata dallo stato di combinazione in cui si trova l'elemento radioattivo, né dalla pressione, né dalla temperatura né da altri mezzi fisici o chimici [...]. Perciò si ritiene che la radioattività sia un fenomeno che interessa essenzialmente l'atomo, e più precisamente quella parte interna dell'atomo (nucleo) che per la sua stabilità non subisce l'influenza delle ordinarie azioni fisiche e chimiche.

La radioattività è accompagnata dalla 'trasmutazione' dell'elemento radioattivo in un altro elemento di diverse proprietà chimiche e fisiche. Così il radio si trasmuta in un gas nobile, detto emanazione del radio: contemporaneamente si forma elio. L'emanazione è essa pure radioattiva e si trasmuta in un elemento (RaA) anch'esso radioattivo, ecc. Si forma così una 'famiglia radioattiva', finché dopo varie generazioni, si giunge a un elemento stabile (non radioattivo).

Torna all'indice

§2 Cronologia della scoperta della radioattività

La radioattività fu scoperta nel febbraio 1896 da H. **Becquerel**. L'elenco cronologico seguente contiene soltanto le principali scoperte. Il significato di alcune delle parole e frasi usate si può desumere dai numeri che seguono.

Radioattività del torio 1898 (G. C. Schmidt e Marie Curie).

Scoperta del radio e del polonio 1898 (coniugi Pierre e Marie Curie). Segue un intenso studio delle proprietà delle radiazioni per opera di vari studiosi, che portano a conoscenze definitive sulla natura dei raggi α (particolarmente per opera di Rutherford), β e γ. Nel 1903 E. **Rutherford** e F. Soddy riconoscono nella radioattività una manifestazione della trasmutazione spontanea degli elementi radioattivi, una delle scoperte più importanti per lo sviluppo della radioattività e per l'intera fisica. Nel 1911 Rutherford, in seguito agli esperimenti di H. Geiger e E. Marsden sulla diffusione delle particelle α, suggerisce il **modello dell'atomo** (v. “La fisica atomica”, di E.Fermi, §4) che da lui e dal fisico teorico danese **Niels Bohr** prende il nome. Quasi contemporaneamente **C.T.R. Wilson** inventa la sua meravigliosa **camera**. Negli stessi anni O. von Baeyer, O. Hahn e L. Meitner fotografano i primi spettri di raggi β. La teoria delle trasmutazioni viene completata con le essenziali *“leggi di spostamento”* da K. Fajans e F. Soddy nel 1913. Dalla scoperta della ‘disintegrazione artificiale’ (1919; Rutherford e J. Chadwick) in poi, gran parte dei lavori verte su questo argomento. Citiamo ancora la disintegrazione per mezzo di ioni **accelerati artificialmente** (J. D. Cockcroft e E. T. S. Walton, 1932), la scoperta del **neutrone** (W. Bothe e H. Becker, I. Curie e F. Joliot, J. Chadwick, 1932), dell'**elettrone positivo** (Anderson, Blackett e Occhialini, 1933) e della radioattività artificiale con particelle α(Curie e Joliot, 1934), con neutroni (E. Fermi, 1934).

Torna all’indice

§3 **Metodi di osservazione**

figura 2 Contatore Geiger costruito e utilizzato dal gruppo Fermi nei suoi primi lavori sulla radioattività artificiale. Museo del Dipartimento di Fisica dell'Università La Sapienza di Roma.

Le radiazioni emesse dalle sostanze radioattive danno luogo a svariate azioni fisiche e chimiche, alcune delle quali si prestano per una misura qualitativa o quantitativa delle radiazioni stesse.

L' 'azione fotografica' può essere utilizzata per rivelare la presenza di radiazioni, siano esse α, β o γ. I raggi gamma anneriscono l'emulsione sensibile in modo analogo ai raggi X; l'azione non è però molto intensa a causa della piccola frazione dell'energia che è assorbita e quindi utilizzata nel processo fotochimico. Per aumentarla si usano spesso schermi fluorescenti, per es., di tungstato di calcio. I raggi beta hanno un'azione fotografica più cospicua, corrispondentemente al loro maggiore assorbimento; negli spettrografi magnetici generalmente lo spettro è registrato sopra una lastra fotografica, come uno spettro ottico in uno **spettrografo** ordinario.
L'effetto fotografico di particelle fortemente ionizzanti, come quelle α o i protoni, è poi così forte da permettere in opportuni casi di osservare nella gelatina l'annerimento prodotto da una singola particella; questo si manifesta allora come una traccia costituita da una fila di granuli di argento ridotto, della lunghezza complessiva di poche decine di micron, perché tale è la penetrazione delle particelle α nell'emulsione fotografica.

Le radiazioni si possono rivelare anche mediante la **fluorescenza**, che esse eccitano in molte sostanze. L'applicazione più importante ne è fatta nello 'spintariscopio', o apparecchio per l'osservazione delle scintillazioni. Se si mette una debole sorgente di particelle α in presenza di uno schermo

fluorescente di solfuro di zinco e si osserva quest'ultimo nell'oscurità mediante un microscopio, si vede una scintillina corrispondente a ciascun urto di una particella contro un granulo di solfuro di zinco. Il metodo permette di contare tutte le particelle emesse da una sorgente e ha avuto grande importanza nello sviluppo dello studio della radioattività.

Di gran lunga più numerosi e più spesso applicati sono però i **metodi** di osservazione e di misura che si basano direttamente sulla **ionizzazione** prodotta dalle radiazioni nel passaggio attraverso ai gas. [...]

Per mettere in evidenza la ionizzazione dovuta ad un elettrone servono ottimamente il contatore a punta di H. Geiger o il contatore a tubo di Geiger e Müller.

Questi ultimi tipi di apparecchi sono basati sul principio che se in una **camera di ionizzazione**, in cui gli elettrodi hanno una forma opportuna, si mantiene una differenza di potenziale sufficientemente elevata, la corrente di ionizzazione primaria dovuta alla particella è enormemente amplificata dalla ionizzazione secondaria per urto (valanga di ioni), tanto da divenire rivelabile con mezzi di sensibilità modesta.

[...] I contatori sono gli apparecchi ideali per rivelare e misurare deboli radiazioni beta o gamma. I raggi gamma agiscono in quanto danno luogo a elettroni secondari. Opportuni dispositivi permettono anche, dati due o più contatori, di registrare esclusivamente gl'impulsi contemporanei, che si producono allorché una stessa particella ionizzante attraversa i vari contatori (‘metodo delle coincidenze’).

Gli apparecchi fin qui descritti permettono di rivelare la presenza di una particella ionizzante e, in certi casi, di misurare il numero di ioni da essa generati nel suo percorso. Per studiare poi la forma della traiettoria della particella si presta il mirabile metodo della ‘camera a espansione di C.T.R. Wilson’.

Quest'apparecchio si basa sul fatto osservato che gli ioni agiscono da nuclei di condensazione per un vapore soprasaturo. Se in un gas privo di pulviscolo e di ioni si produce una soprasaturazione del vapore, quest'ultimo non si condensa immediatamente; ma se, mentre permane la soprasaturazione, una particella dà luogo a ionizzazione, ciascun ione diviene centro di una gocciolina, e tutta la traiettoria del corpuscolo si rende visibile come un sottile filo di nebbia. [...] Con quest'apparecchio non solo si osserva la traiettoria di qualsiasi corpuscolo ionizzante, per es., **particella** α, **elettrone**, **protone**, ma anche si possono mettere in evidenza le modalità dei processi nucleari **(urti)**, disintegrazioni artificiali, ecc.).

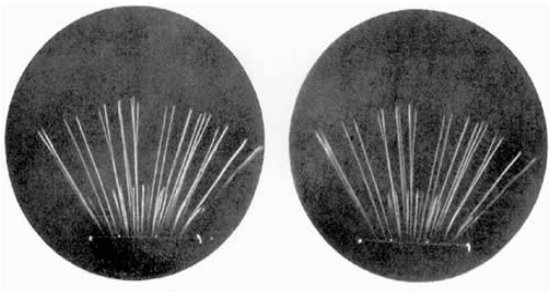


figura 3 Radiazione α prodotta da una sorgente radioattiva naturale (ThC). Meitner, L., Freitag L. e K., Zeits. f. Phys., 37 (1926) 481

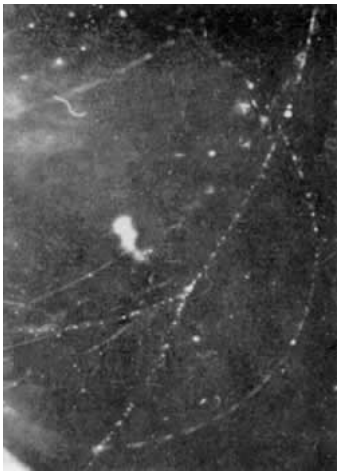


figura 4 Urto di β molto energetici con elettroni in campo magnetico. Joliot, F., in Mme P. Curie, "Radioactivité", Paris 1935

figura 5 Elettroni veloci (traiettoria rettilinea) e lenti (traiettorie incurvate, causate da diffusione multipla degli elettroni con gli atomi del gas di riempimento della camera).

Wilson, C.T.R., Proc. R. Soc., London, 104 (1923) 192.

Torna all'indice

§4 **Misure di attività e unità relative**

figura 6 Sorgente di neutroni al radon e berillio utilizzate dal gruppo Fermi nel 1934. Museo del Dipartimento di Fisica dell'Università La Sapienza di Roma.

L'attività α (numero di particelle emesse da una sorgente nell'unità di tempo) si può rivelare con uno degli svariati metodi precedentemente descritti. Se occorre misurare tale attività, si può, per es., contare il numero di particelle emesso dalla sorgente in un certo tempo ed entro un dato angolo solido; questo metodo fornisce senz'altro una misura assoluta dell'attività del preparato. Spesso però o non si ha a disposizione un contatore o altro strumento del genere oppure l'attività è troppo forte, perché sia possibile, senza speciali accorgimenti, rivelare le particelle singolarmente. In questi casi ci si serve di una camera di ionizzazione o di un **elettroscopio**. Se la sorgente è molto intensa, la corrente di ionizzazione potrà essere misurata direttamente mediante un **galvanometro** [...]. Una misura del genere, se si conosce il numero di ioni prodotti da una singola particella, fornisce una determinazione assoluta dell'attività.

