NADIA ROBOTTI (*)

# Dai raggi catodici alla scoperta dell'elettrone (**)

**Abstract** — This paper describes the development of studies into electrical discharges in rarefied gases in the second half of the nineteenth century leading up to the identification of a first sub-atomic particle in 1897 — the electron.

The first part of the paper focuses on the first studies into discharges in gases, with particular reference to the identification and characterisation of so-called «cathode rays».

This is followed by an analysis of the debate surrounding these new «rays» from 1870. There were two distinct theories based in two distinct empirical contexts. In the «undulatory theory», «cathode rays» were considered «waves of ether», while the «materialistic theory» considered them particles of matter (atoms or molecules).

The paper then goes on to show that the debate did not end with the victory of one theory over another as a result of a specific experiment, but with the development of a third or «corpuscular» theory, which drew in part on the «undulatory theory» and in part on the «materialistic theory» and identified in «cathode rays» the first «elementary» particle — the electron.

Una delle tante questioni irrisolte che la Fisica nella seconda metà dell'Ottocento si trovava ad affrontare era costituita da quello che J.J. Thomson aveva definito «il segreto dell'elettricità»: ovvero quale fosse la natura dell'elettricità e che legame intercorresse tra elettricità e materia.

Per risolvere questo problema, una delle vie intraprese fu quella di studiare il comportamento di un gas rarefatto in presenza di una scarica elettrica. La motivazione per una tale scelta era duplice: da un lato, questo tipo di studi consentiva di analizzare l'interazione tra elettricità e materia nel caso in cui questa si trovava nello stato evidentemente più semplice; dall'altro lato, lo stato gassoso era l'unico stato per cui esisteva allora una teoria abbastanza consolidata (la teoria cinetica) alla quale eventualmente fare riferimento.

(*) Dipartimento di Fisica, Università di Genova, Via Dodecaneso 33, 16146 Genova. E-mail: robotti@fisica.unige.it

(**) Relazione presentata al Convegno su «J.J. Thomson e la scoperta dell'elettrone», C.N.R. «Sala Marconi», Roma, 4 dicembre 1997.

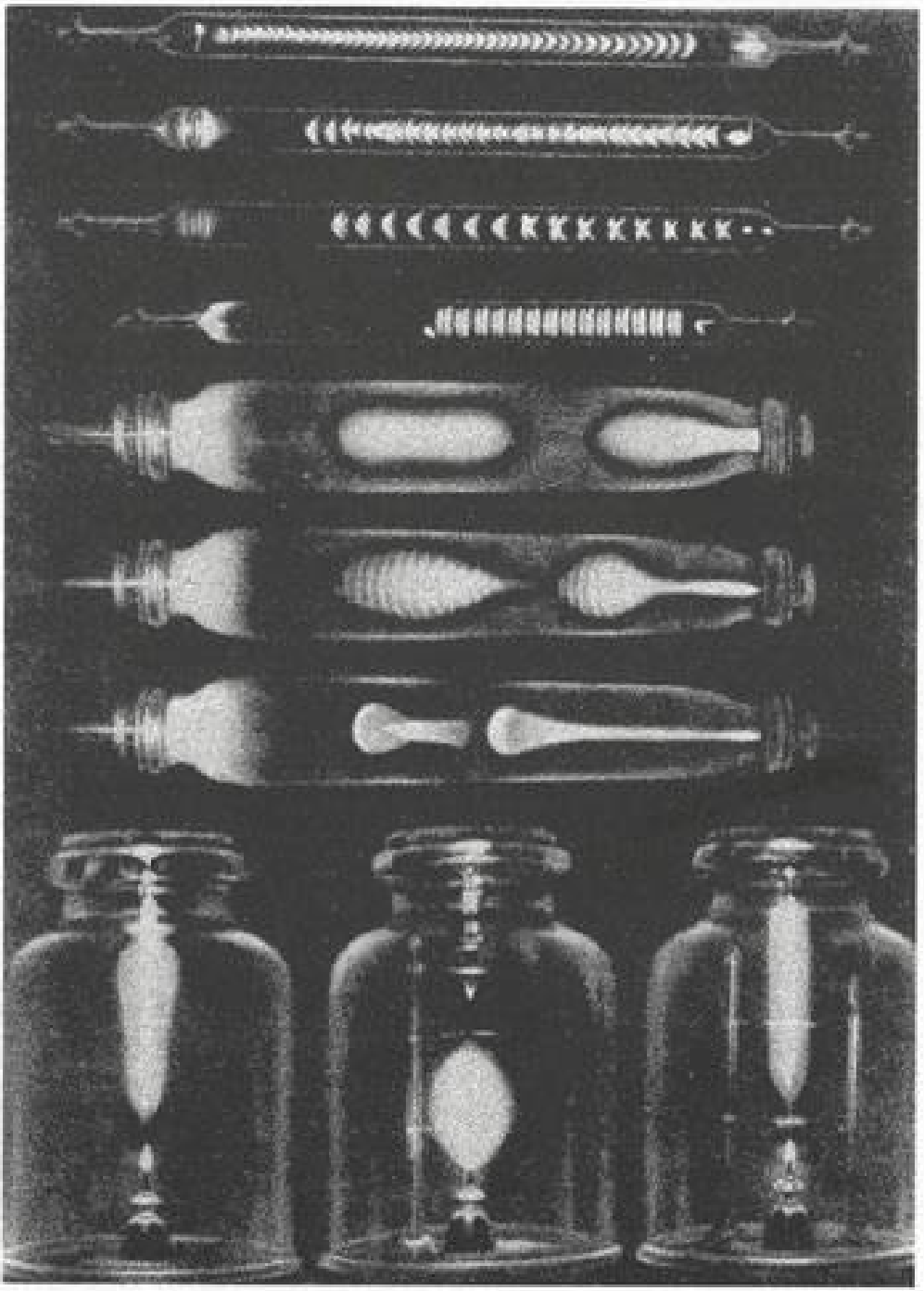


Fig. 1. Fenomeni di scarica nei gas rarefatti [De La Rue, Muller, 1880].

