

6 LA SCOPERTA DELL'ELETTRONE: J. J. THOMSON E R. A. MILLIKAN

La scoperta di Röntgen, i raggi X

La scoperta dei raggi X avvenne l'8 novembre 1895 per opera di Wilhelm Conrad Röntgen [1]. Il fisico tedesco era impegnato a studiare i raggi catodici, prodotti all'interno di un tubo a vuoto, sostanzialmente simile al un tubo di Crookes-Hittford. Questi erano utilizzati per lo studio dell'interazione tra elettricità e materia, svolti sfruttando i fenomeni di scarica nei gas rarefatti. Uno dei tubi era stato donato al fisico tedesco da Ivan Puluj, di origine ucraina. Da un'estremità del tubo emergeva il capo di un elettrodo, il catodo, negativo, mentre a metà del tubo quello dell'anodo, positivo [Fig. 1]. Con una pompa veniva praticato il vuoto per evitare la deviazione dei raggi catodici, causata dall'interazione con le molecole del gas. Le scariche elettriche nei gas rarefatti producevano infatti fenomeni di luminescenza che scomparivano in condizioni di vuoto spinto. I raggi catodici, invece, si generavano per via dell'applicazione di una tensione tra anodo e catodo. Quando la tensione assumeva valori elevati, all'interno del tubo si generava un bagliore dovuto ai raggi catodici.

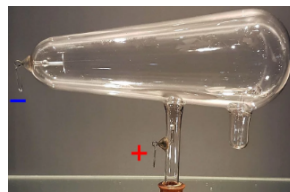


Fig.1: tubo a raggi catodici

Quello che osservò Röntgen fu un effetto inatteso. Oltre al bagliore generato dai raggi catodici, si accorse che una lastra rivestita di platinocianuro di bario fluorescente, posta nel laboratorio lontana dal tubo, si illuminava di una luce verde e che questa luce scompariva allo spegnimento del tubo. Il fenomeno era stato già osservato da Puluj. L'effetto perdurò anche quando Röntgen coprì il tubo con un cartone dipinto di nero. Anche la schermatura del tubo con altri materiali come la carta, il legno o la gomma non impediva l'insorgenza del fenomeno. Soltanto le ossa della mano della moglie Bertha e l'anello che portava [Fig. 2], lasciavano un'ombra sulle lastre dopo essere stati attraversati da quelli che Röntgen individuò da subito come raggi, anche se diversi dai raggi catodici che davano effetti solo all'interno del tubo. Questa distinzione fondamentale che Puluj non fu in grado di fare, fa di Röntgen il primo scopritore dei raggi X.



Fig.2: immagine radiografica della mano di Bertha Röntgen ottenuta tramite radiazione X

La natura dei raggi catodici: il primo esperimento di J. J. Thomson

Nel 1897 il direttore del Cavendish Laboratory dell'Università di Cambridge, Joseph John Thomson (1856-1940), pubblicò un articolo per fare piena luce sui raggi catodici [2] [Fig.3]. A differenza di Röntgen, Thomson era interessato a capire la natura e il comportamento dei raggi catodici. L'argomento aveva suscitato enorme interesse nella comunità dei fisici, che avevano formulato diverse teorie in proposito: "il quarto stato della materia" ipotizzato da Crookes, una teoria ondulatoria formulata da Wiedermann e Leder, "i raggi catodici come perturbazioni longitudinali dell'etere" [3]. La prima osservazione significativa che Thomson fece, riguardò la carica dei raggi catodici. Essendo deviati da un campo magnetico, i raggi mostravano di possedere una qualche carica e di non poter essere separati da questa. Attraverso un elettroscopio Thomson verificò che si trattava di una carica negativa molto elevata. Sottoposti a un campo elettrico, i raggi venivano deviati confermando l'ipotesi di Thomson che fossero costituiti da particelle e non da una pura radiazione. Variando la pressione del gas all'interno del tubo portandolo a una condizione di vuoto spinto, si rese conto che le deviazioni subite dai raggi catodi erano legate alle differenze di potenziale a cui erano sottoposti: all'aumentare della d.d.p., la deviazione dei raggi si faceva più accentuata. Contrariamente a quanto aveva osservato Heinrich Hertz, anche piccoli valori della d.d.p. generavano piccole deviazioni dei raggi, che Hertz non aveva ottenuto a causa della presenza di gas nel tubo. Questo infatti, a basse tensioni, si ionizzava e interagendo con i raggi catodici ne annullava la deviazione. Gli esperimenti di Thomson provarono invece che la traiettoria dei raggi catodici era indipendente dal tipo di gas che influiva sul loro moto solo per effetto delle cariche, a ulteriore prova che i raggi erano composti da particelle dotate di carica.