Per sorgenti meno attive converrà servirsi di un elettroscopio; in tal caso è poco pratico fare misure assolute e, in generale, ci si riferisce a un preparato campione. Questo potrà convenientemente essere costituito da uno strato di ossido di uranio.

Si è definita un'unità di attività, il 'curie', che equivale all'attività di un grammo di radioelemento; per questo talvolta si chiama anche grammo-equivalente di radio. E' stato determinato che un grammo di radio emette 3,70 10^{10} particelle α per secondo, cioè che altrettanti atomi si disintegrano; questo dato permette di esprimere in curie attività misurate contando il numero di particelle o viceversa. Un curie di un corpo radioattivo qualsiasi è la quantità che possiede l'attività predetta; trattandosi di un'unità molto grande si usano frequentemente il millicurie e il microcurie. [...]

Sulla misura delle 'attività β' non vi è molto da osservare. Difficilmente si riesce a fare buone misure assolute e più spesso ci si riferisce a preparati campione.

La misura delle 'attività γ' ha molta importanza, non foss'altro perché è il metodo normale di misurare le quantità di radio. Ci si serve per solito di camere di ionizzazione, che si possono rendere molto sensibili riempiendole di gas a varie atmosfere di pressione. Anche qui è poco pratico fare misure assolute e ci si serve di preparati campione di radio. Si noti che il radio stesso non emette raggi gamma e neppure l'emanazione, bensì i loro prodotti di disintegrazione detti deposito attivo (RaB, C). Per questo, misurando radio dall'attività gamma occorrerà assicurarsi che tutti questi prodotti abbiano raggiunto l'equilibrio. Anche l'attività γ di un grammo di radio si suol chiamare un curie.

Torna all'indice

§5 Proprietà dei raggi α

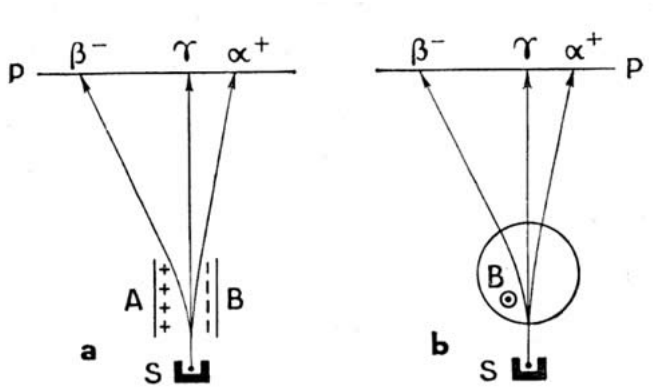


figura 7 Azione di un campo elettrico (condensatore) e magnetico B (espansioni di un elettromagnete a destra) sui raggi α, β, γ. S è la sorgente radioattiva, p la lastra fotografica. Da P. Fleury, J.P. Mathieu, "Atomi, molecole, nuclei", Zanichelli, Bologna, p.197

Studiando l'assorbimento e la deflessione in un campo magnetico delle radiazioni emesse dalle sostanze radioattive, si son potuti distinguere tre tipi diversi di radiazioni, che hanno ricevuto il nome di raggi α (alfa), β (beta) e γ (gamma).

Grosso modo, i raggi β sono 100 volte più penetranti dei raggi α, i raggi γ sono 100 volte più penetranti dei raggi β. I raggi γ non vengono deflessi da un campo magnetico, i raggi α α e β vengono deflessi, ma in sensi opposti. La

natura corpuscolare dei raggi α è implicitamente dimostrata dalla possibilità di *"contare"* uno per uno i corpuscoli costituenti i raggi (scintillazioni, amplificatore proporzionale). Esperienze sulla deflessione dei raggi α in campi elettrici e magnetici, analoghe a quelle eseguite per l'elettrone, permettono di determinare il rapporto e/m tra carica e massa dei corpuscoli. Inoltre facendo cadere i raggi α in un **cilindro di Faraday** collegato a un elettrometro, si può confrontare la carica da essi trasportata con il loro numero. Se ne ricava la carica di un singolo corpuscolo α, e quindi, mediante e/m la massa. La carica è positiva e uguale al doppio della carica elettrica elementare cioè circa $9{,}6\ 10^{-10}$ u. e. s. [$9{,}6\ 10^{-19}$ C]. La massa è uguale a quella di un atomo di elio cioè circa $6{,}6\ 10^{-24}$ g. Massa e carica della particella α coincidono dunque con quelle del nucleo dell'atomo d'elio. L'identità tra particella α e nucleo d'elio è dimostrata dal fatto che le sostanze emettenti raggi α producono elio (Rutherford) e da esperienze sulla diffusione dei raggi α nell'elio.

Le esperienze già citate di deviazione elettrica e magnetica permettono di determinare anche la velocità delle particelle. Si trova che alcuni radioelementi emettono particelle α omogenee, cioè tutte con la stessa velocità iniziale, altri emettono più gruppi omogenei. Le velocità iniziali sono dell'ordine di 20.000 km al secondo, corrispondenti a energie cinetiche dell'ordine di 10^{-5} erg.

I raggi α vengono assorbiti molto facilmente. Pochi centimetri d'aria, o uno spessore di 0,006 cm di alluminio, o un foglio di carta ordinaria sono sufficienti ad assorbirli completamente.

I raggi α non vengono assorbiti con legge esponenziale, ma scompaiono bruscamente per un certo spessore assorbente, posseggono cioè un determinato *"percorso"*. Il percorso dipende dalla velocità iniziale delle particelle, e più precisamente varia circa come il cubo della velocità. Il percorso, e più in generale, l'assorbimento, dipendono dalla sostanza assorbente. Grossolanamente l'assorbimento è proporzionale alla densità. Lo spessore di un assorbitore viene, spesso indicato mediante il numero di centimetri d'aria equivalenti (a 760 mm di pressione e 15°C).

Il comportamento ora descritto, come l'azione ionizzante delle particelle α sono una conseguenza della loro grande massa e della loro carica elettrica. Nell'attraversare la materia una particella perde progressivamente la propria energia cinetica, per urti contro gli elettroni della materia. Poiché la massa di una particella α è circa 7000 volte quella di un elettrone, gli urti non deflettono sensibilmente la traiettoria, che è quindi rettilinea. Gli urti sono dovuti all' **interazione coulombiana** tra le cariche elettriche della particella α e dell'elettrone. Per urti quasi centrali, l'energia trasferita all'elettrone si può calcolare come se l'elettrone fosse libero; per urti lontani, il fatto che l'elettrone sia legato ha un'importanza essenziale (Bohr). Il frenamento progressivo della particella α ne riduce finalmente la velocità a valori che corrispondono all' **agitazione termica**. La particella si perde allora nella folla anonima degli atomi circostanti, e non è più rivelabile. Di qui l'esistenza di un percorso definito per i raggi α.

I raggi α ionizzano fortemente i gas che attraversano. Una particella α del RaC' produce nel suo percorso di 6,94 cm nell'aria ben 2,2 10^5 coppie di ioni. Un fascio parallelo di raggi α omogenei produce nell'aria una ionizzazione, il cui andamento in funzione della distanza dalla sorgente è dato dalla figura [8].

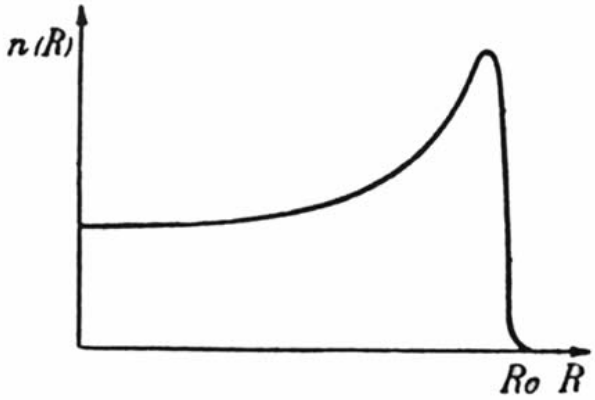


figura 8

In questa curva si notino: a) l'esistenza di un percorso finito; b) il massimo di ionizzazione verso la fine del percorso con successiva brusca caduta a zero; c) la piccola coda che arrotonda la fine della curva, dovuta alle fluttuazioni statistiche nel percorso delle varie particelle. Il meccanismo della ionizzazione è quello stesso che produce il frenamento delle particelle α. Un elettrone che ha subito un urto abbandona in generale l'atomo a cui appartiene. Si crea così una coppia di ioni. L'elettrone può poi a sua volta, se ha ricevuto sufficiente energia, urtare altri elettroni, producendo così una ionizzazione secondaria. La ionizzazione osservata è naturalmente l'effetto globale (primaria + secondaria).

Dal numero 2,2 10^5 delle coppie di ioni prodotte dalla particella α del RaC' di 7,7 10^6 Ve [nel seguito indicato con eV, 1 eV = 1,6 10^{-19} J], si deduce una spesa media di energia di 35 eV ossia 5,6 10^{11} erg [1 erg = 10^{-7} J] per coppia di ioni creata.

Alcuni degli elettroni proiettati dalla particella α hanno una energia sufficiente per dare una traccia visibile con la **camera di Wilson** (qualche mm nell'idrogeno). [...]

Solo urti contro masse paragonabili a quella della particella α urtante (dunque non elettroni) possono produrre rilevanti deflessioni. Si richiedono inoltre forze d'interazione particolarmente intense. La necessità di tali forti interazioni ha condotto al **modello nucleare dell'atomo** (Rutherford, 1911, v. “La fisica atomica”, di E.Fermi, §4), ora per varie ragioni universalmente adottato.

