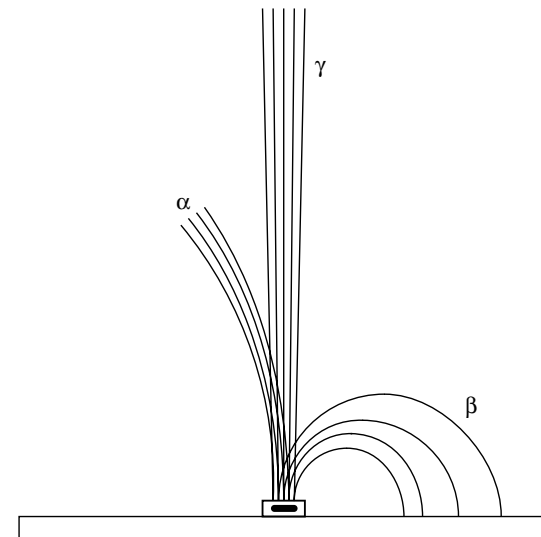


Marco Savarese

# APPUNTI DI RADIOATTIVITÀ



*A Claudia*  
con ♥ → ∞

#### Riferimenti bibliografici

M. Ageno, *Elementi di radioattività*, Veschi, 1953  
 M. Gliozzi, *Storia della Fisica*, Bollati Boringhieri, 2005  
 G. Bruzzaniti, *Dal segno al nucleo*, Bollati Boringhieri, 1993  
 W. Heisenberg, *La fisica dei nuclei atomici*, Sansoni, 1952  
 M. Pelliccioni, *Fondamenti fisici della radioprotezione*, Pitagora, 1989  
*Enciclopedia delle Scienze Fisiche*, Treccani, 1994

#### Indice

1. La scoperta dei raggi X e della radioattività	1
2. Principali fenomeni connessi con la radioattività	6
3. Strumenti per lo studio della radioattività	9
4. I raggi $\alpha$ , $\beta$ e $\gamma$	13
5. Elementi di dosimetria	17

### Limiti di dose

Da quanto abbiamo detto è evidente che gli effetti stocastici delle radiazioni vanno limitati al livello più basso possibile mediante un sistema di limitazione delle dosi fondato sui seguenti principi (International Commission on Radiological Protection 26, 1977): (a) nessuna attività umana comportante rischio di radiazioni dev'essere accettata, a meno che essa produca un beneficio netto dimostrabile (*principio di giustificazione*); (b) ogni esposizione umana alle radiazioni dev'essere tenuta tanto bassa quanto è ragionevolmente ottenibile, tenendo conto di fattori sociali ed economici (*principio di ottimizzazione*); (c) l'equivalente di dose ai singoli individui non deve superare determinati limiti, stabiliti per le varie circostanze (*principio di limitazione delle dosi individuali*). Per i lavoratori esposti, ai fini della prevenzione del rischio deterministico, si ammette una massima irradiazione eccezionale, una sola volta nella vita, pari a 0,5 Sv per la pelle, mani e piedi, con l'eccezione del cristallino per il quale vige un limite di 0,15 Sv; per quanto riguarda, invece, gli effetti stocastici, la limitazione si applica all'equivalente di dose efficace<sup>3</sup> che viene fissato in 20 mSv/anno; per i lavoratori non esposti e per gli individui della popolazione questo limite scende a 1 mSv/anno.

Si tenga presente che questi limiti vanno sommati alla radioattività naturale proveniente dal cosmo e da materiali costituenti la crosta terrestre a cui il genere umano è stato esposto da sempre. Il livello di tale radiazione di fondo vale in media 2,4 mSv/anno (0,27  $\mu$ Sv/h) ma varia considerevolmente da un posto all'altro della Terra mantenendosi più o meno costante nel tempo. Nel mondo ci sono luoghi (per esempio in India e in Brasile) che, a causa di caratteristiche geomorfologiche, presentano una concentrazione molto elevata di radionuclidi naturali nel terreno. L'Italia è uno di questi con una media di 3,4 mSv/anno (0,39  $\mu$ Sv/h), e con regioni (come il Lazio e la Campania) in cui il livello è molto più alto che in altre. Più della metà della dose assorbita dalla popolazione di questi luoghi è attribuibile all'inalazione dei discendenti a vita breve del <sup>222</sup>Rn (radon) e del <sup>220</sup>Rn (toron, un isotopo del radon), appartenenti alla serie dell'uranio e del torio. Il radon si trova in sensibili concentrazioni nelle case, specialmente in quelle costruite con materiali tufacei e granitici. Il resto del fondo naturale è dovuto a irradiazione extraterrestre proveniente dai raggi cosmici; nella tabella seguente sono riportati gli equivalenti di dose efficace annuali dovuti a sorgenti naturali di radiazioni in aree con fondo normale, in mSv (dall'*Enciclopedia delle scienze fisiche*, Treccani, 1994).

Sorgente	Irradiazione esterna all'organismo	Irradiazione interna all'organismo	Totale
Raggi cosmici: componente ionizzante	0,28		0,28
componente neutronica	0,02		0,02
Nuclidi cosmogenici		0,015	0,015
Nuclidi primordiali: potassio 40	0,12	0,18	0,30
rubidio 87		0,006	0,06
serie dell'uranio 238	0,09	0,95	1,04
serie del torio 232	0,14	0,19	0,33
Totale	0,65	1,34	2,0

3. La dose efficace tiene conto degli effetti biologici probabilistici in funzione dell'organo o del tessuto irradiato mediante un fattore di ponderazione. Si tenga presente che il limite massimo oltre il quale non è permesso lavorare è fissato in 1 mSv/h; permanendo in un ambiente con questo tasso la dose efficace annua tollerata di 20 mSv si raggiungerebbe in appena 20 ore; per un confronto una radiografia comporta un assorbimento di circa 1 mSv, una TAC di 10 mSv.

### 1. La scoperta dei raggi X e della radioattività

Nel 1895 il fisico tedesco Wilhelm Conrad Röntgen stava studiando le proprietà dei raggi catodici e, come tutti i fisici tedeschi dell'epoca, si era posto nella scia di Lenard, sostenitore della loro natura ondulatoria. Lenard era riuscito, come abbiamo visto, a portare all'esterno del tubo di scarica i raggi catodici attraverso la finestrella di alluminio che porta il suo nome e aveva evidenziato che essi erano in grado di impressionare lastre fotografiche.

L'8 Novembre Röntgen osservò un fenomeno sorprendente: aveva avvolto con cartone nero un tubo di Crookes per accertare se la luminescenza<sup>1</sup> caratteristica dei raggi catodici fosse ancora visibile; nelle vicinanze si trovava per caso una lastra con una faccia spalmata di un leggero strato di platino-cianuro di bario; ad ogni scarica del tubo la lastra si illuminava di una strana luminosità qualunque fosse la faccia rivolta verso il tubo. Ma la particolarità più sorprendente consisteva nel fatto che la fluorescenza dello schermo si eccitava fino a due metri di distanza dal tubo, che questo fosse ricoperto da uno spesso foglio di cartone o meno. Non si poteva trattare di un effetto dei raggi catodici perché il tubo col quale Röntgen lavorava non aveva la finestra di alluminio di Lenard e quindi i raggi non potevano uscire all'esterno, inoltre la lastra era abbastanza distante e non sulla direttrice dei raggi. Gli ulteriori studi di questa radiazione rivelarono proprietà straordinarie. Un libro di mille pagine o una tavoletta di legno di due o tre centimetri di spessore si lasciavano oltrepassare con facilità; interponendo una tavola più spessa la luminosità si attenuava soltanto, ma non spariva; spariva, invece, mettendo in mezzo una lamiera metallica. Ciò che colpiva nell'esperimento era che il cartone nero, assolutamente impermeabile alla luce visibile, facesse passare un agente capace di provocare la luminescenza. Altri esperimenti dimostravano che tutti i corpi erano più o meno trasparenti ai nuovi raggi; precisamente la trasparenza diminuiva con la densità e con l'aumentare dello spessore