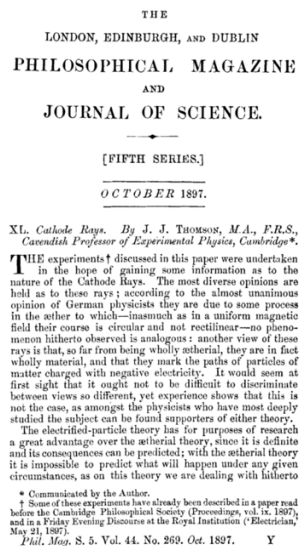


Fig.3: incipit dell'articolo di J. J. Thomson sui raggi catodici

Studiando il primo esperimento Thomson aveva escluso che le particelle costituenti i raggi catodici non potevano essere gli eventuali ioni del gas del tubo, sia perché le deviazioni erano presenti anche in condizione di vuoto spinto, sia perché la d.d.p. applicata agli ioni del gas li avrebbe portati ad assumere valori diversi di velocità e quindi diverse deviazioni nel campo magnetico, che in realtà non venivano misurate. Ciò permise a Thomson di concludere che le cariche provenivano solo dal catodo, in prossimità del quale potevano essere considerate in quiete, raggiungevano tutte approssimativamente la stessa velocità e per effetto del campo venivano deviate allo stesso modo.

Il rapporto e/m

Il problema da risolvere per J. J. Thomson era la natura delle particelle che costituivano i raggi catodici. Si chiedeva infatti se queste potessero essere atomi, molecole o qualcosa ancora di non conosciuto. Per ottenere informazioni sulla loro natura escogitò il famoso esperimento che porta il suo nome che, attraverso l'applicazione di campi elettrici e magnetici, gli permise di determinare il rapporto tra carica e massa delle particelle. Di seguito sono riportate le parole di J. J. Thomson:

"Dal momento che i raggi catodici trasportano una carica elettrica negativa, che sono deviati da una forza elettrostatica come se fossero negativamente carichi e che si comportano sotto l'effetto di una forza magnetica esattamente come se questa forza agisse su un corpo carico negativamente che si stesse muovendo lungo il cammino dei raggi, non trovo altra via d'uscita se non il concludere che essi sono cariche elettriche negative trasportate da particelle di materia. Sorge a questo punto un'altra domanda: che cosa sono queste particelle? sono atomi, o molecole, o materia in un ancor più fine stato di suddivisione? Per illuminare un poco le cose, ho fatto una serie di misure del rapporto tra la massa di queste particelle e la carica da esse trasportata. Per determinare questa quantità, ho utilizzato due metodi differenti."

Indicate con m la massa della singola particella, con q la sua carica e con v il modulo della velocità, è sufficiente analizzarne il moto in un campo magnetico uniforme $\vec{B}$, ortogonale alla direzione del vettore $\vec{v}$, per ottenere il valore del rapporto q/m . All'interno del campo magnetico la particella si muove di moto circolare per cui si può scrivere:

$$qvB = m \frac{v^2}{r} \quad (1)$$

e per la legge della conservazione dell'energia meccanica vale:

$$q\Delta V = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

dove ΔV è la d.d.p. a cui la carica è sottoposta. Dividendo membro a membro le equazioni (1) e (2) si ottiene:

$$v = \frac{2\Delta V}{rB}$$

Una volta noto il valore della velocità v sarebbe stato immediato determinare il rapporto q/m da una delle due equazioni.