Secondo l' interpretazione proposta da Rutherford, le grandi deviazioni sono dovute a urti quasi centrali tra la particella α e un nucleo. Supponendo che l'interazione fra le due particelle sia quella coulombiana tra le loro cariche, si trova (applicando sia la meccanica ondulatoria, sia quella classica) che la probabilità che una particella α venga deflessa di un angolo θ è

.proporzionale al quadrato della carica nucleare Ze (Z numero atomico dell'elemento diffusore), inversamente proporzionale alla quarta potenza della velocità della particella α, e (per elementi pesanti) inversamente proporzionale alla quarta potenza di sen(θ/2). Tali conseguenze della teoria sono state verificate dettagliatamente (Geiger e Marsden, Chadwick).

La formula teorica per gli elementi leggeri, è lievemente più complicata [...]. Una posizione particolare occupano gli urti contro nuclei di elio. La teoria porta a formule diverse, secondo che la particella α è considerata come assolutamente identica al nucleo d'elio, o come avente soltanto ugual carica e massa. L'esperienza ha deciso per la prima alternativa (Blackett e Champion).
Nell'attraversare la materia una particella α può talvolta catturare un elettrone (più raramente anche due) e può poi riperderlo. In generale ciò che avviene è questo: nella prima parte del percorso la particella α cattura ogni tanto un elettrone, ma lo riperde immediatamente. Essa si trova quindi per la maggior parte del tempo priva di elettroni. Quando la velocità della particella diminuisce, la probabilità di cattura aumenta enormemente. I due processi di cattura e perdita si alternano alcune migliaia di volte prima che la fine del percorso sia raggiunta.
Quando un atomo radioattivo emette una particella α, riceve esso stesso un impulso in direzione contraria a quella dell'emissione (rinculo). Può così produrre una traccia visibile nella **camera di Wilson**, oppure abbandonare la superficie su cui è deposto il preparato, e venire eventualmente raccolto, mediante un campo elettrico, su una superficie metallica vicina. I preparati di polonio emettono per rinculo aggregati di più atomi, contenenti polonio, che *"infettano"* di radioattività gli oggetti vicini.

L'emissione delle particelle α obbedisce alle 'leggi del caso' (Schweidler). Le particelle non vengono emesse a intervalli regolari. Il numero di particelle emesse in un intervallo di tempo t, subisce fluttuazioni statistiche intorno al suo valore medio N. Se $N \gg 1$, le fluttuazioni sono dell'ordine di radice di N.

Torna all'indice

§6 Proprietà dei raggi β
Natura dei raggi β

I raggi, analizzati con metodi analoghi a quelli usati per i raggi α, si rivelano di natura identica a quella dei **raggi catodici**. Essi sono cioè costituiti da elettroni, aventi una massa $m_o = 0{,}90\ 10^{-27}$ grammi, e una carica negativa di $4{,}77\ \ 10^{-10}$ u. e. s. [$1{,}6\ 10^{-19}$ C].

A differenza dai raggi catodici ordinari, si tratta però spesso di elettroni dotati di velocità elevatissime, corrispondenti a raggi catodici accelerati mediante differenze di potenziale di alcune centinaia di migliaia fino ad alcuni milioni di

volt. Si osservano però anche raggi β di qualche migliaio di volt. Tali velocità, vicine a quelle della luce, hanno permesso la verifica sperimentale della formula relativistica dell'energia cinetica

$$E = m_0 c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right]$$ con β = v/c.

I raggi β emessi da un elemento non sono omogenei; le loro velocità sono in generale distribuite su un grande intervallo. Tra il comportamento dei raggi β, che verrà ora descritto, e quello dei raggi α si notano differenze caratteristiche. Esse sono dovute in gran parte alle velocità più grandi e alla massa più piccola.

La diffusione ha un'influenza assai più grande sulle proprietà dei raggi β che non su quelle dei raggi α. Il meccanismo delle grandi deflessioni è lo stesso, la probabilità di deflessioni rilevanti è, a parità di energia e di spessore attraversato, dello stesso ordine di grandezza. Quindi, poiché lo spessore necessario a frenare i raggi β è assai più grande che per i raggi α, anche la probabilità di una o più deflessioni rilevanti durante l'intero percorso non è trascurabile. Le traiettorie degli elettroni non sono rettilinee.

A ciò è dovuto l'aspetto assai diverso delle curve d'assorbimento dei raggi β (le curve d'assorbimento naturalmente differiscono molto, secondo che si misura il numero degli elettroni, o la ionizzazione da essi prodotta). Spesso le curve d'assorbimento hanno forma esponenziale; ciò è dovuto a [...] diversi fattori (inomogeneità, diffusione, ecc.). La forma delle curve d'assorbimento dipende inoltre sensibilmente dalle condizioni geometriche dell'esperienza**.** Ora, poiché la diffusione è proporzionale al quadrato della carica nucleare, essa ha maggiore importanza negli elementi pesanti che in quelli leggeri. [...]

I raggi β ionizzano i gas, con un meccanismo che è sostanzialmente lo stesso di quello descritto per i raggi α. Anche qui vale la distinzione tra ionizzazione primaria e secondaria, anche qui la spesa media di energia per coppia di ioni nell'aria si aggira intorno ai 30 eV. Grazie soprattutto alla loro maggiore velocità, ma anche, in parte, alla carica elettrica minore, i raggi β ionizzano assai meno dei raggi α (a ciò si ricollega il maggiore **potere penetrante**). [...] I raggi β, come i raggi catodici, producono raggi X, cadendo su una superficie solida. Quest'emissione di radiazione secondaria ha una grande importanza nell' assorbimento di elettroni estremamente veloci. Un atomo che emette un raggio β subisce un rinculo, analogo a quello osservato per i raggi α, ma assai più piccolo.

E' conosciuta attualmente, oltre alla radioattività ordinaria, anche una radioattività [artificiale] con emissione di elettroni positivi. I raggi 'pseudo-β', costituiti da questi **elettroni** posseggono proprietà assai simili a quelle dei raggi β. Una loro proprietà a parte è data dai processi di '**annichilazione**'.

Torna all'indice

§7 Proprietà dei raggi γ

La radiazione più penetrante emessa dalle sostanze radioattive, o raggi γ, non trasporta carica elettrica e non viene deflessa da campi elettrici o magnetici. Le proprietà dei raggi gamma presentano analogie profonde con quelle dei **raggi X**. I raggi gamma si possono infatti considerare (a parte la diversa origine) come raggi X particolarmente *"duri"* (cioè penetranti). Sono cioè radiazioni elettromagnetiche (come la luce) di lunghezza d'onda estremamente corta (da 10^{-7} fino a 10^{-11} cm). Essi posseggono in particolare proprietà tipiche delle radiazioni di natura ondulatoria (interferenza): come la luce ordinaria cadendo su un reticolo viene diffratta, così i raggi X o gamma possono essere diffratti mediante il **reticolo naturale** costituito dagli atomi di un cristallo. I reticoli ordinari non sono utilizzabili, poiché la distanza tra due linee vicine del reticolo è troppo grande rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione. I raggi gamma posseggono anche, come la luce e come i raggi X, ma in modo più spiccato, proprietà corpuscolari. I *"quanti"* possono venire contati mediante un **tubo di Geiger-Müller**. L'energia dei quanti di una radiazione gamma di frequenza ν è data al solito dall'espressione $h\nu$ *(h* costante di Planck = 6,55 10^{-27} erg s = [6,63 10^{-34} J s]). Le energie dei quanti γ sono dello stesso ordine di grandezza delle energie dei corpuscoli β.

Dall'esistenza della pressione della luce, dalle leggi dell'elettrodinamica, dalla relatività ristretta segue che all'energia $h\nu$, di un quanto è legata anche una quantità di moto $h\nu/c$ (c velocità della luce). La radiazione γ emessa da un radioelemento non è in generale omogenea, ma consta di varie componenti di diverso potere penetrante. Le componenti più assorbibili sono quelle di maggiore lunghezza d'onda. Una radiazione gamma monocromatica viene assorbita con legge esponenziale. Le radiazioni gamma più dure vengono ridotte a metà da uno spessore di qualche centimetro di piombo. Una distinzione essenziale va fatta tra assorbimento vero e diffusione: un fascio parallelo di raggi gamma diminuisce d'intensità nell'attraversare la materia, ma ciò è dovuto solo in parte a processi in cui l'energia dei raggi gamma viene convertita totalmente in altra forma di energia (assorbimento vero). In parte l'energia sottratta al fascio primario si ritrova sotto forma di raggi gamma diffusi.

Il processo che dà origine all'assorbimento è l' **effetto fotoelettrico**: un quanto gamma scompare, cedendo la sua energia a un elettrone. Nasce così un fotoelettrone, la cui energia cinetica è

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - \varepsilon$$

dove ε è il lavoro necessario per estrarre l'elettrone dall'atomo, e dipende dall'anello elettronico da cui l'elettrone viene estratto. L'energia (e quindi la frequenza) dei quanti gamma può venire misurata dall'energia dei fotoelettroni che essi producono.

La radiazione gamma diffusa è più *"molle"* (meno penetrante) della primaria. Essa è costituita cioè in parte da quanti gamma aventi lunghezza d'onda maggiore di quella dei quanti primari (**effetto Compton**). Quando un quanto gamma viene diffuso, contemporaneamente viene proiettato un elettrone, con energia pari alla differenza in energia tra quanto primario e quanto diffuso. Vi sono dunque due specie di elettroni secondari: **fotoelettroni ed elettroni Compton**. La diminuzione d'intensità di un fascio di raggi gamma è dovuta prevalentemente all'effetto Compton per raggi γ duri, all'effetto fotoelettrico per raggi più molli.