Comunque progressi in questo tipo di studi si poterono ottenere solo dopo che, intorno al 1855, grazie soprattutto a Geissler, venne introdotta una nuova tecnologia nella costruzione delle pompe a vuoto che consentiva di raggiungere pressioni dell'ordine di $10^{-2} \div 10^{-3}$ mmHg.

Lavorando a queste pressioni, ci si accorse che mentre le varie zone nel gas si comportavano in modo diverso a seconda della natura del gas, del tipo di elettrodi, dalla forma del tubo, etc. (si veda la figura 1, tratta dalla rivista scientifica *Philosophical Transactions* del 1880 [1], in cui sono mostrati alcuni fenomeni di scarica per pressioni intorno a $10^{-2}$ mmHg.) vicino al catodo era sempre presente una zona scura, indipendentemente dalle condizioni in cui si operava.

Questa zona scura, che era stata già segnalata da Faraday nel 1838 [2], all'aumentare del vuoto cresceva solo di dimensioni, fino a che per pressioni dell'ordine dei $10^{-3}$ mmHg si estendeva per tutto il tubo, diventando l'unico fenomeno presente.

Una volta identificata questa «*zona buia*» come la costante dei processi di scarica, su di essa venne focalizzata l'attenzione, con l'obiettivo di determinarne le proprietà.

A partire dal 1860, grazie soprattutto alle ricerche di M. Plucker, di E. Goldstein, di W. Crookes e di C.F. Varley, si riuscì a stabilire che la «*zona buia*» era la zona di transito di «*something*», proveniente dal catodo, il quale risultava invisibile fino a quando non incontrava un ostacolo, dopo di che «*si manifestava con effetti percettibili*».

In particolare questo «*something*» aveva le seguenti proprietà, indipendentemente dal materiale che costituiva il catodo e dal tipo di gas utilizzato:

— veniva emesso perpendicolarmente al catodo e viaggiava in linea retta;
— produceva reazioni chimiche;
— provocava fluorescenza e fosforescenza;
— provocava un'ombra di qualsiasi oggetto posto sul suo percorso;
— veniva deflesso da un campo magnetico;
— esercitava effetti meccanici.

I dispositivi con i quali si riuscì a stabilire alcune di queste proprietà sono riportati nelle seguenti figure.

La figura 2 si riferisce ai fenomeni di fosforescenza.

Un oggetto fosforescente posto di fronte al catodo si illuminava di un colore dipendente dal materiale fosforescente [3]. Questa proprietà era molto importante poiché veniva usata per stabilire il percorso di questo «*something*»: bastava introdurre, obliquamente all'interno del tubo, una lastra di mica cosparsa di materiale fosforescente e guardare la traccia fosforescente lasciata.

La figura 3 si riferisce invece alla proprietà di produrre un'ombra [4].

Interponendo tra il catodo (a) e la parete del tubo una croce di mica, sulla parete fosforescente del tubo compariva, scura, l'ombra della croce.

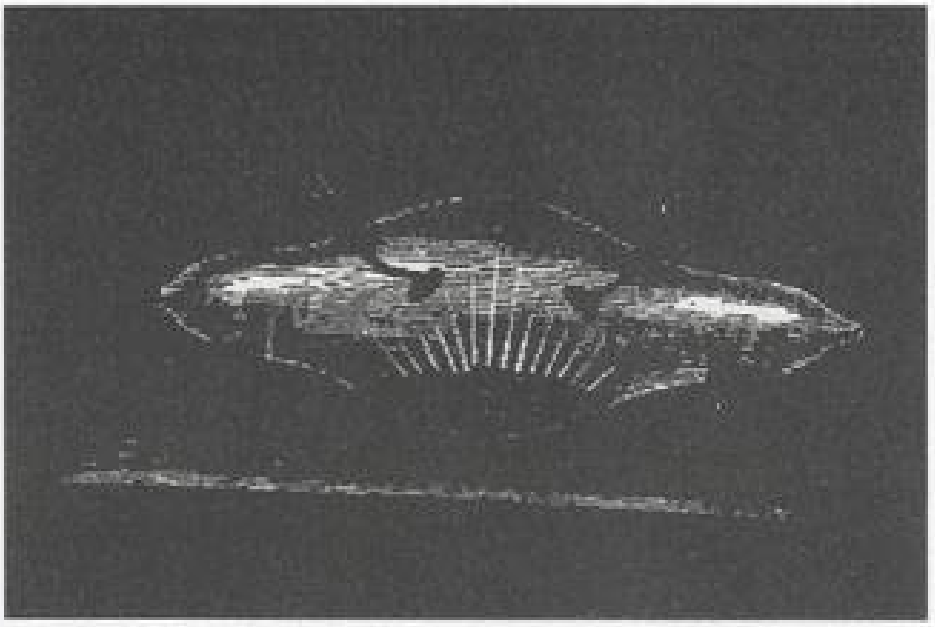


Fig. 2. Fenomeni di fosforescenza [Goldstein, 1877].