Il secondo esperimento di Thomson

La valutazione della d.d.p. ΔV non era peraltro semplice: il rocchetto a induzione che la generava infatti forniva un valore instabile, di difficile misurazione. Per questo Thomson optò per un'altra soluzione. Al fine di valutare l'espressione $q\Delta V$ presente nell'equazione (2), escogitò un esperimento di tipo calorimetrico. L'apparato sperimentale era identico a quello del primo esperimento, l'unica differenza consisteva nel bersaglio sul quale le cariche si accumulavano. Questo era costituito da una lamina metallica che si scaldava per effetto dell'urto e la valutazione della variazione di temperatura, permetteva di valutare l'energia $q\Delta V$ dissipata nell'urto. Inserendo questo valore nelle equazioni (1) e (2), si può così ricavare il valore del rapporto q/m . Tale metodo fornì a Thomson i

migliori risultati per la determinazione di tale rapporto. Fu questo l'esperimento che ne fornì il valore più prossimo a quello tuttora conosciuto.

Il terzo esperimento di Thomson e l'ipotesi dell'elettrone

In Fig. 4 è riportato l'apparato sperimentale del terzo esperimento di Thomson, in cui si evidenzia nel tubo a raggi catodici la presenza del campo elettrico $\vec{E}$, generato da un condensatore piano di lunghezza l e dello schermo posto a distanza D dal condensatore.

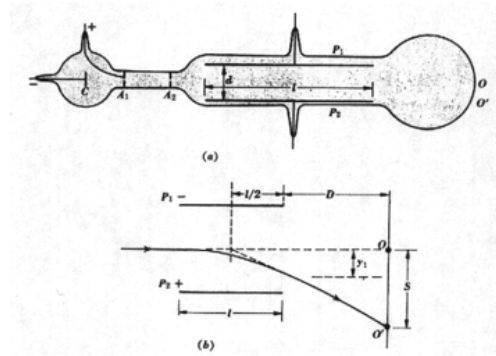


Fig.4: schematizzazione del terzo esperimento di Thomson e rappresentazione della traiettoria dei raggi catodici

All'interno del condensatore il fascio catodico subisce una deflessione per effetto elettrostatico, per poi muoversi di moto rettilineo uniforme appena fuoriesce dalla zona attraversata dal campo elettrico e raggiunge lo schermo. La deflessione totale s sullo schermo calcolata rispetto al punto che colpirebbe il fascio in assenza di campo si deduce facilmente dalle leggi della dinamica e vale:

$$s = \frac{qEL}{mv^2} \left(\frac{1}{2}L + D \right)$$

dalla quale è possibile ricavare il valore q/m . Accoppiando un campo elettrico uniforme $\vec{E}$ e un campo magnetico uniforme $\vec{B}$ tra loro ortogonali, in modo che il fascio non venisse deviato, dalla condizione di equilibrio $q\vec{E} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$ Thomson determinò il valore della velocità del fascio $v = \frac{E}{B}$. L'accorgimento non fu perciò utilizzato come selettore di velocità, in quanto le particelle del fascio fuoriuscivano dal catodo approssimativamente nello stesso stato prossimo alla quiete.

Thomson ripeté l'esperimento variando il catodo (alluminio, platino, ferro), in presenza di diversi gas residui nel tubo (idrogeno, biossido di carbonio) e misurò un valore del rapporto q/m dell'ordine di 10^{11} Ckg^{-1} . E lo confrontò con i valori molto più bassi ricavati per l'idrogeno grazie agli esperimenti di elettrolisi nell'acqua, in cui 96500 Coulomb di carica liberavano un grammo di idrogeno al catodo e otto grammi di ossigeno all'anodo. A Thomson apparve subito evidente che la particella che stava studiando doveva possedere una massa molto più piccola dell'idrogeno e quindi in generale degli atomi, essendo l'idrogeno il meno massiccio, oppure una carica molto più elevata. Tra le due ipotesi la prima lo convinse maggiormente, anche perché era a conoscenza dei risultati ottenuti dal fisico tedesco Philippe von Lenard, che aveva mostrato che in aria i raggi catodici possono percorrere in aria tratti di qualche centimetro, prima di essere frenati. L'elettrone era così stato identificato.

