

LA SCOPERTA DEGLI ISOTOPi

I raggi positivi e l'esperimento di Goldstein

A seguito della scoperta dei raggi catodici e dell'indagine sulla loro natura, era ragionevole chiedersi se potesse esistere una forma di elettricit  positiva. Fu il fisico tedesco Eugen Goldstein (1850-1930) a compiere nel 1886 una prima rivelazione dei raggi canale, come vennero chiamati i raggi costituiti da ioni positivi [1].

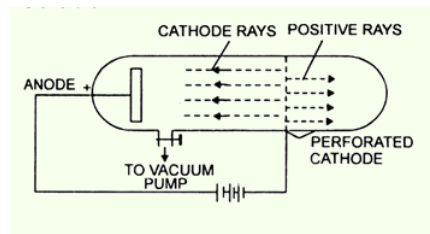


Fig. 3: schematizzazione del tubo di Goldstein

Goldstein utilizz  un tubo di Crookes, con all'interno un gas a bassissima pressione, munito di due elettrodi: un catodo perforato nella parte centrale e un anodo posto agli estremi del tubo di fronte al catodo. Collegando al catodo il polo negativo di un generatore e quello positivo all'anodo, un fascio di raggi catodici avanza verso l'anodo producendo fluorescenza sulla parete retrostante l'anodo, mentre un fascio di raggi canale viene accelerato lungo le linee del campo elettrico dall'anodo al catodo [Fig. 3]. Parte di questi lo attraversano, passando attraverso i fori e possono essere opportunamente deviati da campi elettrici o magnetici.

Le prime misure compiute sulle deboli deflessioni dei raggi canale mostrarono che erano costituiti da particelle di carica positiva (ioni positivi del gas), aventi masse superiori a quella degli elettroni, e che le loro velocit  era di gran lunga inferiori a quelle degli elettroni. Oggi   possibile valutare la velocit  degli elettroni in un tubo di Crookes, che oscilla tra $4 \cdot 10^7 \text{ ms}^{-1}$ e 10^8 ms^{-1} , mentre per gli ioni positivi tale valore varia in un intervallo compreso tra $2 \cdot 10^5 \text{ ms}^{-1}$ e $6 \cdot 10^5 \text{ ms}^{-1}$.

I raggi canale e l'esperimento di Thomson

Dopo aver ricevuto il premio Nobel e all'et  di quasi 50 anni, J. J. Thomson inaugur  una nuova linea di ricerca sui raggi canale, per individuarne le caratteristiche. Sfruttando un apparato di Crookes-Goldstein e l'introduzione di un campo elettrico e un campo magnetico, ottenne una serie di risultati notevoli che confluirono in un lavoro di riferimento per la ricerca sugli isotopi [2].

Di seguito   riportato uno schema dell'apparato sperimentale utilizzato da Thomson. Nel bulbo A viene continuamente pompato del gas a bassissima pressione e fatto fuoriuscire da un piccolo ugello controllato da un manometro [Fig.4 a]. Nella regione A si verifica la scarica e si generano i raggi canale, che vengono accelerati verso il catodo K, in cui   praticato un foro che permette ai raggi canale di superare il catodo e raggiungere la regione UVM dove   presente un elettromagnete, i cui poli P e Q generano un campo magnetico uniforme verticale [Fig.4 b]. I poli dell'elettromagnete sono isolati da fogli di carta U e V che permettono di utilizzare le due zone magnetiche P e Q come armature di un condensatore per la generazione di un campo elettrico uniforme, anch'esso verticale.