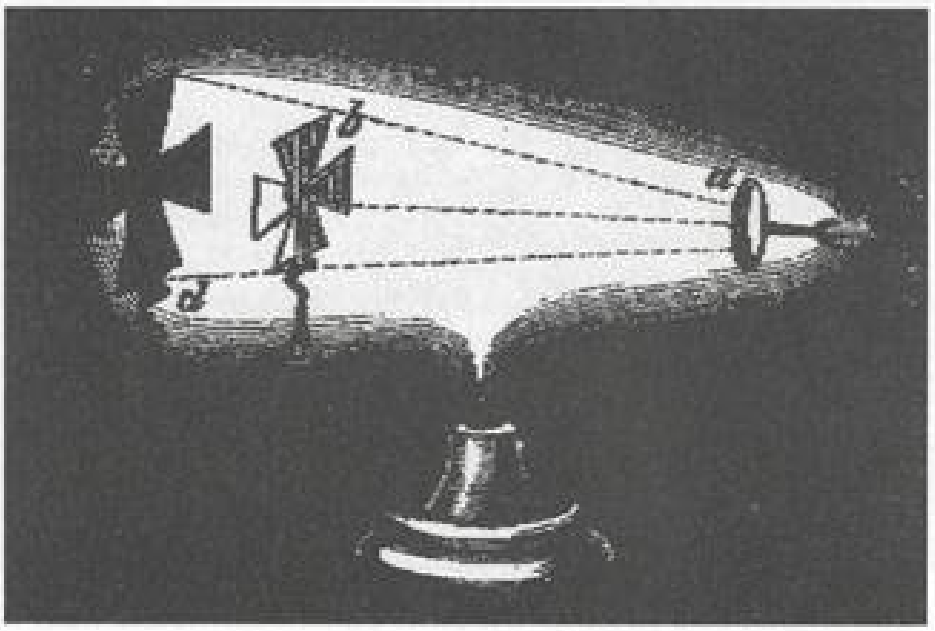


Fig. 3. Fenomeni ottici [Crookes, 1880].

La figura 4 riguarda la deflessione in campo magnetico [5]: se il tubo di scarica veniva posto tra i poli di un elettromagnete, la traiettoria di questo «*something*», che in assenza di campo era rettilinea tra i due elettrodi posti agli estremi del tubo, diventava curva. Le due figure si riferiscono rispettivamente al caso in cui l'elettrodo a sinistra era l'anodo oppure il catodo.

L'apparecchiatura mostrata in figura 5 riguarda, infine, le proprietà meccaniche [6]. Un mulinello era montato all'interno del tubo a vuoto. Quando si azionava la scarica, le pale del mulinello si mettevano in moto nello stesso verso in cui si sarebbero messe in moto se fossero state esposte ad un bombardamento proveniente dal catodo.

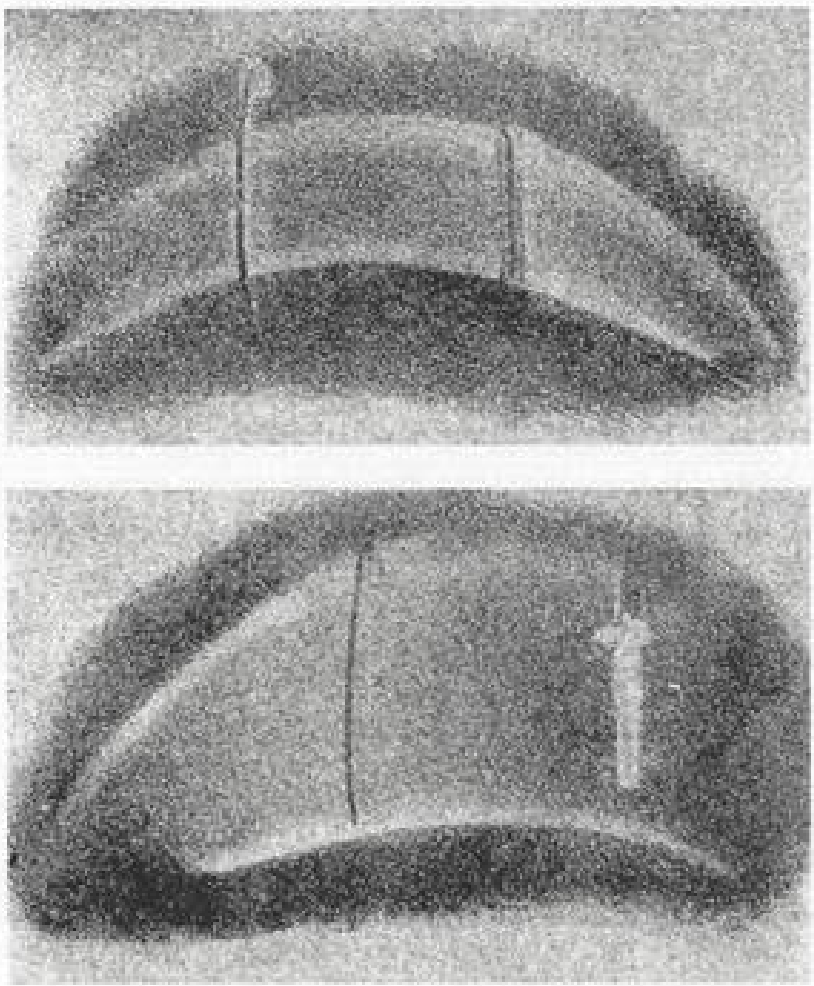


Fig. 4. Deflessione in campo magnetico [Varley, 1870].

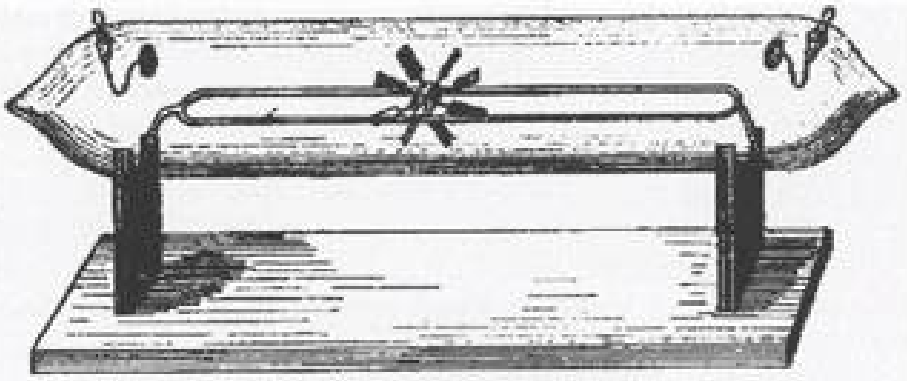


Fig. 5. Effetti meccanici [Crookes, 1875].