La ricerca attorno ai raggi catodici e il dibattito scientifico alla fine del XIX secolo avevano coinvolto l'intera comunità scientifica e se oggi la scoperta della natura dei raggi catodici e dell'elettrone viene attribuita a J. J. Thomson, questo è dovuto al fatto che le sue sperimentazioni diedero risposte inequivocabili al problema, anche se il fisico britannico fece ampio uso di conoscenze che altri prima

di lui avevano ricavato. Per dare traccia della complessità del quadro in cui si pone l'attività di Thomson, si riporta di seguito uno stralcio tratto da un testo di Emilio Segré [4]:

La disputa sulla natura dei raggi catodici.

Che cosa erano? Sembrava viaggiassero in linea retta e una croce metallica interposta tra il catodo e l'anodo del tubo proiettava la sua ombra. Forse erano deviati da un campo magnetico, per quanto le opinioni in materia differissero a causa del pessimo vuoto con cui si facevano gli esperimenti. Forse erano corpuscoli proiettati dal catodo. Stranamente le opinioni erano divise a seconda della nazionalità: Hertz aveva detto nel 1883 che i raggi catodici non erano particelle, ma una radiazione di qualche nuova specie. G. H. Wiedemann (1832 - 1919), E. Goldstein (1850 - 1930) e tutti i tedeschi fecero coro. In Inghilterra invece W. Crookes (1832 - 1919) andava sostenendo che fossero particelle cariche elettricamente e tutti gli inglesi fecero coro. Lord Kelvin, J. J. Thomson e altri sentenziarono: particelle cariche. La ragione dell'incertezza è ora chiara. Crookes scrive in un lavoro di aver ottenuto un vuoto straordinariamente buono. Questo vuoto corrispondeva ad una pressione di 40 millesimi di millimetro di mercurio, un vuoto incredibilmente cattivo (e Dio sa poi come Crookes lo misurava). Con vuoti così cattivi tutti i fenomeni si complicano immensamente per la presenza di effetti secondari e diventano di difficilissima interpretazione. In ogni modo J. J. Thomson e Crookes seguirono ad investigare i raggi catodici, finché Jean Perrin in Francia nel 1895 fece il passo decisivo. Essendo riuscito finalmente a ottenere un vuoto adeguato poté raccogliere i raggi in una gabbia di Faraday e dimostrare che trasportavano una carica. Mostrò anche che potevano essere deflessi da un campo magnetico e, guidati da esso, potevano essere condotti dentro o fuori della gabbia di Faraday. Il nome di elettrone era già stato coniato da G. Johnstone Stoney nel 1894 e si aveva l'idea che negli atomi ci fossero delle cariche elettriche che con il loro moto producevano la luce. Anche altri fenomeni si spiegavano bene assumendo cariche elettriche elementari più o meno puntiformi, ma le idee in proposito erano certo vaghe, quando improvvisamente nel 1896 si fece un importante progresso. Esso era dovuto a Pieter Zeeman, un giovane allora sconosciuto, che scoprì un nuovo fenomeno e al già famoso H. A. Lorentz che ne dette subito l'interpretazione teorica. [...] Lorentz e Zeeman determinarono e/m , la carica specifica, e il suo segno negativo. [...] Indipendentemente J. J. Thomson, a Cambridge, in una serie di classiche esperienze nel 1897 misurò il rapporto tra la carica e la massa dell'elettrone libero.

L'esperimento di Millikan

Le informazioni sull'elettrone furono completate nel 1909 quando Robert Millikan (1868-1953) terminò l'esperimento che porta il suo nome [Fig. 5] e riassunte nell'articolo per la Physical Review [5].