1 La luminescenza è un fenomeno tipico di alcuni materiali, che consiste nella riemissione, sotto forma di luce (o più in generale di radiazione elettromagnetica), di una parte dell'energia assorbita durante un'eccitazione. Il fenomeno prende nomi diversi in relazione alla causa che determina l'eccitazione, tuttavia i processi elettronici responsabili del fenomeno sono sempre gli stessi e sono quindi, indipendenti dalla natura dell'eccitazione: tali processi possono essere sintetizzati in un assorbimento localizzato di energia (sotto varie forme) che porta in uno stato eccitato un atomo o un gruppo di atomi, i quali successivamente riemettono energia, portandosi ad un livello energetico più basso. In particolare, se il materiale luminescente ha assorbito energia da una fonte di energia elettromagnetica infrarossa, visibile o ultravioletta, il fenomeno prende il nome di fotoluminescenza. La fotoluminescenza si divide a sua volta in fluorescenza (quella dei pennarelli evidenziatori) e fosforescenza (le lancette degli orologi). La distinzione fra i due processi fu originariamente fatta in base al tempo di vita della radiazione: nella fluorescenza la luminescenza cessa quasi subito dopo aver eliminato la radiazione eccitante, mentre nella fosforescenza la radiazione continua ad essere emessa, almeno per un certo tempo, anche dopo aver eliminato la sorgente eccitante. La fosforescenza venne scoperta nel 1602 dall'alchimista Vincenzo Casciarolo, il quale riuscì ad ottenere un solfuro capace di emettere luce al buio; solo nel 1669 si scoprì il fosforo che venne chiamato così proprio per le sue caratteristiche (dal greco  $\phi\omega\varsigma$ ; luce). Se invece l'eccitazione è determinata da radiazioni ionizzanti, da reazioni biochimiche in organismi viventi (come le lucciole), da campi elettrici, reazioni chimiche, da sforzi meccanici come pressioni e frizioni, da riscaldamento si parla rispettivamente di: radioluminescenza, bioluminescenza, elettroluminescenza, chemiluminescenza, piezoluminescenza e triboluminescenza, termoluminescenza.

dei corpi. Se si metteva la mano fra l'apparecchio e lo schermo si vedeva sulla lastra l'ombra nitida delle ossa: la prima radiografia era fatta.

I nuovi agenti, che Röntgen<sup>2</sup> battezzò raggi X, non funzionano soltanto col platino-cianuro di bario, ma anche in altri corpi, come i composti fosforescenti di calcio, il vetro d'urano, il vetro ordinario, lo spato calcareo, il salgemma. Essi sono in grado di impressionare anche le lastre fotografiche ma non sono visibili dall'occhio umano<sup>3</sup>. La natura di questi nuovi enti apparve misteriosa; una cosa sola era certa: essi non erano raggi catodici. Tutte le proprietà singolari dei nuovi raggi decretarono la novità del fenomeno e la sua irriducibilità a fatti già noti: i raggi X mostravano una propagazione rigorosamente rettilinea, ma al contrario dei raggi luminosi, non si riflettevano né rifrangevano e, al contrario dei raggi catodici, non erano deviabili da alcun campo magnetico.

Ma qual era la loro natura? L'ipotesi che andò via via affermandosi fu quella elettromagnetica. La teoria di Maxwell infatti prevedeva che una carica elettrica accelerata producesse onde elettromagnetiche. Gli elettroni urtando contro il vetro di fronte al catodo venivano arrestati bruscamente emettendo energia sotto forma di radiazione elettromagnetica. I raggi X non erano altro che onde elettromagnetiche come la luce o i raggi ultravioletti. Ma allora come mai non si riusciva a metterle in evidenza gli effetti ottici più comuni come la rifrazione e la diffrazione. I raggi infatti non subivano alcuna deviazione apparente di percorso nell'attraversare la superficie di separazione fra due sostanze diverse e non davano luogo a nessun effetto di sfrangiamento nel propagarsi oltre una fenditura estremamente sottile. Per la soluzione definitiva del dilemma si dovette attendere fino al 1912 quando il tedesco Max von Laue, con un esperimento cruciale provò, senza ombra di dubbio, la loro natura elettromagnetica ottenendo fenomeni di diffrazione di raggi X attraverso un cristallo di solfuro di zinco in cui le distanze interatomiche sono proprio dell'ordine di grandezza della lunghezza d'onda dei raggi e cioè di circa 1 Ångström ( $10^{-10}$  m). Si comprese allora che le fenditure normalmente usate in esperimenti di ottica, anche le più sottili, erano diverse migliaia di volte più larghe della lunghezza d'onda dei raggi X e perciò non potevano produrre effetti visibili di diffrazione.

Torniamo ora al 1895 perché dai raggi X ebbe origine un altro grande capitolo della fisica: la radioattività. L'interpretazione di Röntgen sulla genesi dei raggi X fu subito accolta unanimemente: i raggi X avevano origine nel punto in cui i raggi catodici colpivano il vetro del tubo; non era necessario che il tubo fosse di vetro, i raggi si producevano anche se questo era di altro materiale, per esempio alluminio. Leggiamo direttamente cosa scrive Röntgen nel suo primo articolo:

Risulta da un gran numero di studi che i punti del tubo a scarica, dove la fluorescenza appare più brillante, sono la sede principale dalla quale i raggi X nascono e si propagano in tutte le direzioni. Ciò significa che i raggi X partono dalle regioni in cui i raggi catodici colpiscono il vetro. Se con l'aiuto di una calamita si spostano i raggi catodici all'interno del tubo, si vedranno infatti partire i raggi X da un nuovo punto, ossia dall'estremità dei raggi catodici.

Si osservi che nel passo ora riportato, le osservazioni di Röntgen non stabilivano solo il luogo di emissione dei raggi X ma mettevano in evidenza anche la correlazione fra i due fenomeni: la fluorescenza del tubo e i raggi X.

Fu il grande Jules Henri Poincaré, matematico, fisico e filosofo francese, il primo a prendere in considerazione questo fatto e a tentarne, nei primi mesi del 1896, una decifrazione, interpretando

2. Per la scoperta dei raggi X Röntgen fu insignito nel 1901 del primo premio Nobel per la fisica.

3. In questa storia possiamo citare anche il nostro Augusto Righi, il quale fece notare che i raggi X, come la luce ultravioletta, sono in grado di scaricare corpi elettrizzati; ma non solo: anche l'aria attraversata dai raggi X acquista questa proprietà.

### Attività

Il numero di decadimenti nell'unità di tempo di una data quantità di materiale radioattivo si chiama *attività*; nel SI l'unità di misura è la *becquerel* (Bq) corrispondente a una disintegrazione al secondo e dimensionalmente pari a 1 Hz. La vecchia unità era il *Curie* (Ci) equivalente a  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq. L'attività evidentemente segue la legge del decadimento radioattivo:  $A(t) = A_0 2^{-t/t_{1/2}}$  dove  $t_{1/2}$  è il tempo di dimezzamento del materiale.

### Rischio da radiazioni ionizzanti

Gli effetti delle radiazioni sui viventi sono sostanzialmente di due tipi: deterministici e stocastici. I primi sono effetti somatici che si possono porre direttamente in relazione con la dose ricevuta, esempio: l'eritema da radiazione. I secondi, di cui abbiamo già accennato, sono effetti probabilistici la cui frequenza è legata alla dose totale ricevuta dall'intera popolazione, esempio: le leucemie. Questi due tipi di danni sono molto diversi fra loro: vediamone in particolare le caratteristiche.

I danni somatici deterministici, come per esempio una banale ustione, sono effetti a soglia (l'acqua tiepida non fa danni). La gravità aumenta con la dose (più grande è la pentola d'acqua bollente che ti cade addosso maggiore è il danno). Il periodo di latenza è breve e gli effetti sono riscontrabili da subito (la pelle diventa rossa e dopo qualche giorno si copre di vescicole). Se viene rimossa la sorgente di radiazioni gli effetti si possono ridurre fino a scomparire e il corpo è in grado autoripararsi (se togli la mano dal fuoco in tempo poi guarisce). Per gli amanti della sintomatologia da irradiazione letale possiamo dire che: con una dose di 0,25 Sv non si hanno sintomi. Con 0,50 Sv può comparire nausea, lieve malessere e dopo qualche settimana una riduzione dei globuli rossi. Con 1 Sv la nausea è forte, accompagnata da vomito e astenia; dopo qualche settimana vi è riduzione dei globuli bianchi e poi anemia. Con 2 Sv si ha una vera e propria malattia che viene detta sindrome acuta da radiazioni: dopo una prima fase di lieve shock, con nausea, vomito e inappetenza, segue uno stadio di latenza e poi compare lo stato acuto con astenia grave, febbre, tachicardia, ipotensione arteriosa, diarrea, tendenza al collasso cardiocircolatorio, leucopenia grave, anemia marcata, riduzione delle piastrine e diatesi emorragica (predisposizione alle emorragie); il sintomo predominante è comunque l'anemia. Con 4 Sv la sindrome acuta si presenta più grave e il 50% degli irradiati non adeguatamente curati muore in circa due mesi. Con 6 Sv la sindrome è molto più grave e il 100% degli irradiati muore nell'arco di un mese. Con dosi superiori a 6 Sv il decorso clinico cambia, lo stadio acuto è dominato dalla caduta dell'epitelio intestinale e comporta grave shock e setticemia, il decorso è sempre fatale nell'arco di pochi giorni. Questi valori si riferiscono a una esposizione omogenea su tutto il corpo; nel caso della radioterapia dei tumori, si arriva a somministrare dosi molto più elevate, anche superiori a 50 Sv, ma concentrate limitatamente ed esclusivamente al tumore da distruggere.