Per quanto riguarda la natura di questo *«something»*, a partire dal 1870, si assistette all'emergere di due ipotesi contrapposte [7]. Da un lato vi era la così detta *«teoria ondulatoria»*, sostenuta prevalentemente dai fisici di scuola tedesca, la quale considerava il fenomeno come un moto vibratorio nell'etere, una sorta di onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda molto corta, emesse perpendicolarmente al catodo. Di qui il termine *«raggi catodici»* per indicare questo *«qualcosa»* proveniente dal catodo. Dall'altro lato vi era la così detta *«teoria materialistica»*, sostenuta prevalentemente dai fisici di scuola inglese e francese, la quale considerava il fenomeno come dovuto a particelle materiali, ovvero a molecole o a atomi carichi negativamente (il segno meno veniva stabilito dal verso della deflessione in campo magnetico) che provenivano dal gas per scissione delle molecole, tramite un processo del tipo di quello elettrolitico.

Tra queste due teorie si instaurò immediatamente un rapporto conflittuale, che venne giocato essenzialmente sul piano sperimentale, nel senso che ogni esperimento progettato e realizzato per caratterizzare le proprietà dei «raggi catodici» veniva caricato, da chi lo proponeva, del potere di discriminare tra queste due ipotesi teoriche. Non ostante questa pretesa, posta come premessa alla realizzazione di ciascun esperimento effettuato, nessun esperimento, preso singolarmente, ebbe la forza di chiudere il dibattito tra queste due ipotesi. Tale dibattito, infatti, proseguì fino al 1897 e proseguì proprio sul piano sperimentale.

Se si analizza l'andamento temporale delle basi empiriche delle due teorie, dal momento in cui sono state proposte fino al 1897, si può osservare che prima del 1897 esisteva un insieme di dati sperimentali interpretabili da entrambe le teorie (ad esempio gli effetti meccanici, gli effetti termici, la proprietà di provocare un'ombra, ecc.) ed alcuni dati interpretati da una teoria e non dall'altra e viceversa, senza che esistesse una prevalenza netta di dati spiegati da una teoria rispetto a quelli spiegati dall'altra, ossia entrambe le teorie risultavano parzialmente verificate.

Nella seguente tabella (Tabella 1) ho cercato di schematizzare la situazione relativa alle basi empiriche delle due teorie rispettivamente dal 1870 al 1891, tra il 1891 e il 1897 e infine nel 1897. Quell'insieme di dati sperimentali spiegati da entrambe le teorie è indicato con un asterisco. Chiaramente i dati sperimentali spiegati da una teoria (e non dall'altra) rappresentavano dati anomali per la teoria contrapposta: essi comunque facevano parte delle basi empiriche di entrambe le teorie, o come fatti comprovanti o come fatti anomali e sono stati contrassegnati con $a_m$ se anomalie della «teoria materialistica», oppure con $a_o$ se anomalie della «teoria ondulatoria».

Come si può osservare, fino al 1897, le basi empiriche delle due teorie risultavano *«qualitativamente equivalenti»*, nel senso che entrambe le teorie, seppur parzialmente, risultavano verificate. È interessante osservare lo spostamento di dati empirici relativi ad una stessa proprietà da una teoria all'altra (ad esempio il dato sul trasporto di carica che, nel giro di vent'anni, viene capovolto, passando da «nessun trasporto di carica» [8] a «trasporto di carica negativa» [9], oppure il dato sulla deflessione in campi elettrici deboli che si trasforma, passando da «nessuna deflessione» [10] a «deflessione» [11]) il che, a posteriori, mostra come sia facile fare un esperimento il cui risultato sia affetto da un

TABELLA 1

| *Teoria "ondulatoria"* | *Teoria "materialistica"* |
|---|---|
| **1870-1891** [*] | |
| Fluorescenza, fosforescenza ($a_m$) | Deflessione campo magnetico ($a_o$) |
| Non deflessione campo elettrico | Repulsione fasci paralleli ($a_o$) |
| Non trasporto di carica | |
| **1891-1897** [*] | |
| Fluorescenza, fosforescenza ($a_m$) | Deflessione campo magnetico ($a_o$) |
| Non deflessione campo elettrico ($a_m$) | Repulsione fasci paralleli ($a_o$) |
| Passaggio spessori inattraversabili da atomi ($a_m$) | Trasporto di carica negativa ($a_o$) |
| **1897** [*] | |
| Fluorescenza, fosforescenza ($a_m$) | Deflessione campo magnetico ($a_o$) |
| Passaggio spessori inattraversabili da atomi ($a_m$) | Repulsione fasci paralleli ($a_o$) |
| | Trasporto di carica negativa ($a_o$) |
| | Deflessione campo elettrico ($a_o$) |

errore sistematico in seguito identificato. A questa caratteristica dei dati sperimentali, presi singolarmente, di poter essere affetti da un errore sistematico fu fatto costantemente appello sia dai sostenitori della *«teoria ondulatoria»*, sia da quelli della *«teoria materialistica»*, per tollerare all'interno delle rispettive teorie quei dati che sembravano anomali: di fronte a tali dati anomali, infatti, veniva fatto riferimento a un qualche fenomeno non ancora noto, che aveva funzionato come sorgente di errori sistematici e che, quindi, aveva inficiato tali dati.