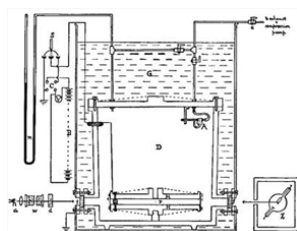


Fig.5: apparato sperimentale riportato nell'articolo di R. Millikan

L'apparato sperimentale utilizzato è schematizzato in Fig. 6.

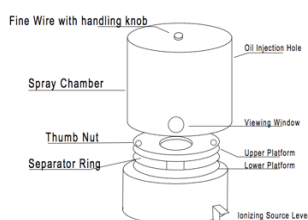


Fig.5: schematizzazione dell'apparato sperimentale

Piccole gocce d'olio vengono spruzzate all'interno di una camera cilindrica le cui basi orizzontali sono costituite da due armature di un condensatore, caricato dall'esterno da un generatore di tensione continua fornito di un invertitore di polarità. Il processo di iniezione delle gocce comporta una ionizzazione variabile da goccia a goccia e all'interno del condensatore ogni goccia subisce la forza gravitazionale, la spinta archimedeica, la forza elettrostatica e la forza di attrito viscoso. L'effetto cinematico viene misurato da un oculare da cui è possibile osservare il moto di ogni singola goccia e misurarne le posizioni su uno schermo graduato e retroilluminato.

In assenza di potenziale, la risultante delle forze agenti su una goccia d'olio approssimata a una sfera si riduce al peso, alla spinta di Archimede e alla forza di Stokes il cui effetto è un moto accelerato che dopo un tempo relativamente breve porta la velocità della goccia a un valore stazionario v_∞ . Vale quindi la relazione:

$$mg - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{aria} g = 6\pi r \eta v_\infty \quad (1)$$

dove m e r sono rispettivamente la massa e il raggio della goccia, ρ_{aria} e η la densità e il coefficiente di viscosità dell'aria.

L'azione di un campo elettrico uniforme $\vec{E}$ generato dalla d.d.p. ΔV applicata alle armature del condensatore accelera verso l'alto le gocce ionizzate negativamente che, frenate dalla forza di attrito viscoso concorde col peso, raggiungono una velocità di regime v_E in accordo con l'equazione:

$$qE - mg + \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{aria} g = 6\pi r \eta v_E \quad (2)$$

dove q è la quantità di carica distribuita sulla goccia d'olio.

Assumendo che d sia la distanza tra le facce del condensatore, dalle equazioni (1) e (2) si ricava:

$$q = \frac{6\pi r \eta d}{\Delta V} (v_E + v_\infty) \quad (3)$$

Un'eventuale variazione di carica Δq per una goccia d'olio fissata sottoposta a una d.d.p. ΔV costante comporterebbe una variazione di velocità Δv_E . In questo caso si avrebbe che $\Delta q = \frac{6\pi r \eta d}{\Delta V} \Delta v_E$.

Misurando i valori di Δv_E si ottengono valori multipli di un valore minimo, il che permette di affermare che anche la variazione di carica Δq è multipla di un valore fondamentale. In questo modo si prova che la carica è una grandezza fisica quantizzata.

Nell'equazione (3) tutte le grandezze sono note, salvo il raggio r della goccia. Per determinarlo, è sufficiente sostituire nell'equazione (1) al valore della massa m l'espressione $m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{olio}$ e ricavare il valore di v_∞ che risulta così pari a:

$$v_\infty = \frac{2gr^2}{9\eta} (\rho_{olio} - \rho_{aria})$$

da cui si ricava il valore di r :

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v_\infty}{2g\rho_{olio}}} \quad (4)$$

dove si è trascurato il valore della densità dell'aria, molto piccolo rispetto a quello della densità dell'olio. Risulta ora immediato ricavare il valore della carica q in funzione di grandezze note o misurabili:

$$q = \frac{6\pi d}{\Delta V} \sqrt{\frac{9\eta^3}{2g\rho_{olio}}} (v_E + v_\infty) \sqrt{v_\infty} \quad (5)$$