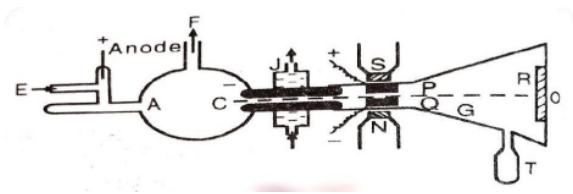


Fig. 4 a: schematizzazione dell'apparato sperimentale sfruttato da J. J. Thomson

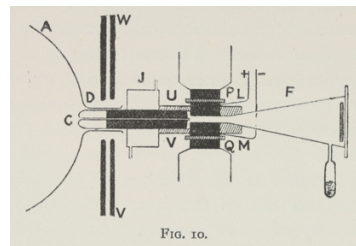


Fig. 4 b: dettaglio dell'apparato sperimentale

I campi elettrico e magnetico sono perpendicolari alla direzione di moto dei raggi canale e sono diretti rispettivamente verso il basso e verso l'alto [Fig. 5]. Dopo aver subito l'effetto dei campi, i raggi attraversano la regione F e vengono raccolti su uno schermo fluorescente o su una lastra rivestita da un'emulsione fotografica. Da queste prime osservazioni emerge chiaramente che il fascio dei raggi canale è costituito da particelle cariche.

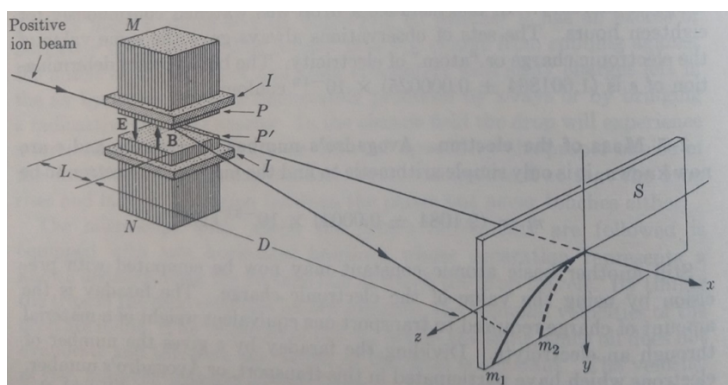


Fig. 5: effetto dei campi elettrico e magnetico sulla traiettoria dei raggi canale e parabole sullo schermo

L'effetto combinato dei campi determina per i raggi canali delle deviazioni che impressionano la lastra fotografica S con parabole che dipendono dalla massa delle particelle che costituiscono il fascio [Fig. 6].