Vediamo ora i danni somatici stocastici: questi non hanno una dose di soglia, quindi sono riscontrabili anche a dosi estremamente basse (fumare una sola sigaretta al giorno non è equivalente a bere un bicchiere d'acqua). Sono di tipo probabilistico e l'effetto non è lo stesso su tutti gli individui (fumava due pacchetti al giorno eppure è morto a 90 anni di vecchiaia). La frequenza della loro comparsa aumenta con la dose ma la gravità è indipendente dalla dose ricevuta (sempre il cancro ti viene). Il periodo di latenza è molto lungo. Se viene rimossa la sorgente di radiazioni gli effetti non scompaiono (ho smesso dieci anni fa, ma quell'unica sigaretta che fumavo probabilmente è la causa di questo tumore al polmone).

### Le grandezze dosimetriche: l'esposizione

L'esposizione è la più antica grandezza dosimetrica e fu a suo tempo introdotta per descrivere la capacità dei raggi X di produrre ionizzazione nell'aria. La definizione è  $X = dQ/dm$  dove  $dQ$  è il valore assoluto della carica totale degli ioni di un segno prodotti in aria quando tutti gli elettroni, liberati dai fotoni nel volume di massa  $dm$ , sono completamente fermati in aria. Nel SI l'unità di misura è il C/kg. Questa unità non è usata in pratica perché si preferisce servirsi della vecchia, il *roëntgen* (R) che corrisponde a  $2,58 \cdot 10^{-4}$  C/kg. L'esposizione è una grandezza utilizzabile in un ambito assai ristretto perché riguarda solo i raggi X e in particolare quelli di energia non superiore ai 3 MeV.

### Dose assorbita

L'energia impartita a una massa unitaria di una data materia è detta *dose assorbita*, o semplicemente *dose*. Nel SI l'unità di dose assorbita è il *gray* (Gy) che equivale a 1 J/kg; l'unità precedente era il *rad* (radiation absorbed dose) che corrisponde a 0,01 Gy. Dal momento che i processi di trasferimento energetico dipendono dalla radiazione e dal tipo di materiale è difficile stimare in dettaglio l'energia depositata in un materiale irradiato. Per descrivere l'efficacia biologica di una radiazione è importante non solo la densità di energia assorbita (dose), ma anche il modo in cui essa viene depositata nella materia. Una radiazione deve possedere quindi un altro requisito, detto *qualità*, adatto a spiegare perché dosi uguali di radiazioni diverse inducano effetti biologici diversi nelle medesime condizioni sperimentali.

### Equivalente di dose

Per esprimere in modo non equivoco il rischio di danni biologici è stato introdotto l'*equivalente di dose* che, per una determinata irradiazione, è  $H = QD$ , dove  $D$  è la dose assorbita e  $Q$  è un coefficiente ponderale, detto *fattore di qualità*, che esprime il rapporto di efficacia tra la radiazione in esame e una radiazione di riferimento (raggi X prodotti da tubi a 200 kV o raggi  $\gamma$  del Cobalto 60). Valori tipici di  $Q$  sono i seguenti: 1 per i raggi X,  $\gamma$  e  $\beta$ ; da 5 a 20 per i neutroni (a seconda della loro velocità); 5 per i protoni; 20 per i raggi  $\alpha$ . In pratica un raggio  $\alpha$  è equivalente, dal punto di vista dei danni prodotti, a 20 elettroni. Nel SI l'unità di misura della dose equivalente è il *sievert* (Sv) pari a 1 *gray*  $\times$   $Q$ . La vecchia unità era il *rem* (roentgen equivalent man) che corrisponde<sup>2</sup> a 0,01 Sv.

In alcuni contesti di radioprotezione è utile introdurre un equivalente di dose in relazione a una irradiazione di riferimento, quella del corpo intero, detto *equivalente di dose efficace* e ottenuto moltiplicando l'equivalente di dose ricevuto da un organo per un coefficiente ponderale che dipende dall'organo o dal tessuto coinvolto (ad esempio per il colon vale 0,12, per la cute 0,01, per lo stomaco 0,12 ecc.). L'uso dell'equivalente di dose efficace è richiesto in particolare tutte le volte che materiale radioattivo entra nell'organismo per inalazione o ingestione; queste sostanze infatti possono accumularsi nei diversi organi e tessuti, che così risultano irradiati dall'interno: si parla in questo caso di contaminazione interna.

2. Il *rem* fu definito a suo tempo come la quantità di radiazione che produce nell'uomo lo stesso danno biologico derivante dall'assorbimento di un *roëntgen* di raggi X.

la concomitanza dei due fenomeni come una relazione di causa-effetto. Il vetro, diceva Poincaré, emetteva raggi X, e li emetteva diventando fluorescente. Non ci si poteva allora chiedere se tutti i corpi, la cui fluorescenza fosse sufficientemente intensa, potessero emettere, oltre che raggi luminosi, anche raggi X? Un quesito non difficile da verificare; se ne occuparono alcuni fisici sperimentali fra cui spicca il nome di Henri Becquerel, le cui ricerche, come vedremo, andarono ben oltre i raggi X.

### La radioattività

All'inizio del 1896 Becquerel, professore di fisica al Museo di Storia Naturale di Parigi, si chiese se, quando la luce ordinaria eccita la fluorescenza di una determinata sostanza, non si generino contemporaneamente raggi X capaci di attraversare corpi opachi alla luce.

Tra i tanti corpi fluorescenti si scelsero, senza un motivo particolare, sali di Uranio. L'esperimento consisteva nell'esporre ai raggi del sole i sali e vedere se contemporaneamente il materiale era in grado di impressionare lastre fotografiche avvolte in spessa carta nera. Il 24 Febbraio del 1896 Becquerel comunicava trionfalmente all'Accademia delle Scienze una memoria che doveva diventare famosa: un sale fluorescente di Uranio, il solfato doppio di Uranile e Potassio  $[(SO_4)_2UO_2K_2, 3H_2O]$  emetteva, se esposto alla luce, una radiazione capace di impressionare una lastra fotografica attraverso un foglio di carta nera: proprio la caratteristica posseduta dai raggi scoperti l'anno prima da Röntgen. Senonché, l'esperienza era sbagliata; e lo era per la mancanza di una di quelle prove di controllo la cui necessità può sembrare ovvia a posteriori, ma che sfuggì a Becquerel probabilmente troppo preso dall'eccitazione di aver trovato quel che cercava.

L'esperimento di Becquerel era congegnato nel seguente modo: una lastra fotografica veniva completamente avvolta in carta nera in modo che fosse impermeabile alla luce; si depositavano quindi sulla carta alcune lamelle del sale d'Uranio e si esponeva il tutto alla luce del sole per un determinato periodo di tempo. Sviluppata infine la lastra fotografica la si trovava impressionata in corrispondenza delle lamelle che v'erano state appoggiate in modo tale che la forma di queste ultime era chiaramente riconoscibile. Era evidente che il sale di Uranio aveva emesso agenti che, attraversata la carta nera, avevano impressionato la lastra; l'interpretazione sembrava banale: il sale di uranio esposto al sole diventa fluorescente ed emette raggi X.