Nell'espressione (4) Millikan introdusse un termine correttivo, che giustificava la dipendenza del valore della carica q dalla dimensione della goccia e dalla pressione dell'aria. L'equazione (5) nella sua forma definitiva è quindi:

$$q = \frac{6\pi d}{\Delta V} \sqrt{\frac{9\eta^3}{2g\rho_{olio}}} \left(1 + \frac{b}{pr}\right)^{-\frac{3}{2}} (v_E + v_\infty) \sqrt{v_\infty}$$

dove è un termine costante pari a $b = 6,17 \cdot 10^{-6}$, mentre p è la pressione atmosferica espressa in cm di mercurio.

Nella seguente tabella [Tab.1] sono riportati i risultati ottenuti presso l'University College di Dublino, relativi alla misura della carica fondamentale. Il valore comunemente accettato per la carica fondamentale è pari a $e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$ C.

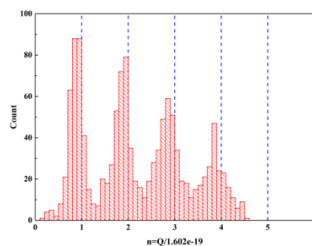
Drop #	Number Readings	Rise Time [s]	Fall Time [s]	Drop radius [μm]	Charge [10^{-19} C]	e^{-1} charges
1	30	11.23 $\pm$ 0.15	13.92 $\pm$ 0.01	0.56 $\pm$ 0.02	1.723 $\pm$ 0.06	1.01 $\pm$ 0.03
2	15	15.53 $\pm$ 0.66	32.01 $\pm$ 1.03	0.49 $\pm$ 0.04	3.3 $\pm$ 0.5	2.13 $\pm$ 0.21

Tab. 1: risultati dell'esperimento per la misura della carica fondamentale (Drop 1 ionizzazione singola, Drop 2 ionizzazione doppia)

Con lo stesso apparato sperimentale è possibile sfruttare un metodo alternativo per la misura della carica fondamentale. Questo consiste dapprima nel selezionare una singola goccia di olio e nel valutare la sua velocità di regime in assenza di campo elettrico, seguendo lo stesso procedimento utilizzato nella metodologia precedente. In una seconda fase, si applica ai capi delle armature una d.d.p. che determini per la stessa goccia di olio identificata una condizione di equilibrio. In questo caso, se si trascura la spinta archimedeo, l'equilibrio è determinato dall'uguaglianza del peso e della forza elettrostatica e vale perciò:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{aria} g = \frac{q \Delta V}{d}$$

Conoscendo il valore del raggio della goccia ottenuto tramite l'equazione (4), è possibile ricavare quello della carica q . Una rappresentazione della frequenza dei valori ottenuti per q in funzione del valore della carica fondamentale [Fig. 6] permette di mostrare la quantizzazione della carica.



sFig. 6: dati relativi ai conteggi ottenuti in un esperimento di Millikan:
in ordinata il numero di conteggi relativi a un dato valore di carica,
in ascissa il valore della carica normalizzato a quello della carica fondamentale

Dalla Fig. 6 è evidente che la carica distribuita sulle gocce analizzate è multiplo di quella fondamentale e che il valore minimo è in corrispondenza di $1,6022 \cdot 10^{-19}$ C.

Bibliografia

- [1] O. Glasser, *Wihlelm Röntgen and the Early History of the Röntgen Rays*, Norman Publishing, San Francisco, 1993
- [2] J. J. Thomson, S. A. E. Johansson, *XL. Catode Rays*, "Philosophical Magazine Series", 5, 44, n. 269, 1897
- [3] H. Abraham, P. Langevin, *Ions, électrons, corpuscules*, Gauthiers-Villars, Paris, 1905
- [4] E. Segré, *Personaggi e scoperte della fisica contemporanea*, Mondadori, Milano, 1996
- [5] R. A. Millikan, *On the elementary electrical charge and the Avogadro constant*, Physical Review, vol. II, n. 2, 1913