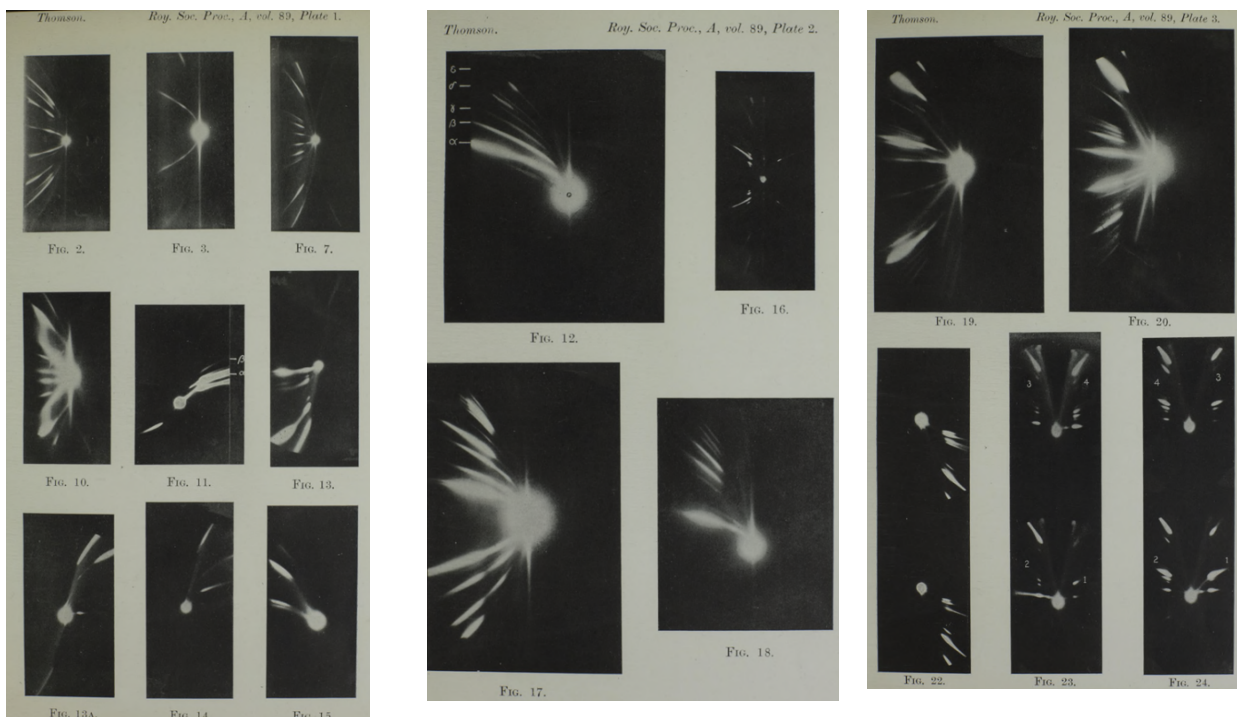


Fig. 6: immagini degli effetti dei raggi canale fotografati da J. J. Thomson e disposizione parabolica sulla lastra fotografica

Considerando come sistema di riferimento quello cartesiano xyz in Fig. 5, si consideri una particella di carica q e massa m entrante nella zona attraversata dai campi uniformi $\vec{E}$ e $\vec{B}$ con velocità iniziale di modulo v_x diretta lungo l'asse x . Dopo aver percorso il tratto L all'interno del condensatore in un intervallo di tempo $\tau = \frac{L}{v_x}$, per effetto del campo elettrico la particella avrà acquistato una velocità lungo l'asse y di modulo pari a $v_y = \frac{qEL}{mv_x}$. Nell'intervallo τ l'effetto del campo magnetico sulla particella è quello di una forza centripeta di intensità qv_xB , che fa acquisire una velocità lungo l'asse z di modulo pari a $v_z = \frac{qv_xBL}{mv_x} = \frac{qBL}{m}$.

Al di fuori della regione investita dai campi, il moto della particella sarà dato dalla composizione dei moti rettilinei uniformi lungo i tre assi. Dopo l'intervallo di tempo $\tau' = \frac{D}{v_x}$, necessario a coprire la distanza D che separa l'elettromagnete dallo schermo, le posizioni della particella nel sistema di riferimento xyz sul piano di equazione $x=0$, saranno:

$$y = \frac{qELD}{mv_x^2} \quad \text{e} \quad z = \frac{qBLD}{mv_x}$$

da cui è possibile ricavare l'equazione della parabola nel sistema di riferimento ortogonale yOz , che avrà la seguente forma:

$$z^2 = \frac{q}{m} \frac{B^2 LD}{E} y$$

Al variare della carica e della massa delle particelle si sarebbero ottenute così diverse parabole sullo schermo S . In effetti fu quello che venne osservato [Fig. 6].

La prima ipotesi che Thomson fece riguardò la carica. Ipotezzo che le particelle dovessero possedere la stessa carica degli elettroni e che l'ampiezza delle parabole era dovuta alla variazione di massa degli ioni. Nonostante le difficoltà imposte dall'esperimento, dovute in particolare alla debolezza del fascio, alla scarsa definizione delle parabole sullo schermo che risultavano scarsamente definite e agli effetti secondari di altri fasci, Thomson riuscì comunque a ricavare informazioni su diversi ioni. In particolare per l'idrogeno ottenne per il valore q/m il risultato atteso, calcolato dal rapporto tra la carica dell'elettrone e il peso atomico dell'idrogeno. Per la massa dello ione idrogeno, o protone, determinò un valore pari a $1836,13 \pm 0,01$ volte quella dell'elettrone.

Identificazione degli isotopi: lo spettrografo di Aston

Analizzando le parabole relative al neon, Thomson individuò quella generata dalle di peso atomico 20 ma anche un'altra, generata da particelle di peso atomico 22 [Fig. 7].