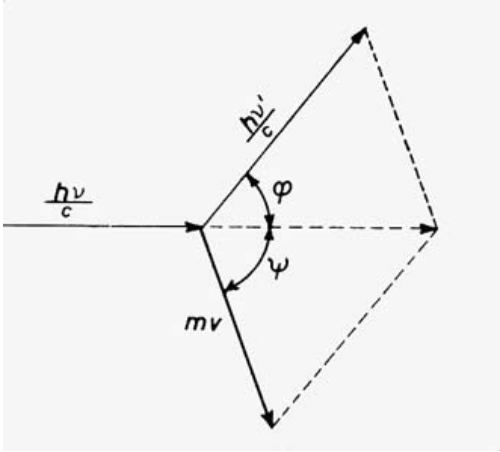


figura 9 Un fotone, urtando un elettrone, trasferisce parte della sua energia a quest'ultimo e la sua lunghezza d'onda aumenta dopo l'urto

figura 10 Fotoelettroni ed elettroni di rinculo prodotti da raggi X duri in aria per effetto Compton.

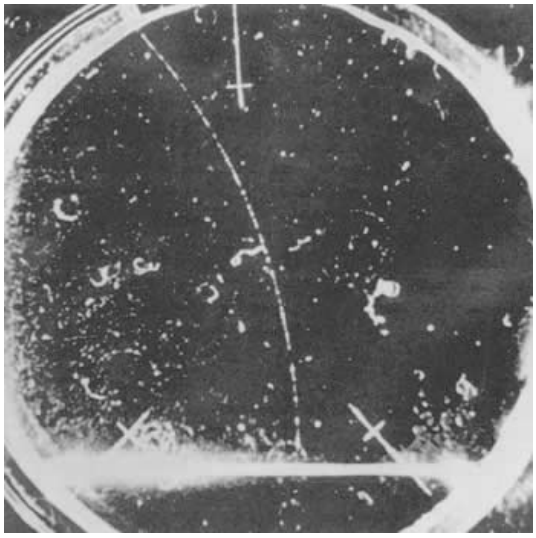


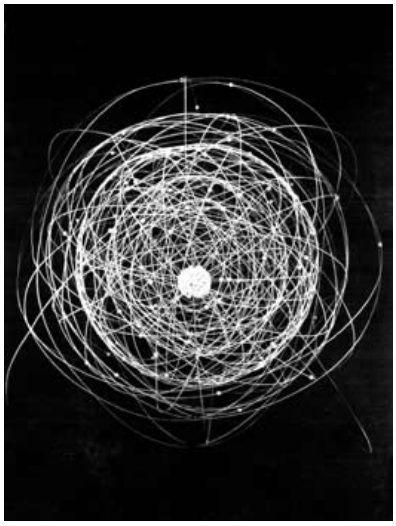
figura 11 Produzione di coppie elettrone-positrone da raggi γ da 16,1 MeV in un campo magnetico di 2500 gauss. Fowler, W.A., Gaerttner, E.R., Lauritsen, C.C., Phys. Rev., 53 (1938) 628

I raggi γ ionizzano i gas grazie agli elettroni secondari che essi producono. La ionizzazione dovuta ai raggi gamma ha notevole importanza pratica per la misura dei preparati radioattivi.

Raggi γ di energia superiore a circa 1,02 milioni di eV vengono assorbiti, oltre che con l'ordinario effetto fotoelettrico, anche mediante la *"*creazione di coppie*"*. In questo **processo** un quanto γ scompare, e la sua energia si ritrova come energia di un elettrone positivo e di un elettrone negativo (Chao, Meitner, Gray e Tarrant, Curie e Joliot).

Torna all'indice

§8 L' atomo e il nucleo



Traiettorie degli elettroni nel modello di un atomo di uranio. Da J. Teichmann, W. Schreier, M. Segre, “Experimente die Geschichte machten”, Bayerische Schulbuch-Verlag, München 1995, p. 137.

Si deve al Rutherford il **modello** che ancor oggi è universalmente accettato nel suo aspetto sostanziale. Secondo tale concezione, ogni atomo è costituito da un nucleo centrale carico positivamente, attorno al quale si muove un certo numero di elettroni carichi negativamente: il numero Z di questi ultimi è sempre tale da compensare la carica positiva del nucleo, dando così luogo ad un atomo elettricamente neutro.
Se indichiamo con *-e* la carica del singolo elettrone, si avrà dunque che il nucleo è dotato di una carica positiva pari a + Z*e.* Il numero Z si chiama ‘numero atomico’ e definisce completamente il carattere chimico dell'elemento a cui appartiene l'atomo. La massa dell'elettrone è 1840 volte più piccola della massa dell'atomo più leggero che si conosca, ossia dell'atomo d'idrogeno; ciò significa che la quasi totalità della massa di un atomo di un elemento qualunque è dovuta al suo nucleo e non agli Z elettroni che gravitano attorno ad esso.

Per rappresentare in modo sintetico e suggestivo le proprietà chimiche di tutti gli elementi, si suole disporli in una tabella, detta **sistema periodico** o tabella di Mendeleev, in modo che elementi con proprietà chimiche simili vengono a trovarsi incolonnati il numero d'ordine dei vari elementi in tale tabella coincide col numero Z sopra definito ossia è uguale al numero atomico; si può dunque dire che le proprietà chimiche di un elemento sono completamente determinate dal numero di elettroni che si muovono nel suo atomo, o, ciò che è lo stesso, dalla carica del nucleo, misurata assumendo come unità la carica dell'elettrone.

Senza entrare ora in particolari riguardanti il sistema periodico degli elementi e le teorie quantistiche che hanno permesso di chiarirne i minori particolari, ci basti ricordare che la periodicità delle proprietà chimiche è dovuta alla particolare disposizione degli elettroni attorno al nucleo.

Da quanto si è detto fino ad ora si conclude che per esempio, l'idrogeno, che occupa il primo posto nella tabella di Mendeleev, è costituito da un nucleo dotato di una carica + *e,* attorno al quale si muove un solo elettrone; così nell'atomo di elio vi sono 2 elettroni, in quello di carbonio 6, ed in quello di uranio 92 elettroni che si muovono attorno a nuclei dotati delle corrispondenti cariche positive.

Torna all'indice

§9 La massa dell'atomo e l'isotopia

A differenza delle proprietà chimiche, altre proprietà, come la massa e le eventuali proprietà radioattive di un atomo, non sono determinate dal numero atomico. La massa di un atomo è praticamente tutta concentrata nel suo nucleo; per misurare queste importanti grandezze per gli atomi dei vari elementi si assunse convenzionalmente la massa dell'atomo di ossigeno eguale a 16; in tempi più recenti, fu necessario scegliere in modo lievemente diverso questa unità di misura; per ora ci basti notare che con questa convenzione resta definito il peso atomico di ogni elemento; così, per es., l'idrogeno ha peso atomico 1, il neo 20,2; il radio 226; le particelle α, che vengono emesse da alcune sostanze radioattive, sono dotate di massa 4 (e carica positiva + 2 e).

Per molto tempo si credette che gli atomi di un elemento chimico fossero rigorosamente tutti eguali fra di loro; tale concezione si mostrò errata per la prima volta nello studio delle proprietà chimiche degli elementi radioattivi.
Si osservò infatti che alcuni elementi radioattivi sono dotati di proprietà chimiche rigorosamente identiche a quelle di altri elementi non radioattivi; così il RaD, che emette particelle β, è chimicamente identico al solito piombo inattivo. Se si mescolano queste due sostanze, è assolutamente impossibile separarle con processi chimici; in seguito a questa osservazione D. Stromholm e T. Svedberg suggerirono, nel 1909, di assegnare a due elementi di questo tipo lo stesso posto nella tabella di Mendeleev. Quest'idea fu poco dopo meglio chiarita da F. Soddy, il quale nel 1911 riuscì a stabilire la *"legge dello spostamento radioattivo"* nel caso di emissione di particelle α; questa legge dice che ogni qualvolta un elemento radioattivo di numero atomico Z emette una particella α, si forma un nuovo elemento radioattivo di numero atomico Z - 2; nel 1913 A. S. Russell stabilì una legge analoga per l'emissione di particelle β, la quale fu espressa in forma più precisa da K. Fajans e F. Soddy. La forma completa della **'**legge dello spostamento radioattivo' è la seguente: *"l'emissione di una particella α fa diminuire di 2 il numero atomico e di 4 il peso atomico, mentre l'emissione di una particella β lascia invariato il peso atomico e provoca un aumento di 1 nel numero atomico"*. Segue da questa legge che, per esempio, il RaB e il RaD sono formati da atomi aventi lo stesso numero atomico e pesi atomici che differiscono di 4; infatti, per passare dal RaB al RaD vengono emesse 2 particelle β e 1 particella α; la conferma del fatto che queste due sostanze sono dotate dello stesso numero atomico sta nella loro inseparabilità con processi chimici; gli atomi del RaB e del RaD hanno dunque le stesse proprietà chimiche, ma massa e proprietà radioattive diverse.

P. Soddy nel 1913 introdusse il nome d' 'isotopi' per indicare sostanze di questo tipo, esprimendo con questo nome il fatto che esse occupano lo stesso posto nella tabella di Mendeleev. [...] Il fenomeno dell'isotopia è assolutamente generale, nel senso che la maggior parte degli elementi chimici sono miscugli, in determinate proporzioni, di vari isotopi; è stato anzi

dimostrato che l'ossigeno stesso è costituito da 3 isotopi; questo fatto ha resa necessaria una revisione dell'unità di misura dei pesi atomici, la quale è stata fissata assumendo come pari a 16 la massa del più leggero e abbondante degl'isotopi dell'ossigeno; gli altri due isotopi di questo elemento, che sono mescolati in natura all'ossígeno di peso 16 (^{16}O) in assai piccole quantità, hanno peso atomico 17 e 18. [...]