A pensarci bene però l'esperimento andrebbe impostato in modo diverso. Per essere sicuri del risultato servirebbero almeno due prove di controllo indipendenti. Innanzi tutto bisognerebbe sviluppare una lastra della stessa partita, senza avervi deposto il materiale fluorescente e senza averla esposta alla luce, per essere certi che la partita non sia difettosa e che le macchie osservate non siano difetti di fabbricazione. Inoltre bisognerebbe preparare una seconda lastra identica a quella che verrà poi esposta e conservarla all'oscuro con sopra il sale fluorescente per lo stesso tempo per cui la lastra dell'esperienza vera e propria viene esposta alla luce. Solo osservando una differenza fra queste due lastre si potrà concludere inequivocabilmente che l'effetto osservato è da imputarsi alla fluorescenza destata dalla luce solare. È questa seconda prova di controllo quel che mancava all'esperienza di Becquerel e per questo motivo l'interpretazione che egli diede ai suoi primi risultati era del tutto sbagliata.

Come ormai tutti sanno, fu il caso a correggere l'errore dello scienziato francese. Dal 26 al 28 Febbraio tre giorni di grosse e persistenti nuvole si piazzarono davanti al sole proprio nel momento in cui Becquerel voleva esporre una delle sue lastre. Egli allora mise il tutto in un cassetto e preso da altre faccende ve lo lasciò per vari giorni. Quando riprese le esperienze, pensò che fosse il caso

di sviluppare quella lastra ch'era rimasta così a lungo in condizioni diverse dalle altre e trovò, contrariamente ad ogni aspettativa, che essa era impressionata esattamente come se la lamella di sale fluorescente che c'era sopra fosse stata esposta alla luce.

Becquerel intuì subito che la fluorescenza non avesse nulla a che fare con il nuovo fenomeno e, mediante nuove esperienze appositamente predisposte, riuscì a dimostrare che l'esposizione preliminare dei sali d'Uranio al sole non era necessaria per impressionare le lastre fotografiche. Il fenomeno infatti, si osservava anche con sali di Uranio non fluorescenti; inoltre era tipico dei composti dell'Uranio perché non si manifestava con altri corpi fluorescenti. Tutte queste circostanze bastarono per concludere che si era in presenza di un fenomeno spontaneo di carattere nuovo, la cui intensità non presentava alcuna diminuzione apprezzabile col tempo, come risultava utilizzando sali di Uranio preparati in data anche remota.

Proprio in quei giorni era giunta notizia a Parigi che molti fisici (fra cui Augusto Righi) avevano dimostrato sperimentalmente che i raggi X sono in grado di scaricare corpi elettrizzati. Becquerel provò a fare la stessa cosa con i nuovi raggi e ottenne lo stesso risultato. Si aggiungeva quindi al metodo fotografico, soprattutto qualitativo, il metodo elettrico capace di ottenere indicazioni numeriche e perciò maggiormente apprezzato. Uno dei fatti che Becquerel mise in evidenza fu il seguente: tutti i sali di Uranio, fluorescenti o no, cristallizzati o in polvere, asciutti o in soluzione, quale che fosse la loro provenienza, emettevano radiazioni della stessa natura, la cui intensità dipendeva soltanto dalla quantità di Uranio contenuta nel sale. La proprietà, dunque, era una proprietà atomica, legata all'elemento Uranio; conclusione confermata dal fatto che l'Uranio metallico risultava tre volte e mezzo più attivo del sale adoperato nei primi esperimenti.

Per due anni Becquerel rimase l'unico ad occuparsi di questi studi poi, nel 1898, Gerhard Karl Schmidt in Germania e Madame Curie a Parigi scoprirono contemporaneamente che anche il Torio emette radiazioni simili all'Uranio. La signora Curie intraprese uno studio sistematico dell'attività di numerosi minerali di Uranio e Torio raggiungendo risultati tanto interessanti che suo marito Pierre abbandonò i propri lavori per collaborare con la moglie. Ai due scienziati è dovuta l'introduzione del vocabolo "radioattività" per indicare la proprietà delle sostanze in grado di emettere raggi Becquerel, come allora venivano chiamati. L'attività delle sostanze radioattive, cioè l'intensità del loro irraggiamento, veniva misurata dalla conducibilità acquisita dall'aria sotto l'azione della sostanza in esame, mediante un dispositivo inventato dalla stessa Curie.

I coniugi Curie si misero a studiare tutte le sostanze radioattive che riuscirono a trovare e scoprirono che la pechblenda proveniente da Saint Joachimsthal in Boemia si comportava in modo inatteso: alcune varietà mostravano una radioattività addirittura quattro volte superiore all'Uranio metallico. La pechblenda è una miscelanza di Uranato di Piombo e diossido di Uranio, in proporzioni variabili, con tracce di molti altri elementi. I due ricercatori intuirono subito la causa del fenomeno: essi pensarono che mescolato all'Uranio fosse presente in piccole quantità una sostanza fortemente radioattiva diversa dall'Uranio e dal Torio. Procedettero quindi ad un accurato lavoro di separazione chimica di tutti i vari elementi presenti in piccole quantità nel minerale. Il procedimento è semplice: si produce nella pechblenda una qualche separazione chimica; si misura la radioattività dei prodotti ottenuti e si stabilisce se l'elemento ipotizzato sia rimasto interamente in uno dei prodotti o se si sia diviso tra di loro e in quale rapporto. Si procede poi in modo analogo su ciascuno dei prodotti ottenuti. Dopo un enorme lavoro, che si intuì penoso e costoso, partendo da parecchie tonnellate di minerale i coniugi Curie ottennero nel Luglio 1898 una nuova sostanza molto radioattiva battezzata Polonio in onore della patria di origine della Curie e, nel Dicembre dello stesso anno, scoprirono un

## 5. Elementi di dosimetria

Ai fini pratici le radiazioni si dividono in due grandi categorie: quelle ionizzanti e quelle non ionizzanti. Le radiazioni ionizzanti possono esserlo direttamente, in quanto costituite da "particelle" cariche (come i raggi  $\alpha$  e  $\beta$ , i protoni, ecc.) in grado di cedere parte o tutta la loro energia a uno degli elettroni dell'atomo urtato, oppure indirettamente, come i raggi X e i neutroni<sup>1</sup>. Per le onde elettromagnetiche si considerano non ionizzanti le radiazioni di lunghezza d'onda superiore a  $0,1\mu$  (ricordiamo che il visibile ha uno spettro compreso tra  $0,8$  e  $0,4\mu$ ) a cui corrisponde un'energia dei fotoni minore di  $12$  eV, equivalente al primo potenziale di ionizzazione dell'atomo di idrogeno. Tra le radiazioni non ionizzanti sono comprese anche le onde elastiche, quindi infrasuoni, suoni e ultrasuoni.

È evidente che la distinzione appena operata è una distinzione squisitamente pratica: quelle ionizzanti fanno male o, detto meglio, producono un danno biologico; cerchiamo di capire perché. La radiazione porta con sé energia che viene depositata nella materia vivente mediante processi di eccitazione e ionizzazione che proseguono attraverso vari stadi fino al danno biologico finale che può essere di vario tipo. Se la radiazione agisce sull'acqua contenuta all'interno delle cellule l'azione è indiretta, in quanto gli effetti sono dovuti alla produzione di radicali liberi a causa dell'idrolisi dell'acqua. La conseguenza in questo caso è la morte della cellula per distruzione delle macromolecole che la costituiscono. Se invece le radiazioni interagiscono sul DNA della cellula si genera un danno diretto, in quanto l'energia dei fotoni (maggiore di  $12$  eV) è sufficiente per rompere i legami idrogeno che tengono unite le basi azotate presenti sui due filamenti della doppia elica. Nella maggior parte dei casi la conseguenza è che la cellula diventa inattiva... e questo sarebbe il male minore. In rari casi, purtroppo, la mutazione indotta nel DNA dalla radiazione ionizzante inibisce i meccanismi di autoregolazione della cellula che, senza più freni inibitori, comincia a duplicarsi in modo tumultuoso infiltrandosi fra le cellule del tessuto sano. A questi tessuti, formati da cellule immortali che si accrescono in modo del tutto autonomo, senza alcun riguardo per i tessuti vicini e per l'organismo intero, in grado di apparire improvvisamente in punti diversi anche molto lontani fra loro, viene dato il triste nome, a tutti noto, di tumori.