Nel 1897 la situazione all'interno delle basi empiriche delle due teorie cambia. Il bilancio diventa nettamente a favore della *«teoria materialistica»*, nel senso che le previsioni della *«teoria materialistica»*, prese globalmente, risultavano *«meglio controllate»*. Osservava J.J. Thomson:

*«Dal momento che i raggi catodici sono deflessi da un campo elettrico, sono deflessi da un campo magnetico, trasportano una carica negativa, non si può sfuggire alla conclusione che sono particelle di materia cariche negativamente»* [12].

A questo punto un nuovo problema sorgeva. Come si chiedeva Thomson:

*«Che cosa sono queste particelle? Sono atomi, o molecole, oppure materia in uno stato di suddivisione ancora più fine?»* [13].

Per rispondere, la via intrapresa da Thomson fu quella di determinarne il rapporto massa/carica utilizzando due metodi sperimentali diversi.

Il primo metodo sfruttava la deflessione dei «raggi catodici» sia in campo elettrico che in campo magnetico. L'apparato usato è mostrato in figura 6. Un campo magnetico $B$ (di valore fissato) era applicato perpendicolarmente al percorso dei «raggi», mentre un campo elettrico $F$ (variabile) veniva posto tra le lastre $D$ ed $E$. Il valore di $F$ veniva variato fino ad un valore $F_0$, in corrispondenza del quale i «raggi» tornavano alla loro posizione indeflessa: Calcolando, in queste condizioni, la velocità $v$ dei «raggi», essa risultava:

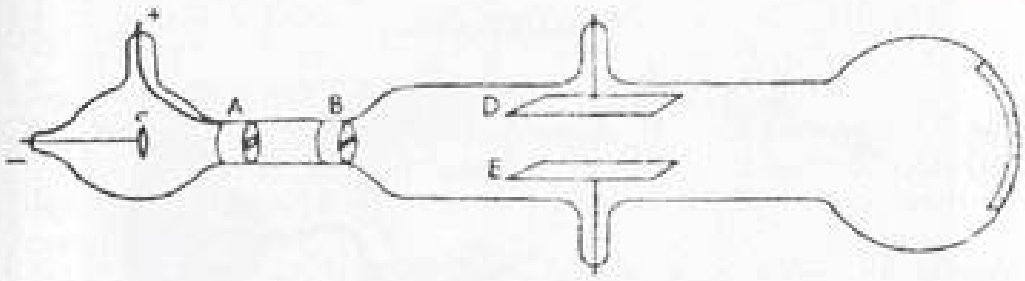
$$v = F_0 / B \qquad (1)$$

A questo punto il campo elettrico veniva rimosso e si procedeva a misurare il raggio di curvatura $R$ della nuova traiettoria assunta dai «raggi». In queste condizioni, attraverso un facile calcolo e utilizzando la (1), Thomson riusciva a ricavare per il rapporto massa/carica un'espressione che conteneva solo grandezze misurabili, ossia:

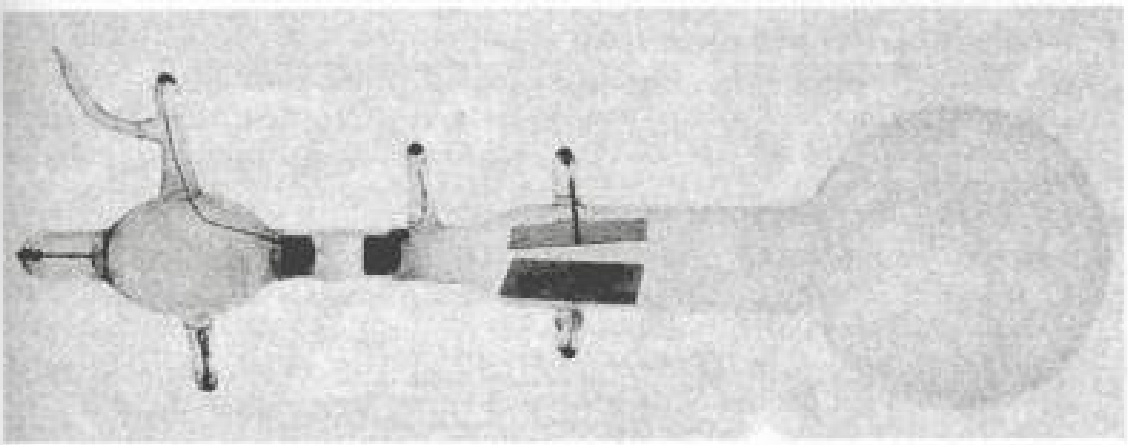
$$m/e = R\ B^2 / F_0$$

Nel secondo metodo Thomson utilizzava solo la deflessione in campo magnetico e sfruttava il fatto che tutta l'energia cinetica dei «raggi» ($W$) potesse essere trasformata in calore e quindi facilmente misurabile (ad esempio usando una termocoppia di capacità termica nota).

Il dispositivo usato da Thomson è mostrato in figura 7. I raggi catodici venivano deflessi da un campo magnetico $B$ in modo da entrare in un cilindro

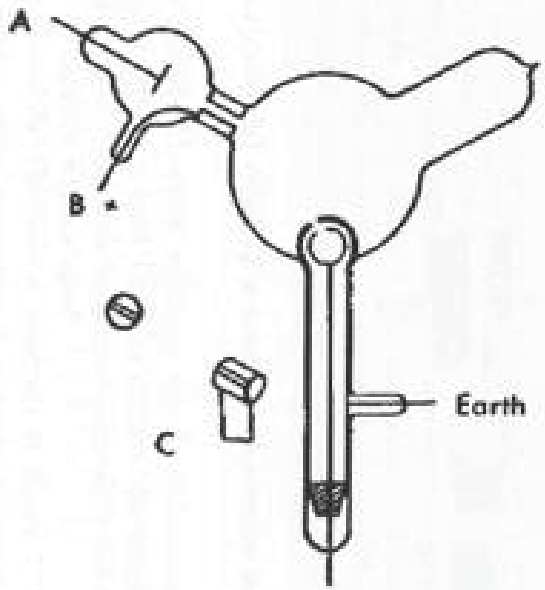



Dispositivo progettato da J.J. Thomson per la misura di $m/e$.