Torna all'indice

§10 Il nucleo e la disintegrazione radioattiva

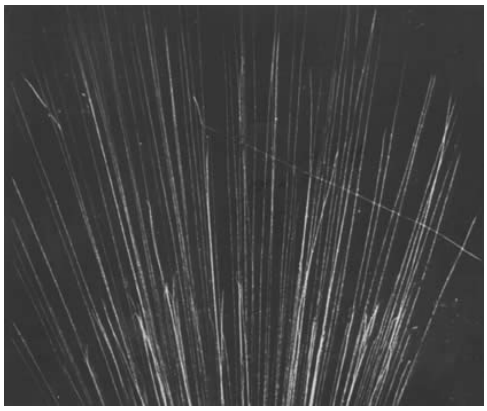


figura 12 Disintegrazione nucleare di atomi di azoto indotta da particelle alfa secondo la reazione $_7N^{14} + _2He^4 = _8O^{17} + _1p^1 + Q$, dove Q è l'energia di reazione. Blackett, P.M.S., Lees, D.S., Proc. Roy. Soc., London 136 (1932) 325.

Vogliamo ora occuparci più da vicino del fenomeno della disintegrazione radioattiva e fare alcune considerazioni, che ci permettono di concludere che le particelle α e β, che noi osserviamo, sono emesse dal nucleo degli atomi delle sostanze radioattive. Uno dei caratteri fondamentali di questo fenomeno è che, con gli ordinari processi chimici e fisici, non è in alcun modo possibile influenzare la disintegrazione radioattiva. Qualora si tenga conto del fatto, a cui abbiamo già accennato, che nei processi chimici vengono interessati gli elettroni che nell'atomo si muovono attorno al nucleo, pare naturale pensare che il fenomeno della disintegrazione abbia luogo in una sede diversa; alla stessa conclusione si giunge anche dallo studio della maggior parte dei fenomeni fisici, come, per esempio, l'emissione dello spettro visibile e dei raggi X.
Possiamo quindi dire che il fenomeno della disintegrazione radioattiva ha la sua origine nel nucleo. Allo stesso risultato si giunge dalla considerazione delle sostanze radioattive che emettono particelle α; queste sono dotate di massa 4 e carica positiva + 2e; poiché nell'atomo l'unica sede della massa (gli elettroni hanno massa trascurabile) e delle cariche positive è il nucleo, è naturale concludere che tali particelle vengono emesse dal nucleo stesso. Un accurato esame della legge dello spostamento radioattivo ci costringe a concludere che anche le particelle β, almeno in parte, vengono emesse dal nucleo e non dalla circostante nuvola elettronica. I raggi γ infine hanno del pari origine nel nucleo e vanno considerati come un fenomeno secondario, che accompagna l'emissione di particelle α e β.

L'interpretazione del fenomeno della radioattività è basato sul fatto che i nuclei degli atomi di alcune sostanze sono sistemi instabili, i quali, dopo aver vissuto per un tempo più o meno lungo, si disintegrano emettendo una particella α o beta a seconda dei casi; in seguito a questo processo si forma il nucleo di un nuovo elemento, secondo la legge dello spostamento

radioattivo; se la particella emessa è α, il nuovo elemento formatosi precede l'elemento di partenza di 2 posti nel sistema periodico, se la particella è β, occupa invece il posto successivo. Il nuovo nucleo formatosi non è però in generale stabile, per modo che dopo un tempo più o meno lungo si disintegra a sua volta. Si ha così una catena o, come si dice più comunemente, una 'famiglia di sostanze radioattive', ognuna delle quali si forma dalla precedente in seguito ad un processo di disintegrazione del nucleo. La famiglia radioattiva s'interrompe non appena si giunge alla formazione di un nucleo stabile, che può sussistere inalterato attraverso i secoli. In natura esistono tre famiglie radioattive e precisamente le famiglie dell'uranio, del torio e dell'attinio.

Prima di occuparci dei caratteri particolari di queste tre famiglie vogliamo fare alcune considerazioni generali sul fenomeno della disintegrazione e chiarire ciò che s'intende per 'equilibrio radioattivo'.

A tale scopo immaginiamo di avere *N* atomi di una sostanza radioattiva; com'è già stato detto, noi osserveremo che le particelle (α o β, a seconda dei casi) vengono emesse dalla sostanza in esame in modo casuale; ciò significa semplicemente che i nuclei stessi degli *N* atomi si disintegrano a caso, o, ciò che è lo stesso, senza influenzarsi in alcun modo gli uni con gli altri. Questo fatto è un aspetto caratteristico della disintegrazione radioattiva, che ci sarà di guida anche in altre considerazioni: i nuclei si disintegrano ognuno indipendentemente dall'altro.

Immaginiamo ora di contare, a partire da un certo istante, quanti dei nostri N nuclei si disintegrano, per esempio, nei minuti successivi e di calcolare quanto tempo in media vivono i singoli atomi: il problema è analogo come impostazione a ciò che si fa nelle scienze sociali, quando si determina la vita media degli uomini di una certa classe sociale, o che esercitano un certo mestiere. Si giunge in tal modo alla definizione della 'vita media' di una sostanza radioattiva, che indicheremo con τ. Un aspetto fondamentale della disintegrazione radioattiva è che la vita media così definita è indipendente dalla storia precedente dell'atomo. In base a questa osservazione ci si può convincere facilmente che un determinato nucleo di una sostanza radioattiva di vita media τ ha la probabilità $\frac{dt}{\tau}$ di disintegrarsi nell'intervallo di tempo *dt;* per modo che, se *N* sono gli atomi di quella sostanza, il numero medio di essi che si disintegrano nel tempo *dt* è $N\frac{dt}{\tau}$; da questa semplice formula si può calcolare il numero medio di atomi *N* che noi avremo all'istante *t,* se al tempo zero ne avevamo N_0; il risultato di un semplice calcolo dà:

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \qquad (1)$$

Si trova così che dopo un tempo eguale alla vita media il numero degli atomi rimasti è pari a 1/e del numero iniziale; tutti gli altri, che sono evidentemente

$$N_0 - N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = N_0\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \tag{2}$$

si sono disintegrati, dando luogo ad altrettanti atomi di una nuova specie.

Nella pratica, invece della vita media si usa più spesso il 'tempo di dimezzamento', che è proporzionale alla vita media; il tempo di dimezzamento *T* è definito come il tempo che bisogna attendere affinché il numero degli atomi di una certa sostanza si sia ridotto alla metà del suo valore iniziale; esso è evidentemente più breve della vita media ed è legato a questa dalla relazione

$$T = \tau \cdot 0.693 \tag{3}$$

Il tempo di dimezzamento delle sostanze radioattive varia entro limiti assai vasti: da frazioni di secondo fino a decine di migliaia di milioni di anni […].

Prendiamo ora in esame alcuni esempi che ci permetteranno di chiarire ciò che s'intende per equilibrio radioattivo (secolare e transitorio). Una delle sostanze radioattive più note è il radio, il quale ha un tempo di dimezzamento pari a circa 1600 anni; i nuclei del radio nel disintegrarsi emettono una particella α e si trasformano nei nuclei degli atomi dell'emanazione; quest'altra sostanza radioattiva ha un tempo di dimezzamento di 3,8 giorni; dalla disintegrazione dell'emanazione si forma il RaA, al quale segue il RaB, ecc.; tutte queste sostanze hanno vite medie assai brevi, di alcuni minuti.

Immaginiamo ora di rinchiudere in un recipiente del radio insieme con l' 'emanazione', che si forma da esso, e di aspettare un tempo lungo rispetto al tempo di dimezzamento dell'emanazione, p. es. un mese; data la lunghezza della vita media del radio, la quantità di questo elemento si può riguardare come costante in tutte le nostre considerazioni; dopo un mese si sarà raggiunto ciò che si chiama l'equilibrio radioattivo ossia la quantità di emanazione è andata crescendo fino a che in ogni secondo il numero di atomi di emanazione che si formano è uguale al numero di atomi che si disintegrano. Se indichiamo con N_1, e N_2, rispettivamente i numeri di atomi di radio e di emanazione che avremo in queste condizioni e con τ_1 e τ_2 le corrispondenti vite medie, si avrà che

$$\frac{N_1}{\tau_1} = \frac{N_2}{\tau_2} \tag{4}$$

Essendo rispettivamente $\frac{N_1}{\tau_1}$ e $\frac{N_2}{\tau_2}$ i numeri di atomi delle due sostanze che si disintegrano in ogni secondo.

Dalla (4) si ha il numero di atomi di emanazione in equilibrio con N, atomi di Ra:

$$N_2 = \frac{\tau_2}{\tau_1} N_1$$

(5)

Dall'istante in cui l'emanazione ha raggiunto l'equilibrio col radio, il numero dei suoi atomi rimane costante ed è dato dalla espressione (5). [..]