1. Le radiazioni elettromagnetiche interagiscono con la materia in modo diverso dalle particelle cariche. La maggior parte di esse non sono direttamente ionizzanti in quanto il singolo fotone non ha energia sufficiente per provocare ionizzazione. I raggi X e  $\gamma$  però possono essere diffusi dagli elettroni o assorbiti dagli atomi e dalle molecole del mezzo attraversato mettendo in moto elettroni e positroni che a loro volta possono produrre ionizzazione ed eccitazione. Anche i neutroni ionizzano in modo indiretto; essendo privi di carica elettrica non subiscono perturbazioni da parte degli elettroni atomici e possono quindi raggiungere i nuclei, provocando trasmutazioni con conseguente emissione di particelle cariche o neutre e di raggi  $\gamma$ .

I raggi  $\gamma$ , la componente più penetrante delle radiazioni, non vengono invece deflessi né da campi magnetici né da campi elettrici. Il loro comportamento, assai simile sotto ogni aspetto a quello dei raggi X scoperti da Roentgen nel 1895, suggerì ben presto l'ipotesi che si tratti di radiazioni della stessa natura. La dimostrazione sperimentale definitiva si ebbe soltanto nel 1914, quando Rutherford e Andrade riuscirono per primi a misurare la lunghezza d'onda di raggi  $\gamma$  usando come reticolo di diffrazione un cristallo, esattamente come aveva fatto nel 1912 von Laue per i raggi X.

elemento ancora più attivo che chiamarono Radio.

Nel 1906 per la scoperta del nuovo elemento, dalla radioattività enormemente superiore a quella dell'Uranio e del Torio, ai due coniugi Curie venne, insieme al Becquerel, attribuito il premio Nobel.

## 2. Principali fenomeni connessi con la radioattività

Supponiamo di avere alcuni centigrammi di un composto del Radio, per esempio cloruro di Radio, contenuti in una fialetta di vetro in cui sia stato fatto il vuoto. La fialetta, almeno in una certa zona, abbia le pareti estremamente sottili, dell'ordine di 10–20  $\mu$ . Il composto si presenta all'aspetto esterno in piccoli cristalli bianchi monoclini simili in tutto e per tutto all'innocuo cloruro di Bario. Con questa fialetta vogliamo mettere in evidenza i principali effetti macroscopici della radioattività.

### 1) Effetto fotografico

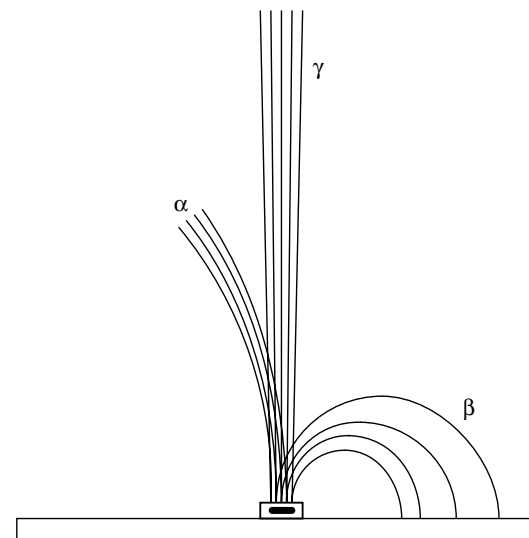
Come abbiamo visto attraverso questo effetto Becquerel giunse alla scoperta della radioattività dell'Uranio. Se si deposita la fialetta su una lastra fotografica questa, una volta sviluppata, risulta impressionata in corrispondenza della fialetta. L'effetto permane anche se si interpongono strati di materiale vario o se si allontana la fialetta. Naturalmente in questo caso l'effetto sarà meno marcato e saranno necessari tempi di esposizione via via crescenti. Contemporaneamente, la zona impressionata si farà sempre meno definita, fino a diventare una velatura pressoché uniforme anche dopo l'interposizione di alcuni centimetri di Piombo. Da questi fatti possiamo dedurre che una parte delle radiazioni emesse dal Radio è costituita da raggi estremamente penetranti.

### 2) Eccitazione della fluorescenza

Se la fialetta contenente il cloruro di Radio viene avvicinata ad uno schermo fluorescente, per esempio un cartone ricoperto da uno strato di platino-cianuro di bario si nota che la fluorescenza dello schermo viene eccitata soprattutto in corrispondenza della zona del vetro più sottile. Analogamente se la fialetta viene osservata all'oscuro, si può vedere una debole luminescenza verdastra del vetro, tutto attorno ai cristallini di cloruro di radio. Se questi sono a contatto con la parte sottile del vetro, questa luminescenza si osserva anche all'esterno della fiala, nell'aria, per una estensione di alcuni millimetri. Inoltre l'aspetto della fialetta cambia lentamente a partire dall'istante della preparazione. Mentre all'inizio la luminescenza è viva solo nelle immediate vicinanze del cloruro di Radio, nel corso di alcuni giorni essa si fa più intensa e si diffonde uniformemente a tutto il vetro della fialetta, come se dal Radio emanasse un po' alla volta una sostanza gassosa, diffondendosi uniformemente in tutto lo spazio a disposizione.

Dall'osservazione della fluorescenza si può dedurre che una parte delle radiazioni emesse dal Radio e precisamente quella più efficace nel destare la fluorescenza è assai poco penetrante, essendo in grado di attraversare la fialetta solo là dove lo spessore non supera la ventina di micron.

Rutherford dimostrò che anche il campo magnetico li deflette come cariche elettriche positive in movimento e dalle due deviazioni dedusse i valori della carica specifica  $q/m$  e della velocità  $v$  come



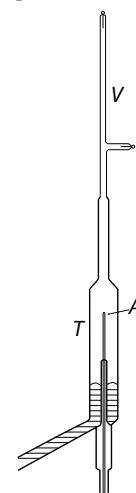
aveva fatto Thomson nel 1897 nel suo celebre esperimento. Nella figura a lato sono mostrate le deflessioni di raggi  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  in un campo magnetico (il disegno è di Madame Curie, da una Tesi del 1904). Per ciò che riguarda la carica specifica Rutherford trovò un valore approssimativamente pari alla metà di quello relativo al nucleo dell'atomo di idrogeno. Ciò significa evidentemente: a) che i raggi  $\alpha$  sono di natura corpuscolare; b) che, nell'ipotesi che ciascuna particella  $\alpha$  porti una carica elettrica pari a quella elementare  $e$ , la sua massa deve essere doppia di quella  $m$  del nucleo dell'atomo di idrogeno. Non si può naturalmente escludere che la carica elettrica sia  $2e$  e la sua massa  $4m$ , o la carica  $3e$  e la sua massa  $6m$ , ecc. Per ciò che riguarda la

velocità, egli trovò che i raggi  $\alpha$  si muovevano a circa un ventesimo di quella della luce.

La questione relativa alla natura dei raggi  $\alpha$  fu risolta dallo stesso Rutherford e dai suoi allievi. Essi riuscirono innanzitutto a contare in numero di particelle  $\alpha$  emesse da una quantità nota di radio. Misurata poi la carica totale associata a un numero noto di particelle poterono concludere che ciascuna particella  $\alpha$  porta con sé una carica positiva pari al doppio della carica elementare. D'altro canto, come abbiamo già visto a proposito dei fenomeni connessi con la radioattività (capitolo 2, punto 6), nel 1909 Rutherford e Royds dimostrarono in modo conclusivo che la produzione di elio da

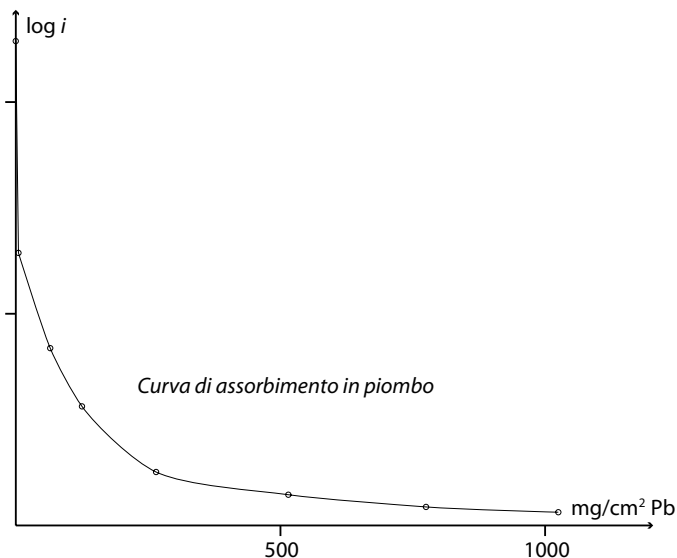
parte delle sostanze radioattive è essenzialmente associata all'emissione di raggi  $\alpha$ . Il dispositivo sperimentale da essi adoperato è rappresentato schematicamente nella figura a lato. Il tubicino di vetro  $A$  è talmente sottile da lasciar passare la maggior parte dei raggi  $\alpha$  ed è riempito di radon. Ogni gas raccolto nella provetta esterna  $T$  inizialmente accuratamente evacuata poteva essere concentrato nel tubo a scarica  $V$ , semplicemente facendo salire il livello del mercurio in  $T$ , attraverso il tubo laterale. Dopo due giorni dall'introduzione del Radon nello spettro della luce emessa dal tubo a scarica era chiaramente visibile la riga gialla dell'elio. Risultava con ciò definitivamente provato che le particelle  $\alpha$  altro non sono che atomi di elio doppiamente ionizzati espulsi con elevatissima velocità dagli atomi delle sostanze radioattive.