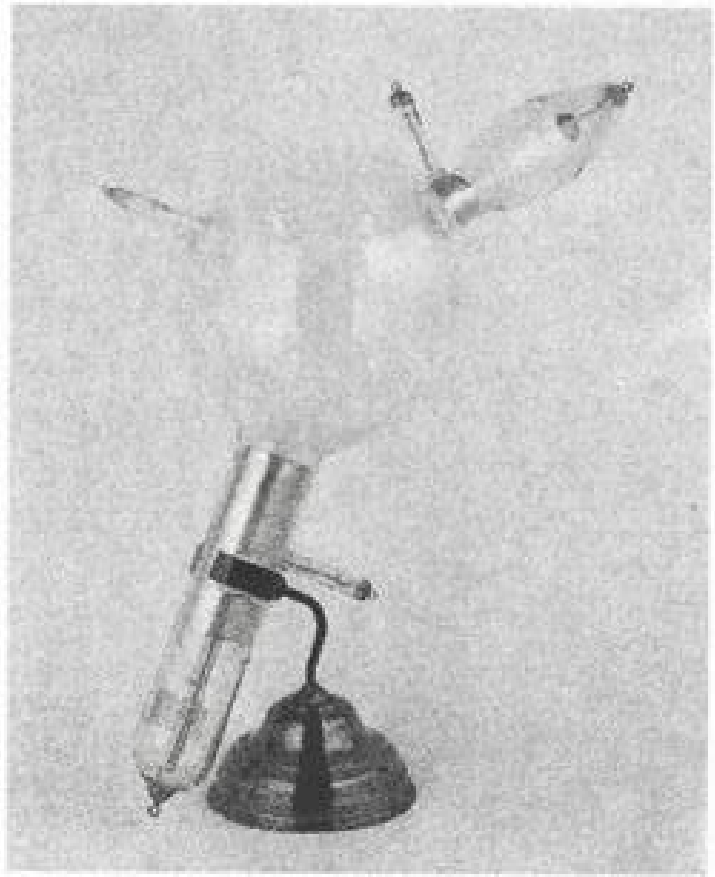


Tubo originale utilizzato da J.J. Thomson (Cavendish Laboratory, Cambridge).

Fig. 6




Dispositivo progettato da J.J. Thomson per la misura di *m/e*.



Copia del Tubo utilizzato Da J.J. Thomson (Museo del Dipartimento di Fisica, Genova).

Fig. 7

di Faraday e venivano fatti urtare contro la giunzione di una termocoppia, posta sull'imboccatura del cilindro più interno. Indicata con $Q$ la carica che passava attraverso una sezione del fascio nell'unità di tempo e $W$ l'energia cinetica ad esso associata (convertibile in calore) il rapporto m/e risultava essere:

$$m/e = R\,B^2\,Q\,/\,2W,$$

ovvero funzione di grandezze tutte misurabili.

Attraverso questi due metodi sperimentali, Thomson otteneva per il rapporto *m/e* un valore pari a $10^{-7}$ gr/u.e.m. Nella tabella 2 (terza colonna) [14] sono riportati i valori di *m/e* ricavati da Thomson usando tre tubi diversi del tipo di figura 7.

Come si può osservare il valore di *m/e* risultava indipendente dal materiale del catodo, dal tipo di gas e dalla pressione utilizzata e, come sottolineava Thomson, risultava molto piccolo rispetto al valore $10^{-4}$ gr/u.e.m. che rappresentava il valore più piccolo fino ad allora noto per uno ione, e che corrispondeva al valore dello ione idrogeno.

Comunque, quest'ultimo risultato, di per se stesso, senza cioè una determinazione separata della massa o della carica, non dava molte informazioni. Esso, infatti, poteva essere interpretato in modi diversi: avanzando l'ipotesi che la massa di queste nuove particelle, che componevano i «raggi catodici», fosse molto piccola rispetto alla massa dello ione idrogeno, oppure avanzando l'ipotesi che fosse molto grande la loro carica, oppure con entrambe le ipotesi.

Una scelta tra queste alternative, secondo Thomson, era però possibile, proprio grazie agli esperimenti di Lenard [15] del 1894 (riportate nell'ultima riga della Tabella 1) sull'assorbimento dei «raggi catodici», e che rappresentavano un'anomalia per la *«teoria materialistica»*.

Come osservava Thomson, le misure di Lenard sull'assorbimento dei *«raggi catodici»* in aria a una pressione di 0.5 Atm, una volta accettata l'ipotesi che i *«raggi catodici»* erano particelle, mostravano che il libero cammino medio di queste particelle risultava pari a 0.5 cm, mentre nelle stesse condizioni, il libero cammino medio delle molecole d'aria si sapeva essere pari a $2\ 10^{-5}$ cm, ossia *«di un ordine completamente diverso»*.

Di conseguenza, secondo Thomson, bisognava riconoscere che *«le particelle che compongono i raggi catodici sono molto più piccole delle molecole ordinarie»* [16].