Torna all'indice

§11 Le famiglie radioattive

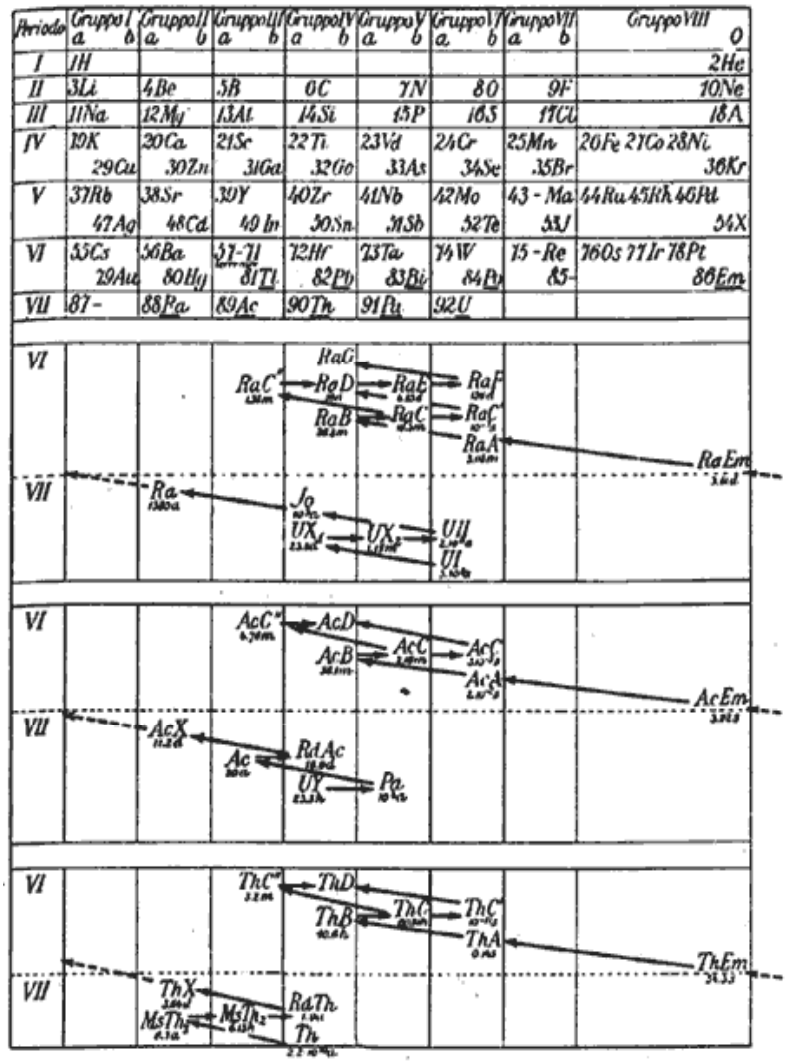


figura 13

Come abbiamo già accennato, si conoscono tre famiglie radioattive, le quali sono rappresentate nella figura [13]; le frecce oblique da destra verso sinistra rappresentano l'emissione di una particella α, ossia, secondo la legge dello spostamento radioattivo, un processo in cui il numero atomico diminuisce di 2, ed il peso atomico di 4; le frecce orizzontali rappresentano l'emissione di una particella β, ossia un processo in cui il peso atomico resta costante ed il numero atomico cresce di 1. Al disotto di ogni elemento è indicato il tempo di dimezzamento; il sistema periodico degli elementi posto al

di sopra permette di riconoscere facilmente quali sono gli elementi inattivi omologhi. [...]

Si noti che i prodotti B e G delle tre famiglie sono isotopi del piombo, i prodotti C ed E del bismuto, ed i prodotti C" del tallio. Inoltre le tre famiglie radioattive presentano analogie notevolissime; per es., in tutte e tre le famiglie vi sono gli elementi C che hanno due modi possibili diversi di disintegrarsi: emettendo una particella β si passa ai prodotti C', mentre emettendo una particella α si passa ai prodotti C"; i due rami in cui si divide ogni famiglia a questo punto si riuniscono subito dopo, perché sia i prodotti C', che emettono particelle α, sia i prodotti C" che emettono particelle β, danno luogo allo stesso prodotto D; nella famiglia del torio e dell'attinio questa sostanza è stabile, mentre invece nella famiglia del radio essa si disintegra emettendo particelle β. Nelle tre famiglie è diversa però la percentuale di atomi del prodotto C che si trasformano rispettivamente nei prodotti C' e C" [...].

Nella famiglia dell'uranio si deve notare ancora un'altra biforcazione, di natura diversa da quelle fin qui considerate; l'UX_1 dà luogo a due diversi prodotti, l'UX_2 e l'UZ; nella formazione sia dell'uno sia dell'altro di questi due tipi di atomi viene emessa una particella beta per modo che essi hanno lo stesso peso atomico e lo stesso numero atomico: essi vengono perciò detti isotopi isobari. L'UZ, che si forma da solo il 0,35 % degli atomi di UX_1, si distingue dall'UX_2, solo per le diverse proprietà radioattive: infatti l'UZ ha un tempo di dimezzamento di 6 ore, mentre l'UX2 ha un tempo di dimezzamento di 68 secondi.

Oltre alle famiglie radioattive che abbiamo qui descritte sono stati scoperti in natura alcuni elementi debolissimamente radioattivi, isolati. Essi sono il potassio, il rubidio e il neodimio, che emettono particelle β, ed il samario, che emette particelle α.

Torna all'indice

§12 Spettri α, β e γ delle sostanze radioattive. Teoria di Fermi dello spettro continuo dei raggi β

ANNO IV - VOL. II - N. 12 QUINDICINALE 31 DICEMBRE 1933-XII

LA RICERCA SCIENTIFICA

ED IL PROGRESSO TECNICO NELL'ECONOMIA NAZIONALE

Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi "beta"

Nota del prof. ENRICO FERMI

Riassunto: Teoria della emissione dei raggi β delle sostanze radioattive, fondata sull'ipotesi che gli elettroni emessi dai nuclei non esistano prima della disintegrazione ma vengano formati, insieme ad un neutrino, in modo analogo alla formazione di un quanto di luce che accompagna un salto quantico di un atomo. Confronto della teoria con l'esperienza.

Mi propongo di esporre qui i fondamenti di una teoria dell'emissione dei raggi β che, benchè lontana sopra ipotesi delle quali manca al momento presente qualsiasi conferma sperimentale, sembra tuttavia capace di dare una rappresentazione abbastanza accurata dei fatti e permette una trattazione quantitativa del comportamento degli elettroni nucleari che, se pure le ipotesi fondamentali della teoria dovessero risultare false, potrà in ogni caso servire di utile guida per indirizzare le ricerche sperimentali.

E' ben noto che nel cercare di costruire una teoria dei raggi β si incontra una prima difficoltà dipendente dal fatto che i raggi β escono dai nuclei radioattivi con una distribuzione continua di velocità che si estende fino a una certa velocità massima: ciò che a prima vista non sembra conciliabile col principio della conservazione dell'energia. Una possibilità qualitativa di spiegare i fatti senza dovere abbandonare il principio della conservazione dell'energia consiste, secondo Pauli, nell'ammettere l'esistenza del così detto «neutrino», e cioè di un corpuscolo elettricamente neutro con massa dell'ordine di grandezza di quella dell'elettrone o minore. In ogni disintegrazione β si avrebbe emissione simultanea di un elettrone e di un neutrino; e l'energia liberata nel processo si ripartirebbe comunque tra i due corpuscoli in modo appunto che l'energia dell'elettrone possa prendere tutti i valori da 0 fino ad un certo massimo. Il neutrino d'altra parte, a causa della sua neutralità elettrica e della piccolissima massa, avrebbe un potere penetrante così elevato da sfuggire praticamente ad ogni attuale metodo di osservazione. Nella teoria che ci proponiamo di esporre ci metteremo dal punto di vista della ipotesi dell'esistenza del neutrino.

figura 14 "Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi beta". Articolo di Enrico Fermi pubblicato il 31 dicembre 1933 su la "Ricerca scientifica".

Sappiamo che dal nucleo di un atomo radioattivo può essere espulsa una particella α, oppure una particella β; in ambedue i casi il processo può essere accompagnato da radiazione elettromagnetica (raggi gamma). E' importante studiare lo spettro di queste radiazioni (intendendosi con questo, nel caso di raggi corpuscolari, lo 'spettro di velocità o di energia'), perché da tale indagine possiamo ricavare informazioni sulla struttura del nucleo.

Per quanto riguarda lo spettro dei raggi α, il fatto più cospicuo è che le particelle emesse da un dato corpo radioattivo sono in alto grado omogenee, cioè posseggono tutte la stessa velocità; ciò può dedursi misurandone il percorso oppure dalla deflessione nel campo magnetico. Questa velocità è invece diversa da sostanza a sostanza.

[...] In una stessa famiglia, il percorso delle particelle α è in relazione con la vita media, e precisamente che più lunga è la vita, più breve è il percorso. Tale relazione, detta di 'Geiger e Nuttall', si può rappresentare in un **diagramma** [fig. 15], nel quale in ascissa abbiamo riportato il logaritmo del percorso, in ordinata log λ, dove λ è il reciproco della vita media τ. Si vede che i punti appartenenti a una singola famiglia stanno press'a poco sopra una retta.

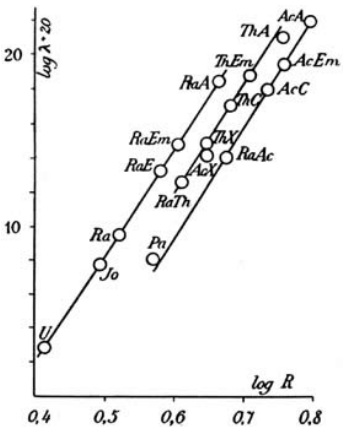


figura 15

Questa dipendenza della vita media dall'energia della particella emessa si può comprendere in base alle vedute attuali sulla struttura del nucleo e alle leggi della meccanica quantistica. Secondo G. Gamow il nucleo è supposto contenere la particella α entro a una *"buca di potenziale"* circondata da una 'barriera di potenziale', che impedisce normalmente l'uscita alle particelle. Secondo i concetti classici, una particella α, avendo energia maggiore dell'altezza massima della barriera di potenziale,

abbandonerebbe istantaneamente il nucleo; oppure, possedendo un'energia inferiore, non ne uscirebbe mai. Quindi non si riuscirebbe a comprendere l'esistenza di una vita media finita. Al contrario, secondo la meccanica quantistica, una particella, data la sua duplice natura corpuscolare e ondulatoria, può, per così dire, filtrare attraverso a una barriera di potenziale, anche se non possiede energia sufficiente a superarne la sommità.