Per quanto riguarda i raggi  $\beta$ , essi vengono deflessi da un campo magnetico assai più facilmente dei raggi  $\alpha$ , in senso opposto a questi ultimi: quindi come se si trattasse di particelle in movimento portanti una carica elettrica negativa. Lo studio quantitativo delle deflessioni da essi subite in campi elettrici e magnetici di intensità nota ha dimostrato che si tratta di elettroni espulsi dagli atomi delle sostanze radioattive con velocità assai prossima a quella della luce.





Per la curva seguente si è invece usato come materiale assorbente il piombo fino ad uno spessore di quasi 1 millimetro (1000 mg/cm<sup>2</sup> di Pb corrispondono ad uno spessore di 1/11,3 cm = 0,88 mm).



Come si vede, la prima curva mostra in modo assai evidente la presenza di una componente molto poco penetrante, che è completamente arrestata già a 5 o 6 mg/cm<sup>2</sup> di alluminio (0,02 mm). La seconda curva, proseguita fino a 1 g/cm<sup>2</sup> di piombo, mostra che la parte restante delle radiazioni è composta a sua volta da due componenti di diversa penetrazione: una più penetrante, che viene assorbita nel piombo secondo una legge esponenziale, e una di penetrazione intermedia, che viene praticamente arrestata da circa 300 mg/cm<sup>2</sup> (0,3 mm) di piombo.

A queste tre componenti, prese nell'ordine crescente del potere penetrante è stato dato il nome di raggi  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ . Mentre la scoperta dei raggi  $\alpha$  e  $\beta$  sulla base dell'analisi delle curve di assorbimento è dovuta a Rutherford, la componente più penetrante, i raggi  $\gamma$ , fu scoperta successivamente da Villard.

#### Identificazione dei raggi $\alpha$ , $\beta$ e $\gamma$

Sin dal 1899 Giesel, St. Meyer e Schweidler e H. Becquerel trovarono che parte delle radiazioni emesse dal radio vengono deviate dall'azione di un campo magnetico perpendicolare alla loro traiettoria. Bisogna notare che le esperienze relative si possono eseguire soltanto nel vuoto, perché da un lato pochi centimetri di aria in condizioni normali sono sufficienti ad arrestare completamente i raggi  $\alpha$  e d'altro lato i raggi  $\beta$ , per quanto meno assorbiti, subiscono tuttavia nell'attraversare la materia e in particolare l'aria dei forti effetti di diffusione, che rendono impossibile studiarne la deflessione in un campo magnetico.

Si trovò successivamente che i raggi  $\alpha$  vengono debolmente deflessi perpendicolarmente al campo magnetico e alla loro traiettoria, come se si trattasse di particelle cariche positivamente. Nel 1903

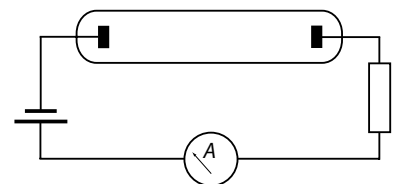
#### 3) Effetti elettrostatici

Se la parete di vetro è talmente sottile che gran parte delle radiazioni meno penetranti passi all'esterno, la fialetta a partire dal momento della preparazione va assumendo una carica elettrica negativa via via crescente. Siccome il vetro è un buon isolante, questa carica negativa resta per la maggiore parte confinata nella parete interna della fialetta, mentre le poche cariche che arrivano all'esterno vengono rapidamente neutralizzate dagli ioni di segno contrario esistenti nell'aria attratti dalla superficie esterna. In questo modo, la parete di vetro viene sottoposta a tensioni meccaniche che aumentano con l'accumularsi della carica e che possono anche determinarne la rottura. L'esperienza ha mostrato che l'unico modo sicuro di evitare questo inconveniente consiste nel saldare attraverso il vetro un filo metallico che metta in contatto la superficie interna con quella esterna.

Questo effetto dimostra che almeno una parte delle radiazioni emesse dal radio (e precisamente quelle meno penetranti) è costituita da radiazioni che portano una carica positiva.

#### 4) Ionizzazione dei gas

È noto che i gas a temperatura e pressione ordinaria sono tra i migliori isolanti che si conoscano. Se ad un'ampolla di vetro munita di due elettrodi e contenente gas come mostrato nella figura seguente si applica una d.d.p. non troppo elevata la corrente che scorre nella resistenza  $R$  in serie al



tubo è estremamente piccola se non vi sono agenti esterni che creino nel gas coppie di ioni. Oggi sappiamo che anche questa residua conducibilità dei gas è da attribuirsi a una causa ionizzante esterna mai completamente eliminabile: il fondo di radioattività naturale<sup>1</sup>. Se ora avviciniamo al tubo la nostra fialetta ciò che si osserva è un brusco e molto sensibile

aumento della corrente nel tubo. L'entità di questo aumento dipende dalla posizione in cui si mette la fialetta, ma il dispositivo "sente" la presenza del radio anche a parecchi metri di distanza. L'effetto è particolarmente notevole se il preparato viene addirittura posto all'interno del tubo, il che dimostra che sia le radiazioni più penetranti del radio sia quelle meno penetranti sono in grado di ionizzare il gas. Questo effetto, come vedremo, è stato il primo fenomeno sfruttato per eseguire misure quantitative di radioattività.

#### 5) Sviluppo di calore

Il fenomeno fu scoperto da P. Curie e Laborde nel 1903 e successivamente studiato da Rutherford, Hess e altri. Immergendo la fialetta col cloruro di Radio in un calorimetro di opportuna sensibilità, si trova che si ha in essa una continua produzione di calore, con ritmo costante nel tempo. In particolare un esame più accurato mostra che il calore prodotto per unità di tempo dipende dal tempo

1. Il fondo di radioattività naturale è di origine sia terrestre che extraterrestre. Quello terrestre è dovuto a isotopi radioattivi di elementi naturali contenuti nella crosta terrestre. Per esempio l'Uranio e il Torio sono elementi estremamente diffusi anche se in piccolissime quantità, una superficie metallica esente il più possibile da contaminazioni radioattive emette sempre da una a cinque particelle  $\alpha$  per cm<sup>2</sup> ogni ora. Quello di origine extraterrestre è dovuto ai raggi cosmici; la ionizzazione prodotta dalla radiazione cosmica può essere compresa tra due e dieci coppie di ioni per cm<sup>3</sup> e per sec.

trascorso dal momento della preparazione della fialetta. Esso è piccolo all'inizio e va progressivamente aumentando, fino a raggiungere un ritmo costante nel corso di alcune settimane. Questo valore limite corrisponde a circa 140 (piccole) calorie per grammo di radio e per ora. Una caratteristica assai notevole è che tale produzione di calore non dipende dalla temperatura ambiente. P. Curie e J. Dewar verificarono che essa è esattamente la stessa a temperatura ordinaria e alla temperatura dell'idrogeno liquido (20 °K). Se si tiene conto che la velocità di tutte le reazioni chimiche dipende in modo estremamente sensibile dalla temperatura e che a 20 °K ogni reazione chimica ha velocità praticamente nulla, si vede come sia senz'altro da escludersi che questa continua e regolare liberazione di energia sia in qualche modo da attribuirsi a fenomeni di natura chimica<sup>2</sup>.