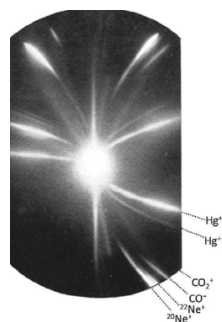


Fig. 7: le parabole fotografate da Thomson, si distinguono quelle relative al Neon

Non potendo essere spiegata attraverso l'elemento successivo della tavola periodica, il sodio di peso atomico 23, Thomson fece diverse ipotesi, che si rivelarono fallaci. Un suo studente, Francis William Aston (1877-1945), fece un'ipotesi che si rivelò corretta. L'idea di Aston fu di attribuire a un singolo elemento chimico diversi valori di massa. L'azoto, quindi, si poteva presentare in natura con lo stesso numero atomico, ma con masse atomiche diverse. Aston aveva individuato la presenza degli *isotopi* in un composto. Per verificare la validità della sua ipotesi, Aston fece uso di uno spettrografo di massa, che sfruttava le proprietà dei gas.

L'energia cinetica traslazionale media delle molecole di un gas monoatomico a una temperatura T è pari a $\frac{3}{2}kT$, dove k è la costante di Boltzmann. Se il gas è composto di atomi di massa diversa, i più leggeri acquisteranno velocità maggiore, i più pesanti velocità minori. In virtù di questa proprietà dei gas, Aston, confinò una quantità di Neon in forma gassosa in un contenitore, a cui era permesso di fuoriuscire attraverso dei setti porosi, per essere poi raccolto in un secondo contenitore. Le molecole più leggere, essendo più veloci, si sarebbero presentate più frequentemente nelle regioni dei setti e si sarebbero quindi diffuse maggiormente nel secondo contenitore rispetto a quelle più pesanti.

Nell'esperimento che Aston attuò e che richiedeva l'utilizzo di opportuni campi elettrici e magnetici per la separazione degli isotopi, le ipotesi furono tutte confermate: una maggiore quantità di azoto leggero si era diffusa nel secondo contenitore [Fig. 8]. Aston misurò anche le masse atomiche e ottenne per l'isotopo leggero un valore pari a 20,15, mentre per quello più pesante 20,28. La differenza tra i due valori era scarsa, ma metteva comunque in luce l'esistenza di due isotopi dell'azoto [3].

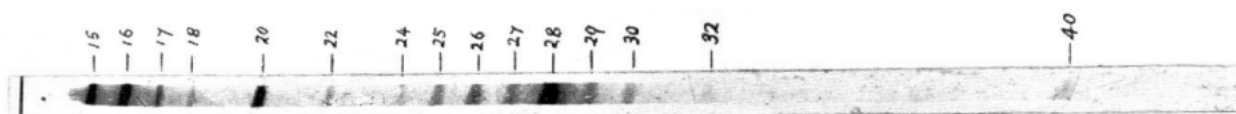


Fig. 8: tracce lasciate dagli isotopi in uno spettrografo di Aston. Si riconoscono l'azoto 20, l'azoto 22, mentre la traccia relativa al numero 28 è riconducibile al monossido di carbonio

Spettroscopia di massa: lo spettrometro di Bainbridge

Un perfezionamento dello spettrografo di Aston fu progettato e utilizzato dal fisico americano Kenneth Thompson Bainbridge (1904-1996), che diede avvio alla moderna spettrometria di massa, ancora oggi in uso in svariate applicazioni nucleari.

Il sistema di misura di Bainbridge [Fig. 9] è costituito da una sorgente di ioni che attraverso un sistema di fenditure S_1 e S_2 attraversano un selettore di velocità, costituito da un condensatore di carico di armature P_1 e P_2 generatore di un campo elettrico $\vec{E}$ uniforme accoppiato a un campo magnetico $\vec{B}$ uniforme ad esso ortogonale. In tale regione le forze elettriche e magnetiche agenti sul fascio sono equilibrate, ciò che permette solo agli ioni di velocità pari a $v = \frac{E}{B}$ di oltrepassare la zona investita dai due campi. Il fascio penetra poi in una zona attraversata da un secondo campo magnetico $\vec{B}'$ uniforme che lo devia lungo una traiettoria semicircolare di raggio R dipendente dalla massa m degli ioni del fascio, di valore pari a $R = \frac{mv}{qB'}$. Assumendo che gli ioni siano ionizzati allo stesso modo, appare evidente che il valore m della massa è proporzionale a quello del raggio R della traiettoria e può inoltre essere misurato con maggior accuratezza sfruttando la relazione $m = \frac{qB'R}{v}$.