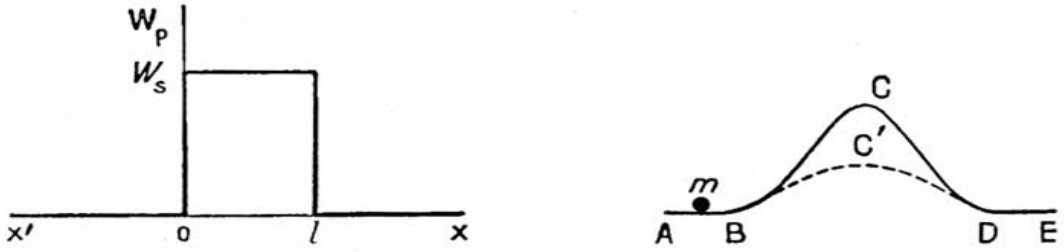


figura 16 Barriera di potenziale di altezza W_s, con W_s energia potenziale, incontrata da una particella che si muove lungo x'x. A destra, modello meccanico dell'effetto tunnel. Da P. Fleury, J.P. Mathieu, "Atomi, molecole, nuclei", Zanichelli, Bologna, p.57

Così si spiega la possibilità della disintegrazione radioattiva, e di più si giustifica, almeno qualitativamente, la relazione di Geiger e Nuttall. Infatti una particella di maggiore energia avrà una barriera di potenziale più bassa e meno spessa da attraversare per uscire dal nucleo, e la meccanica quantistica dà in questo caso una maggiore probabilità di attraversamento, ciò che corrisponde a una vita media più breve.

La predetta omogeneità delle particelle α emesse da un dato corpo radioattivo soffre alcune eccezioni, che recentemente hanno acquistato molta importanza teorica. In certi casi una sostanza emette due o più gruppi omogenei, con piccola differenza di energia tra l'uno e l'altro (struttura fina); caso tipico il ThC. In qualche caso più raro (ThC', RaC') si ha invece, oltre alle particelle α di energia normale, una piccolissima frazione delle particelle emesse con energia notevolmente maggiore (particelle di lungo percorso). Questi fenomeni hanno ricevuto una spiegazione molto semplice, basata sul concetto che il nucleo, al pari dell'atomo, possa esistere in diversi stati quantici, ciascuno di energia ben determinata. [...]

L'altro caso delle particelle α di lungo percorso sta analogamente in relazione con livelli eccitati del nucleo di partenza, anziché con quelli del nucleo di arrivo.

Da tutto quanto abbiamo esposto emerge l'intimo legame tra spettri α e spettri γ. Si osserva infatti in generale che i corpi a disintegrazione α che irradiano raggi gamma sono quelli per cui si presenta struttura fina delle particelle α. Notiamo però che molti corpi che emettono raggi gamma (anzi tutti quelli che hanno raggi gamma più intensi, quali: RaB, RaC, ThB, ThC, $MsTh_2$, ecc.) sono prodotti che subiscono disintegrazione β. Siamo così condotti a studiare quest'altro tipo di disintegrazione.

Qui ci troviamo in presenza di un fatto nuovo, perché nelle disintegrazioni β gli elettroni emessi hanno, senza eccezione, uno 'spettro continuo'. Si è

molto discusso per quale meccanismo nuclei in apparenza identici sia prima sia dopo la disintegrazione possano espellere elettroni di velocità variabile con continuità, e come ciò sia conciliabile col principio della conservazione dell'energia. Oggi prevale l'ipotesi di Pauli-Fermi del **neutrino**, il quale sarebbe una particella fin qui rimasta inosservabile, espulsa insieme con l'elettrone all'atto della disintegrazione β. L'energia totale liberata nel processo della disintegrazione β sarebbe eguale per tutti i nuclei di una determinata sostanza, ma essa andrebbe ripartita in modo variabile tra il neutrino e l'elettrone.

Lo spettro continuo β per ciascun corpo ha la forma seguente: s'inizia in modo non ben conosciuto verso le basse velocità, raggiunge un massimo d'intensità per un'energia determinata, e infine cade a zero per un'energia massima caratteristica di ciascuna sostanza. Questa energia massima sarebbe da identificarsi, nell'ipotesi del neutrino, con l'energia totale liberata nel processo. Il valore dell'energia massima varia entro limiti molto vasti nelle varie sostanze ad attività β.

E. Fermi è riuscito a sviluppare una teoria, nella quale il processo della disintegrazione β è trattato nell'ipotesi del neutrino, sulle basi della meccanica quantistica. Secondo questa teoria, le cosiddette particelle leggere (elettrone e neutrino) non esistono nel nucleo, ma vengono create simultaneamente ed emesse nell'istante in cui un neutrone, contenuto nel nucleo, si trasforma in un protone. Se noi diciamo che il protone e il neutrone non sono due particelle di natura completamente distinta, bensì due stati quantici di una medesima particella, il processo della disintegrazione β viene ad acquistare una spiccata analogia col processo, che ci è famigliare, dell'emissione di un quanto di luce da parte di una particella elettrizzata che salta da uno stato quantico ad un altro stato più basso. Nel nostro caso, alla particella elettrizzata corrisponde la particella pesante che salta dallo stato di neutrone allo stato di protone, al quanto di luce corrisponde la coppia elettrone neutrino.

Con questa teoria Fermi è riuscito a spiegare la forma dello spettro continuo dei raggi β. Notiamo che la frequente emissione di raggi gamma nelle disintegrazioni β s'interpreta, in analogia con quanto avviene nelle disintegrazioni α, ammettendo che la coppia elettrone-neutrino possa venire emessa con energia minore di quella totale a disposizione, lasciando il nucleo residuo in stati eccitati; da questi poi si passa allo stato fondamentale con emissione di uno o più quanti gamma. Vi sono anche dei casi (disintegrazione ThC" $\rightarrow$ ThD) in cui tutti i nuclei sono lasciati in stati eccitati. A disintegrazioni di quest'ultimo tipo è associata un'intensissima radiazione γ. E' quasi superfluo poi ricordare che in qualsiasi caso i raggi gamma, corrispondendo a transizioni tra stati quantizzati del nucleo, hanno frequenze ben definite. [...]

Torna all'indice

§13 Radioattività artificiale

Nel 1919 Rutherford riuscì per la prima volta a provocare una 'trasmutazione' ossia a trasformare il nucleo dell'azoto nel nucleo dell'ossigeno; il fisico inglese usava particelle α emesse dalle sostanze radioattive naturali per bombardare l'azoto; il nucleo di questo elemento colpito dal minuscolo e velocissimo proiettile emette un protone o nucleo di idrogeno ed assorbe la particella α. In seguito a questa celebre esperienza fu possibile realizzare un certo numero di altre trasmutazioni usando come proiettili sia particelle α sia protoni e deutoni accelerati ad altissime velocità a mezzo d'impianti capaci di fornire tensioni dell'ordine del milione di volt. Anche il **neutrone**, la particella dotata di carica zero e massa 1, era stata usata per provocare le trasmutazioni degli elementi.

In tutte queste esperienze il processo di trasformazione di un nucleo in un altro è istantaneo; ossia, partendo da un nucleo di un elemento ordinario, e quindi stabile, si giunge istantaneamente alla formazione del nucleo di un altro elemento pure stabile.

Nel gennaio del 1934 F. Joliot ed I. Curie-Joliot scoprirono un nuovo fenomeno: la radioattività artificiale I coniugi Joliot osservarono che, in seguito ad un intenso bombardamento con particelle α, alcuni elementi leggeri (alluminio, boro, magnesio) divengono radioattivi. Le sostanze radioattive artificiali ottenute in tal modo hanno in genere un tempo di dimezzamento di alcuni minuti ed emettono, a differenza delle sostanze radioattive naturali,

Artificial Production of a New Kind of Radio-Element

By F. Joliot and I. Curie, Institut du Radium, Paris

SOME months ago we discovered that certain light elements emit positrons under the action of α-particles'. Our latest experiments have shown a very striking fact: when an aluminium foil is irradiated on a polonium preparation, the emission of positrons does not cease immediately, when the active preparation is removed. The foil remains radioactive and the emission of radiation decays exponentially as for an ordinary radio-element. We observed the same phenomenon with boron and magnesium'. The half life period of the activity is 14 min. for boron, 2 min. 20 sec. for magnesium, 3 min. 15 sec. for aluminium.

We have observed no similar effect with hydrogen, lithium, beryllium, carbon, nitrogen, oxygen, fluorine, sodium, silicon, or phosphorus. Perhaps in some cases the life period is too short for easy observation.

The transmutation of beryllium, magnesium, and aluminium α-particles has given birth to new radio-elements emitting positrons. These radio-elements may be regarded as a known nucleus formed in a particular state of excitation; but it is much more probable that they are unknown isotopes which are always unstable.

For example, we propose for boron the following nuclear reaction:

$$_5B^{10} + {}_2He^4 \rightarrow {}_7N^{13} + {}_0n^1$$

$_7N^{13}$ being the radioactive nucleus that disintegrates with emission of positrons, giving a stable nucleus $_6C^{13}$. In the case of aluminium and magnesium, the radioactive nuclei would be $_{15}P^{30}$ and $_{13}N^{27}$ respectively.

The positron of aluminium seem to form a continuous spectrum similar to the β-ray spectrum. The maximum energy is about 3×10^6 e.v. As in the case of the continuous spectrum of β-rays, it will be perhaps necessary to admit the simultaneous emission of a neutrino (or of an antineutrino of Louis de Broglie) in order to satisfy the principle of the conservation of energy and of the conservation of the spin in the transmutation.

The transmutations that give birth to the new radio-elements are produced in the proportion of 10^{-7} or 10^{-8} of the number of α-particles, as for other transmutations. With a strong polonium preparation of 100 millicuries, one gets only about 100,000 atoms of the radioactive elements. Yet it is possible to determine their chemical properties, detecting their radiation with a counter or an ionisation chamber. Of course, the chemical reactions must be completed in a few minutes, before the activity has disappeared.

We have irradiated the compound boron nitride (BN). By heating boron nitride with caustic soda, gaseous ammonia is produced. The activity separates from the boron and is carried away with the ammonia. This agrees very well with the hypothesis that the radioactive nucleus is in this case an isotope of nitrogen.

When irradiated aluminium is dissolved in hydrochloric acid, the activity is carried away with the hydrogen in the gaseous state, and can be collected in a tube. The chemical reaction must be the formation of phosphine (PH_3) or silicon hydride (SiH_4). The precipitation of the activity with zirconium phosphate in acid solution seems to indicate that the radio-element is an isotope of phosphorus.