#### 6) Sviluppo di sostanze gassose

Mentre al momento della chiusura della nostra fialetta erano presenti all'interno solo due elementi, il Cloro e il Radio, si può mettere in evidenza con metodi spettroscopici che in essa si va lentamente accumulando una miscela gassosa costituita da due componenti. L'esame spettroscopico rivela che il primo di questi è semplicemente gas Elio, mentre il secondo mostra uno spettro di righe che lo distingue da tutti gli elementi stabili conosciuti in natura. L'esame del suo spettro è tuttavia sufficiente per concludere che si tratta di un gas nobile più pesante dello Xenon: ad esso è stato dato il nome di Radon.

2. Vi è un altro elemento che conferma in modo impressionante che non si tratta di trasformazioni di carattere chimico e riguarda l'energia liberata in un singolo processo di emissione. Calcoliamoci per esempio l'energia liberata nella formazione di una molecola d'acqua in una reazione esoenergetica come quella della formazione di vapor d'acqua. È noto che nel formare una mole di vapor d'acqua da idrogeno e ossigeno gassosi vengono liberati 57,8 Kcal. Ne segue che nella formazione di una molecola di acqua si liberano  $\frac{57,8 \cdot 4186}{6,02 \cdot 10^{23}}$  joule =  $\frac{57,8 \cdot 4186}{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}$  eV = 2,5 eV

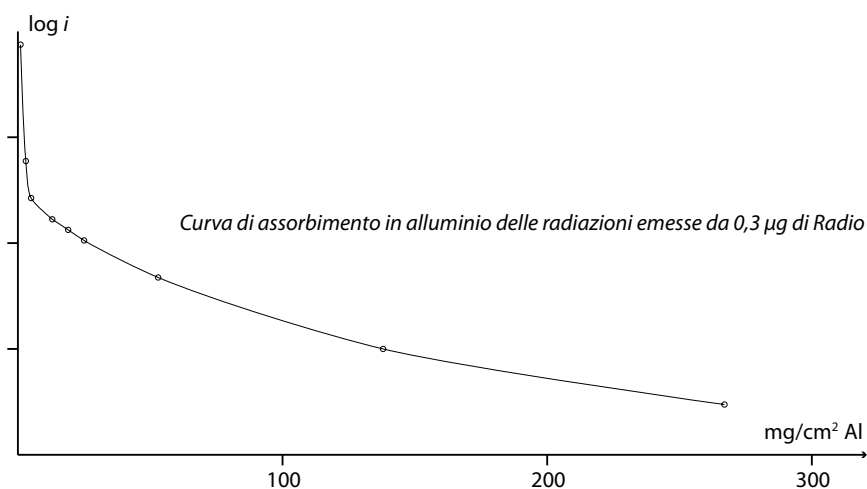
Confrontiamo questo dato con l'energia cinetica con la quale viene espulsa una particella  $\alpha$  da un atomo di radio. Essendo la sua massa 4 volte quella dell'atomo di idrogeno e la sua velocità circa  $\frac{1}{20}$  di quella della luce risulta:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot \frac{1,67 \cdot 10^{-27}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \left( \frac{1}{20} \cdot 3 \cdot 10^8 \right)^2 = 4,7 \text{ MeV} \quad \text{un'energia due milioni di volte maggiore!}$$

#### 4. I raggi $\alpha$ , $\beta$ , e $\gamma$

Supponiamo di disporre di una piccola camera di ionizzazione a pressione atmosferica, nella parete della quale sia praticata una finestra in corrispondenza del preparato radioattivo. Tale finestra sia chiusa con un sottilissimo foglio di cellophan. Abbiamo già notato nel capitolo 2, quando abbiamo trattato dei principali fenomeni connessi con la radioattività, che tra le radiazioni emesse dal radio ve ne sono alcune assai poco penetranti e altre assai penetranti. Vogliamo adesso precisare quantitativamente questa osservazione facendo delle curve di assorbimento delle radiazioni in questione. Queste curve di assorbimento si ottengono mettendo il preparato radioattivo vicino alla finestra della camera di ionizzazione, in modo che parte delle radiazioni emesse entrino nella camera. Si procede poi a misurare la corrente di ionizzazione interponendo spessori via via crescenti di materiale assorbente: l'attività che così si misura è relativa soltanto a quella parte delle radiazioni emesse che riescono ad attraversare lo strato assorbente interposto.

La figura seguente rappresenta a titolo di esempio la curva di assorbimento ottenuta dalle radiazioni emesse da un preparato contenente 0,3  $\mu\text{g}$  di radio. Come materiale assorbente si è adoperato l'alluminio il cui spessore è stato indicato fornendo la massa di materiale per unità di superficie<sup>1</sup>. In ordinate sono riportate i logaritmi di numeri proporzionali alla corrente di ionizzazione.



1. Gli spessori dei materiali assorbenti, da copertura e simili si esprimono spesso in questa strana unità di misura. Per ottenere lo spessore basta dividere per la densità, infatti la massa si può scrivere come volume per densità e il volume a sua volta come superficie per spessore. 100 mg/cm<sup>2</sup> di alluminio corrispondono ad uno spessore di  $100 \cdot 10^{-3} / 2,7 \text{ cm} = 0,37 \text{ mm}$ .

Alcuni fenomeni che si vorrebbero osservare nella camera di Wilson, come per esempio i raggi cosmici, sono estremamente rari, per cui occorrono ore prima che essi si manifestino. La probabilità di cogliere durante una espansione proprio uno di questi processi è straordinariamente piccola. Se quindi per osservare questi fenomeni ci si dovesse affidare al caso, le ricerche porterebbero via troppo tempo. È utile a questo scopo collegare la camera di Wilson con un contatore che, per così dire, faccia da sentinella alla camera. Esso viene predisposto in modo che reagisca proprio a quel processo che si vuole osservare nella camera. Se avviene tale processo, il contatore comanda immediatamente l'espansione della camera. Questa avviene così rapidamente che gli ioni formati dal gas non si sono ancora allontanati dalle traiettorie delle particelle le quali diventano visibili come scie di nebbia.

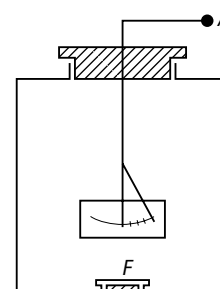
Un inconveniente della camera di Wilson è che essa è attiva solo per un tempo di circa un decimo di secondo per ogni espansione: cioè registra solo le particelle che l'attraversano in quel brevissimo intervallo di tempo. Ne segue che, per esempio, 100 ore di lavoro con una camera di Wilson, che faccia una espansione al minuto, corrispondono a registrare le particelle che l'hanno attraversata in un tempo non più lungo in totale di dieci minuti.

### 3. Strumenti per lo studio della radioattività

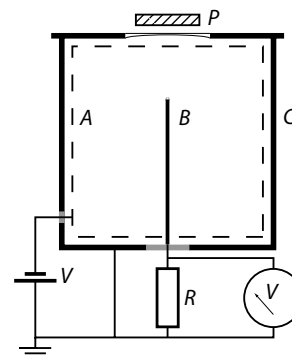
Per effettuare misure di radioattività occorre trovare un modo per rendere quantitative le osservazioni viste nel capitolo precedente sfruttando opportunamente qualcuno dei sei gruppi di fenomeni. Di questi, gli ultimi due, sviluppo di calore e di sostanze gassose sono praticamente inutilizzabili per misure di radioattività. Si tratta infatti di processi lenti, che richiedono preparati molto forti e misure di estrema precisione per essere messi in evidenza e studiati quantitativamente.

Degli altri, anche gli effetti elettrostatici difficilmente si prestano a osservazioni quantitative. Restano: l'effetto fotografico, l'eccitazione della fluorescenza e la ionizzazione dei gas; in effetti tutti e tre questi fenomeni vengono oggi sfruttati per misure di radioattività, tuttavia il primo che è stato utilizzato è quello della ionizzazione dei gas.

Scoperto, come abbiamo visto, dallo stesso Becquerel, esso fu utilizzato per la prima volta dai coniugi Curie con un dispositivo elettro-metrico che lo stesso Pierre Curie aveva costruito in precedenti esperimenti sulla piezoelettricità. Questi apparecchi primitivi erano costituiti da un elettroscopio a foglia, la cui carcassa metallica fungeva anche da camera di ionizzazione (vedi figura a lato). L'elettroscopio veniva caricato attraverso il contatto *A* e lasciato quindi isolato. In queste condizioni le foglie rimanevano separate per lungo tempo dato l'alto isolamento dei supporti di ambra o ebanite e la scarsissima conducibilità dell'aria contenuta nella scatola, in assenza di agenti ionizzanti. Il preparato radioattivo veniva quindi posto al di sotto della sottile finestra *F* praticata nel fondo della camera e si misurava il tempo impiegato dall'elettroscopio per scaricarsi.