Dal momento poi che il loro rapporto massa/carica era costante, indipendentemente dai materiali usati e dalla pressione, Thomson giungeva alla conclusione non solo che l'atomo era una struttura complessa, fatta di *«parti uguali»* (ipotesi per altro già adottata in Chimica da Prout, da Dumas, da Marignac, e da altri ancora), ma che i *«raggi catodici»* rappresentavano una di queste *«parti»* che ha lasciato l'atomo.

A questo componente atomico di carica negativa (che diventerà poi il

TABELLA 2 — *Risultati sperimentali di J.J. Thomson* (Phil. Mag. 1897).

| Gas | Value of $W/Q$ | $I$ | $m/e$ | $v$ |
|---|---|---|---|---|
| **Tube 1** | | | | |
| Air | $4.6 \times 10^{11}$ | 230 | $0.57 \times 10^{-7}$ | $4 \times 10^{9}$ |
| Air | $1.8 \times 10^{12}$ | 350 | $0.34 \times 10^{-7}$ | $1 \times 10^{10}$ |
| Air | $6.1 \times 10^{11}$ | 230 | $0.43 \times 10^{-7}$ | $5.4 \times 10^{9}$ |
| Air | $2.5 \times 10^{12}$ | 400 | $0.32 \times 10^{-7}$ | $1.2 \times 10^{10}$ |
| Air | $5.5 \times 10^{11}$ | 230 | $0.48 \times 10^{-7}$ | $4.8 \times 10^{9}$ |
| Air | $1 \times 10^{12}$ | 285 | $0.4 \times 10^{-7}$ | $7 \times 10^{9}$ |
| Air | $1 \times 10^{12}$ | 285 | $0.4 \times 10^{-7}$ | $7 \times 10^{9}$ |
| Hydrogen | $6 \times 10^{12}$ | 205 | $0.35 \times 10^{-7}$ | $6 \times 10^{9}$ |
| Hydrogen | $2.1 \times 10^{12}$ | 460 | $0.5 \times 10^{-7}$ | $9.2 \times 10^{9}$ |
| Carbonic acid | $8.4 \times 10^{11}$ | 260 | $0.4 \times 10^{-7}$ | $7.5 \times 10^{9}$ |
| Carbonic acid | $1.47 \times 10^{12}$ | 340 | $0.4 \times 10^{-7}$ | $8.5 \times 10^{9}$ |
| Carbonic acid | $3 \times 10^{12}$ | 480 | $0.39 \times 10^{-7}$ | $1.3 \times 10^{10}$ |
| **Tube 2** | | | | |
| Air | $2.8 \times 10^{11}$ | 175 | $0.53 \times 10^{-7}$ | $3.3 \times 10^{9}$ |
| Air | $4.4 \times 10^{11}$ | 195 | $0.47 \times 10^{-7}$ | $4.1 \times 10^{9}$ |
| Air | $3.5 \times 10^{11}$ | 181 | $0.47 \times 10^{-7}$ | $3.8 \times 10^{9}$ |
| Hydrogen | $2.8 \times 10^{11}$ | 175 | $0.53 \times 10^{-7}$ | $3.3 \times 10^{9}$ |
| Air | $2.5 \times 10^{11}$ | 160 | $0.51 \times 10^{-7}$ | $3.1 \times 10^{9}$ |
| Carbonic acid | $2 \times 10^{11}$ | 148 | $0.54 \times 10^{-7}$ | $2.5 \times 10^{9}$ |
| Air | $1.8 \times 10^{11}$ | 151 | $0.63 \times 10^{-7}$ | $2.3 \times 10^{9}$ |
| Hydrogen | $2.8 \times 10^{11}$ | 175 | $0.53 \times 10^{-7}$ | $3.3 \times 10^{9}$ |
| Hydrogen | $4.4 \times 10^{11}$ | 201 | $0.46 \times 10^{-7}$ | $4.4 \times 10^{9}$ |
| Air | $2.5 \times 10^{11}$ | 176 | $0.61 \times 10^{-7}$ | $2.8 \times 10^{9}$ |
| Air | $4.2 \times 10^{11}$ | 200 | $0.48 \times 10^{-7}$ | $4.1 \times 10^{9}$ |
| **Tube 3** | | | | |
| Air | $2.5 \times 10^{11}$ | 220 | $0.9 \times 10^{-7}$ | $2.4 \times 10^{9}$ |
| Air | $3.5 \times 10^{11}$ | 225 | $0.7 \times 10^{-7}$ | $3.2 \times 10^{9}$ |
| Hydrogen | $3 \times 10^{11}$ | 230 | $1.0 \times 10^{-7}$ | $2.5 \times 10^{9}$ |

nostro *elettrone*) Thomson dava il nome di *«corpuscolo»*, chiudendo così il dibattito tra la teoria *«ondulatoria»* e la teoria *«materialistica»*:

*«Noi troviamo nei raggi catodici un nuovo stato della materia, uno stato in cui tutta la materia — cioè materia derivata da sorgenti diverse, quali idrogeno, ossigeno, etc. — è di un unico tipo, essendo questa materia la sostanza che compone tutti gli elementi chimici. (...) Se nel campo molto intenso presente nei dintorni del catodo, le molecole vengono scisse non nei comuni atomi chimici, ma in questi atomi primordiali, che per brevità chiameremo corpuscoli e se questi corpuscoli sono carichi negativamente così che vengono proiettati dal campo elettrico lontano dal catodo, essi dovrebbero avere un valore del rapporto massa/carica che è indipendente dalla natura e dalla pressione del gas, come di fatto si è dimostrato»* [17].

A questo punto restava aperto ancora un problema. Dal momento che i *«corpuscoli»* erano particelle sub-atomiche, e quindi più piccole dell'atomo d'idrogeno, *«quanto più piccole dell'atomo di idrogeno»* erano?

Per rispondere, a partire dal 1897 Thomson si impegnava su un programma di ricerca volto alla realizzazione di una misura di carica, specifica per il *«corpuscolo»*.