These experiments give the first chemical proof of artificial transmutation, and also the proof of the capture of the α-particle in these reactions'.

We propose for the new radio-elements formed by transmutation of boron, magnesium and aluminium, the names *radioboron*, *radionitrogen*, *radiophosphorus*.

These elements and similar ones may possibly be formed in different nuclear reactions with other bombarding particles: protons, deutrons, neutrons. For example, $_7N^{13}$ could perhaps be formed by the capture of a deutron in $_6C^{13}$, followed by the emission of a neutron.

figura 17 Articolo dei coniugi Joliot-Curie pubblicato su "Nature" il 10 febbraio 1934, in cui si annunciava la scoperta della radioattività artificiale ottenuta mediante il bombardamento con particelle alfa di alcuni nuclei (Al, B e Mg) che decadono emettendo positroni

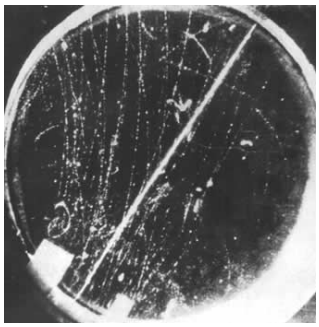


figura 18 I prodotti finali di trasmutazioni nucleari danno spesso nuclei di isotopi che non esistono in natura e che, come i radioelementi naturali, non sono stabili (I. Curie e F. Joliot, 1934). Nell'immagine si osservano in campo magnetico gli elettroni di disintegrazione del $_5B^{12}$ che decade in $_6C^{12}$, e la traccia di un protone veloce che proviene dal decadimento di un altro isotopo del boro ($_5B^{10}$). Bayley, D.S., Crane, H.R., Phys. Rev., 52(1937) 604.

elettroni positivi **(positrone)**. Per chiarire il fenomeno della radioattività artificiale consideriamo il caso del boro; questo elemento, colpito dalla particella α, l'assorbe ed emette un neutrone; si forma così un nuovo nucleo, il nucleo dell'azoto di massa 13, che non esiste in natura e che non è stabile; esso quindi si disintegra dopo un certo tempo ed emettendo un positrone dà luogo al carbonio ordinario stabile. Il processo si divide dunque in due fasi: nella prima si ha la formazione dell'elemento radioattivo, nel nostro caso azoto di massa 13; la seconda fase consiste in una trasformazione spontanea del nucleo instabile formatosi in un nucleo stabile, esistente in natura. Comunemente per rappresentare i processi nucleari si usa un simbolismo in un certo senso analogo a

quello che serve per rappresentare le reazioni chimiche; così, per es., la prima e la seconda fase del fenomeno della radioattività indotta per il caso del boro sono rappresentate dalle due equazioni

$$ {}^{10}_{5}\mathrm{B} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{13}_{7}\mathrm{N} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \quad ; \quad {}^{13}_{7}\mathrm{N} \rightarrow {}^{13}_{6}\mathrm{C} + {}^{0}_{1}\mathrm{e} $$

intendendo col simbolo ${}^{10}_{5}\mathrm{B}$ il boro (Z = 5) di massa 10 e con ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ il nucleo dell'atomo di elio ossia la particella α incidente; ${}^{0}_{1}\mathrm{e}$ rappresenta un positrone di carica positiva uno e massa praticamente zero. I coniugi Joliot dimostrarono l'esattezza di questa interpretazione del fenomeno da loro scoperto, poiché riuscirono a separare con i classici metodi della chimica radioattiva, l'azoto instabile (${}^{13}_{7}\mathrm{N}$) formatosi dal boro in seguito al bombardamento con particelle α.

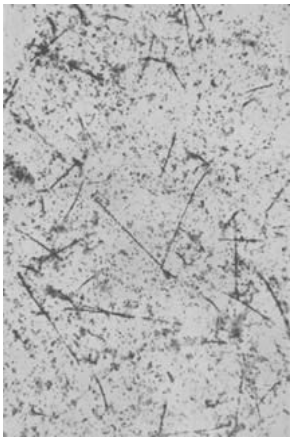


figura 19 Traccia di un protone di rinculo per urto con un neutrone veloce prodotto per bombardamento di boro con deutoni da 900 keV. Da C.F. Powell, G.P.S. Occhialini, Nuclear Physics in photographs, Oxford 1947, Plate XXVI.

Subito dopo la scoperta dei Joliot, fisici americani ed inglesi cercarono, con successo, di produrre sostanze radioattive artificiali, usando come proiettili i protoni (H R. Crane e C. C. Lauritsen, J. D. Cockcroft, C. W. Gilbert e E. T. S. Walton) e i **deutoni** (M. C. Henderson, M. S. Livingstone e E.O. Lawrence) accelerati ad altissime velocità a mezzo di differenze di potenziale dell'ordine di milioni di volt (ricordiamo a questo punto che il deutone è una particella di massa 2 e carica positiva 1, ossia è il nucleo di un isotopo di massa 2 dell'idrogeno, detto assai spesso idrogeno pesante).
Con l'uso di questi proiettili furono scoperti circa 15 elementi radioattivi artificiali, i quali emettono positroni al pari di quelli ottenuti con il metodo dei Joliot.

Tutti i proiettili di cui abbiamo parlato fino ad ora si mostrarono efficaci nella produzione di elementi radioattivi solo quando il nucleo bombardato apparteneva ad un elemento di basso numero atomico. La spiegazione di questo fatto è da ricercarsi nella repulsione elettrostatica che subiscono i proiettili carichi positivamente (particelle α, protoni, deutoni) da parte dei nuclei bombardati, che, com'è noto, sono carichi dello stesso segno. Quest'azione cresce al crescere della carica del nucleo, per modo che già per elementi il cui numero atomico è superiore a 29 (Cu) diventa praticamente impossibile un urto intimo fra un proiettile carico ed il nucleo.

Per evitare tale difficoltà E. Fermi, subito dopo le esperienze dei Joliot, tentò di produrre delle sostanze radioattive artificiali usando come proiettili i **neutroni** risultati ottenuti da Fermi sin dalle prime esperienze furono molto soddisfacenti, poiché non solo elementi leggeri, ma anche elementi relativamente pesanti, come lo I (Z = 53), mostrarono il fenomeno della radioattività artificiale. L'efficacia dei neutroni si mostrò ancora più, non appena Fermi ed i suoi collaboratori fecero uno studio sistematico della

radioattività provocata da neutroni sul maggior numero possibile di elementi: di 70 elementi 50 hanno mostrato il fenomeno e fra questi molti elementi di numero atomico assai elevato, come l'oro (Z = 79), l'iridio (Z = 77) e perfino l'uranio (Z = 92), il più pesante di tutti gli elementi esistenti in natura.

Nel caso dell'uranio sembra che si formi un elemento radioattivo artificiale, con tempo di dimezzamento di circa un quarto d'ora, avente numero atomico maggiore di 92. Si tratterebbe del primo esempio di formazione di un nuovo elemento e non di un nuovo isotopo di un elemento conosciuto. A differenza degli elementi radioattivi artificiali ottenuti con proiettili carichi (particelle α, protoni, deutoni), gli elementi radioattivi ottenuti col metodo di Fermi emettono particelle β, ossia elettroni (negativi), al pari delle sostanze radioattive naturali.

Per la maggior parte dei casi è stato possibile individuare con processi chimici il nucleo instabile che si forma all'atto del bombardamento. Senza entrare in particolari si può dire che esistono tre diversi processi possibili; se ${}^{M}_{Z}X$ è il nucleo bombardato con neutroni ${}^{1}_{0}n$, le reazioni nucleari osservate sono sempre di uno dei tre tipi seguenti:

$$ {}^{M}_{Z}X + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{M-3}_{Z-2}Y $$

a)

$$ {}^{M}_{Z}X + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}H + {}^{M}_{Z-1}Y $$

b)

$$ {}^{M}_{Z}X + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{M+1}_{Z}Y $$

c)

Con Y abbiamo indicato il nucleo instabile formatosi all'atto del bombardamento e che si disintegra emettendo un elettrone dopo un tempo più o meno lungo. Le reazioni nucleari a) e b) ci dicono che bombardando certi nuclei questi assorbono i neutroni ed emettono al tempo stesso una particella α ($ {}^{4}_{2}He $) oppure un protone ($ {}^{1}_{1}H $).

La reazione c) invece consiste semplicemente nell'assorbimento del neutrone da parte del nucleo bombardato senza emissione di alcuna particella pesante. In quest'ultimo caso dunque il nucleo radioattivo formatosi è un isotopo, più pesante di 1 del nucleo di partenza. Mentre si conoscono parecchi esempi di tutt'e tre i tipi di reazioni fra gli elementi leggeri, pare che nel caso degli elementi medi e pesanti solo il processo c) si effettui abbastanza facilmente.

Fermi ed i suoi collaboratori, nel corso di esperienze sulla radioattività provocata da bombardamento di neutroni, osservarono che alcune sostanze venivano attivate assai più fortemente se la sorgente di neutroni (ampolla contenente Em e Be) e l'elemento da irradiare venivano immersi in una sostanza fortemente idrogenata, come l'acqua o la paraffina. Questo fenomeno fu interpretato nel modo seguente: i neutroni emessi dalla sorgente ad altissima velocità si muovono rettilineamente attraverso alla paraffina,

finché subiscono un urto con un atomo d'idrogeno, in seguito al quale deviano perdendo un'elevata frazione della loro energia, [..] per modo che dopo non molti urti la velocità del neutrone viene ad essere fortemente ridotta. Questi neutroni, detti *“neutroni lenti”*, sono particolarmente efficaci per produrre sostanze radioattive artificiali secondo lo schema di reazione c. Con essi in genere non è invece possibile produrre radioelementi secondo gli schemi a e b. L'uso dei neutroni lenti in certi casi particolari ha permesso di moltiplicare per un fattore 20 o 30 l'intensità dei preparati radioattivi artificiali.

Torna all’indice