Negli apparecchi più moderni, la camera di ionizzazione è separata da quella dello strumento di misura (che va protetto dall'azione diretta delle radiazioni) e il grossolano elettroscopio a foglia è sostituito da un voltmetro estremamente sensibile. Lo schema di principio diventa allora quello della figura seguente. La camera di ionizzazione *C* è costituita da un robusto involucro metallico connesso a terra che presenta una finestra in corrispondenza del preparato radioattivo *P*. Questa finestra può in alcuni casi essere aperta o chiusa da un sottile foglio di alluminio. All'interno sono contenuti i due elettrodi, dei quali quello esterno *A*, costituito da una rete metallica, è mantenuto ad una tensione di qualche centinaio di volt e quello interno *B*, raccoglitore, è connesso alla resistenza di fuga *R*. La camera *C* può essere piena di aria a pressione atmosferica, ma di solito è riempita con gas inerte, come l'argon a pressione di qualche atmosfera. La corrente di ionizzazione *i* fluisce permanentemente a terra attraverso la resistenza



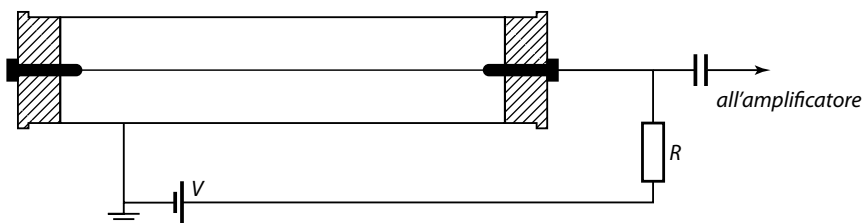
$R$  che si trova alla tensione  $v = Ri$ , proporzionale alla corrente di ionizzazione e quindi all'attività del preparato. Le correnti di ionizzazione sono generalmente comprese tra  $10^{-12}$  e  $10^{-8}$  Ampere e siccome i voltmetri misurano tensioni minime dell'ordine di qualche centesimo di Volt la resistenza di fuga deve variare tra  $10^7$  e  $10^{13}$  ohm.

È interessante chiedersi cosa succede se aumentiamo la tensione tra gli elettrodi. Dapprima l'unico risultato è un aumento della velocità degli ioni prodotti dalla radiazione ionizzante verso gli elettrodi. A un certo punto però gli ioni acquistano tra un urto e l'altro una energia cinetica sufficiente a ionizzare per urto le molecole del gas. Bisogna tener presente che, a parità di energia, è molto più probabile che una coppia di ioni secondari venga prodotta da un elettrone che non da uno ione positivo per cui, nelle considerazioni che seguono, possiamo trascurare l'effetto degli ioni positivi.

Al passaggio di una particella ionizzante attraverso la camera di ionizzazione, si creano dunque in queste condizioni un certo numero di coppie di ioni (ionizzazione primaria). Gli elettroni attratti dall'elettrodo positivo (che supponiamo sia l'elettrodo raccogliitore al centro) creano ben presto sul loro cammino altre coppie di ioni (ionizzazione secondaria) i cui elettroni, attratti insieme a quelli primari dall'anodo, raggiungono anch'essi assai presto energia sufficiente per creare nuove coppie di ioni e così via. In questo modo tutto lo spazio compreso tra il punto dove si è prodotta la ionizzazione primaria, e l'elettrodo raccogliitore risulta ad un certo punto pieno di ioni positivi (che non contribuiscono ulteriormente alla produzione di ioni) mentre gli elettroni corrispondenti sono ormai tutti arrivati sull'anodo. A questo punto la produzione di ioni si interrompe e gli ioni positivi vengono raccolti dal catodo in un tempo di circa 1 ms.

In queste condizioni, l'impulso di tensione sull'elettrodo raccogliitore è naturalmente assai maggiore di quello che corrisponderebbe alla sola ionizzazione primaria. Ogni elettrone primario infatti ha generato un numero di elettroni secondari che può anche essere dell'ordine di  $10^3 \div 10^4$ . Tuttavia, in generale questo numero risulta dipendente dal punto nella camera in cui l'elettrone primario è stato generato, sicché non c'è nessuna relazione semplice e utilizzabile in pratica, tra l'ampiezza dell'impulso che si registra e la ionizzazione primaria. È però possibile con un semplice artificio restringere la zona di produzione di ioni secondari alle immediate vicinanze dell'anodo, in modo tale che ciascun elettrone primario formi (a parte fluttuazioni statistiche) lo stesso numero di ioni secondari. Ciò si può ottenere facendo in modo, con un'opportuna scelta della geometria degli elettrodi, che il campo elettrico fortemente disomogeneo superi il valore critico per la produzione di ioni secondari solo nelle immediate vicinanze dell'anodo, mentre per tutto il rimanente volume della camera si ha soltanto collezione degli ioni primari. È ciò che avviene con un'opportuna d.d.p. se la camera ha per esempio simmetria cilindrica e l'anodo è costituito da un filo teso di diametro piccolo in confronto al diametro del catodo. L'apparato, mostrato nella figura seguente, prende allora il nome di *contatore proporzionale*.

In esso, ciascuna particella ionizzante genera dunque un impulso di tensione che entro le fluttuazioni statistiche è rigorosamente proporzionale alla ionizzazione primaria della particella stessa.



Il fattore di moltiplicazione varia a seconda della tensione applicata tra 1 (camera di ionizzazione) e un massimo (al di sopra del quale il funzionamento non è più regolare e la moltiplicazione non è più costante) che viene fissato in genere intorno a 10.000. Il contatore proporzionale è assai utile ogni volta che si debbano eseguire misure di potere ionizzante di determinate particelle o che si debbano contare particelle di un tipo determinato in presenza di altre di diverso potere ionizzante.

#### La camera di Wilson

Un altro tipo di rivelatore di singole particelle cariche, sempre basato sull'effetto della ionizzazione, ma di caratteristiche assai diverse da quelle della camera di ionizzazione è la *camera a nebbia* inventata nel 1911 da Charles T. R. Wilson. Essa è uno dei più affascinanti strumenti della fisica e dà l'impressione di penetrare direttamente il mondo delle particelle elementari al contrario degli strumenti visti finora che si limitano a muovere indici su scale graduate. Numerosissime scoperte fondamentali sono state effettuate con questo strumento e gli stessi fisici, come i profani che per la prima volta lo vedono funzionare, non nascondono la loro meraviglia nello spettacolo sempre nuovo e variato ch'esso presenta a chi lo osserva. La camera a nebbia è stata chiamata "il più geniale e meraviglioso strumento della storia della scienza" (Rutherford), "l'ultima corte di appello della fisica", "una finestra aperta sul mondo atomico" (Persico). Tuttavia non bisogna dimenticare che ciò che in esso si osserva non sono le particelle elementari ma sempre e soltanto un effetto secondario di queste che viene ingrandito fino a diventare macroscopicamente visibile, attraverso complicati processi che interessano sempre un numero sterminato di particelle.

Il principio di funzionamento su cui si basa la camera di Wilson è sostanzialmente il seguente. In una camera contenente aria satura di vapor d'acqua, la cosiddetta camera a nebbia, viene prodotta una repentina espansione dell'aria. Questa di conseguenza si raffredda e il vapore diviene saturo. Esso, benchè ben oltre la temperatura di rugiada, in assenza di impurità può permanere per un certo tempo in uno stato di sovrasaturazione. Se in questo intervallo di tempo una particella ionizzante attraversa la camera, durante il suo percorso essa strappa elettroni alle molecole d'aria e gli ioni dei due segni ch'essa lascia lungo la traiettoria, formano i cosiddetti nuclei di condensazione sui quali il vapor d'acqua si condensa in piccolissime gocce. Così lungo l'intera traiettoria della particella si forma una sottile scia di goccioline d'acqua direttamente osservabili in opportune condizioni di illuminazione, analoga a quella che un aereo ad alta quota lascia dietro di sé. La figura seguente mostra uno schema semplificato della camera di Wilson.