Questa operazione, tuttavia, si rivelerà molto complessa e potrà essere realizzata, grazie alle competenze acquisite al Cavendish Laboratory nel campo delle scariche nei gas [18], soltanto nel 1899 [19].

Attraverso questa via, Thomson otteneva per la carica del *corpuscolo* un valore pari a $2.3\ 10^{-20}$ u.e.m.; mentre per la massa (sostituendo questo valore nel rapporto massa/carica) ricavava un valore pari a $\approx 10^{-27}$ gr, ossia $\approx 10^{-3}$ volte la massa dello ione idrogeno. In questo modo, Thomson riusciva a confermare l'ipotesi del 1897 [20] e, come scriveva a Rutherford in una lettera del giugno 1899, ad ottenere «una prova diretta dell'esistenza di masse pari soltanto a 1/1000 della massa dello ione idrogeno.

Ulteriori conferme dell'esistenza del *«corpuscolo»* giunsero ben presto da altri settori di ricerca, in particolare dalla spettroscopia e dall'elettrodinamica, favorendo così la generale accettazione di un atomo strutturato e divisibile.

La scoperta di un primo costituente atomico di carica negativa ebbe ripercussioni immediate e aprì nuove prospettive di ricerca: in particolare, l'elettrone venne subito identificato come la grandezza fondamentale con cui esprimere tutti i fenomeni elettrici e magnetici; le proprietà della materia apparvero di colpo riconducibili al diverso numero e alla diversa distribuzione degli elettroni all'interno degli atomi chimici e l'atomo stesso apparve contenere qualcosa in più, oltre gli elettroni, qualcosa di positivo che ne garantisse la neutralità elettrica. Tutte queste prospettive di ricerca, una volta avviate, andarono a contribuire alla nascita di quella che viene ora chiamata Fisica Contemporanea.

## BIBLIOGRAFIA


[1] W. De La Rue, H.W. Muller, «Experimental researches on the electric discharge with the chloride of silver battery», *Philosophical Transactions*, *171* (1880), 65-116.

[2] M. Faraday, «Experimental researches in electricity», *Philosophical Transaction of the Royal Society*, *128* (1838), 125.

[3] E. Goldstein, «On the electric discharge in rarefied gases», *Philosophical Magazine*, *110* (1880).

[4] W. Crookes, «On the illumination of lines of molecular pressure and the trajectory of molecules», *Philosophical Transactions*, *170* (1879).

[5] C.F. Varley, «Some experiments on the discharge of electricity through rarefied media», *Proceedings of the Royal Society*, *19* (1871).

[6] W. Crookes, *op. cit.* nota [4].

[7] Sull'argomento si veda ad esempio: N. Robotti, «La scoperta dei raggi catodici e la determinazione del rapporto carica/massa dell'elettrone», *Lezioni Galileane IV. Dagli atomi di elettricità alle particelle atomiche*, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma, 1994; N. Robotti, «The discovery of the electron», *European Journal of Physics*, *17* (1997); D.L. Anderson, *The discovery of the electron*, (Princeton, 1964), Van Nostrand Momentum Book.; E.T. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, Second Edition, Dover, (New York, 1989); I. Falconer, «Corpuscles, electrons and cathode rays: J.J. Thomson and the discovery of the electron», *British Journal for the History of Science*, *20* (1987), 241-276; G.E. Owen, «The discovery of the electron», *Annals of Science*, *11* (1956), 172-182; A. Pais, *Inward Bound*, (Oxford University Press, New York, 1986); S.M. Fisher, «Arthur Schuster, J.J. Thomson and the "Discovery of the Electron"», *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, *20*, pt. 1 (1990), 33-61; M. Chayut, «J.J. Thomson: the Discovery of the Electron and the Chemistry», *Annals of Science*, *48* (1991), 527-544; D.J. Price, «Sir J.J. Thomson, O.M.F.R.S.», *Nuovo Cimento*, *4* (1956), Supplement, *1609-29*.

[8] H. Hertz, «Experiments on the cathode discharge», *Miscellaneous Papers*, (MacMillan, 1896), translated from *Annalen der Physik*, *19* (1883), 782-816.

[9] J. Perrin, «Nouvelles propriétes des rayons cathodiques», *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, *121* (1895), 1130-1135.

[10] H. Hertz, *op. cit.* nota [8].

[11] J.J. Thomson, «Cathode Rays», *Philosophical Magazine*, *44* (1897), 293-316.

[12] J.J. Thomson, «Cathode Rays», *The Electrician*, *37* (1897), 104-111.

[13] J.J. Thomson, *op. cit.* nota [11].

[14] J.J. Thomson, *op. cit.* nota [11].

[15] P. Lenard, «Ueber Kathoden Strahlen in Gasen von Atmospharischem Druck und im Aussersten Vacuum» *Annalen der Physik*, *51* (1894), 225-267.

[16] J.J. Thomson, *op. cit.* nota [11].

[17] J.J. Thomson, *op. cit.* nota [11].

[18] Su questo argomento si veda: N. Robotti, «J.J. Thomson at the Cavendish Laboratory: the history of an electric charge measurement», *Annals of Science*, *52* (1995).

[19] J.J. Thomson, «Uber die Masse der Trager der negativen Elektrisierung in Gasen von niederen Drucken», *Physikalische Zeitschrift*, *1* (1899), 20-22; «On the existence of masses smaller than the atoms», *Report of the Sixty-ninth meeting of the British Association for the Advancement of the Science*, Dover, (September 1899), idem *Philosophical Magazine*, *48* (1899), 547-567.

[20] J.J. Thomson to E. Rutherford, 23 July 1899 (E. Rutherford Correspondence, Cambridge University Library, Cambridge).