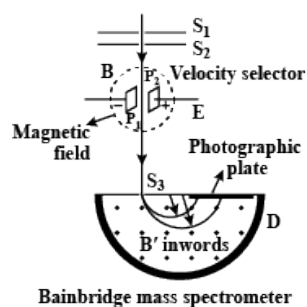


Fig. 9: schematizzazione dello spettrometro di Bainbridge

Dal punto di vista della raccolta dei dati, la sensibilità del sistema di Bainbridge, rispetto a quello di Aston, era nettamente migliore, anche per via di due fattori, il controllo dell'intensità del campo magnetico B' e l'ampia estensione della regione D in cui gli ioni potevano incurvare le loro traiettorie. I valori ottenuti per m a approssimati all'intero più vicino rappresentavano quelli dei pesi atomici degli isotopi componenti un fissato elemento. Con questo apparato vennero identificati gli isotopi del neon, quelli del germanio aventi numeri 70, 72, 73, 74 e 76 e una decina di isotopi dello stagno.

Pesi atomici e tavola periodica

La scoperta degli isotopi chiarì alcune criticità nella composizione della tavola periodica. I chimici, l'avevano compilata suddividendo gli elementi in righe e gruppi secondo le loro proprietà chimiche, e li avevano elencati in una sequenza secondo il peso atomico. Seguendo questi criteri, alcuni elementi che per il loro peso dovevano risultare successivi l'uno all'altro, dovevano per le loro proprietà chimiche subire un'inversione di posto nella tavola. Così, il cobalto di peso atomico 58,97 precede il nichel di peso atomico 58,68 e lo iodio di peso atomico 126,92 risulta successivo al tellurio di peso atomico 127,5, inserito nel gruppo del selenio per analogia di comportamento chimico [Fig. 10 a e b].

25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu
43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag
75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au
107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Uun	111 Uuu

Fig. 10 a: cobalto e nichel nella tavola periodica

5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn

Fig. 10 b: tellurio e iodio nella tavola periodica

L'isotopia permetteva quindi di giustificare le anomalie presenti nella tavola, che fu ordinata secondo il numero atomico degli elementi e non più secondo il peso, che risentiva in qualche caso anche significativamente della composizione isotopica e dell'abbondanza di isotopi pesanti.

Anche il riferimento elementare della massa, l'unità di massa atomica (u.m.a), venne ridefinito alla luce della scoperta dell'isotopia. Inizialmente individuata in un atomo di idrogeno, l'unità di massa atomica, venne presto ridefinita attraverso l'atomo di ossigeno, data la sua presenza in molte molecole. La composizione isotopica dell'ossigeno è data dall'ossigeno 16, 17 e 18. Per definire l'u.m.a. era quindi necessario riferirsi a uno solo di questi. Data la sua abbondanza, si scelse l'ossigeno 16 e in particolare si definì l'unità di massa atomica come 1/16 della massa dell'ossigeno 16.

Nel 1961 questa convenzione mutò ancora e attualmente l'u.m.a. è definita attraverso il carbonio 12 come:

$$1 \text{ u.m.a.} = \frac{1}{12} m({}^{12}_6\text{C})$$

Bibliografia

- [1] W. F. Magie, *A Source Book in Physics*, McGraw-Hill, New York, 1935
- [2] J. J. Thomson, *Rays of Positive Electricity*, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, vol. 89, 607, London, 1913
- [3] F. W. Aston, *Isotopes*, Edward Arnold & Co., London, 1922