

FRANCESCO SERAFINI *

Importanza storica e possibile impiego didattico del tubo di J.J. Thomson **

Historical importance and possible educational use of J.J. Thomson's tube.

Summary – We would like to highlight the cultural value of the Cathode Ray Tube in the history of science, not only from a simple historical point of view, but above all for understanding conceptual and epistemological changes due to related scientific discoveries.

A better knowledge of these discoveries could help in grounding scientific knowledge of the beginning of the 20th century, a still actual background for several curricula of study.

To a student, at the beginning of his studies in atomic structure or electromagnetism, historical research could offer a knowledge about experimental results that validate a theoretical model instead of another one.

Besides, the simple knowledge about the existence of different theories, as for the nature of cathode rays, and the experimental reasons why a theory has been considered more suitable than another one, can increase and widen the cultural background of students, improving their comprehension of the subject.

It would be even better if students could see with their own eyes the scientific evolution and its theories and historical experiments. For this reason we have studied also the project, realisation and possible didactic application of an original cathode ray tube, copying models realised at the end of the 19th century.

Experiments made with this cathode ray tube, tend to run over again experimental phases that led to the discovery of the electron.

This research can be considered as an example of how relevant historical experiments with particular didactical importance can be easily communicate, contributing in this way to a didactic of sciences that starts from observations and discussions of explanatory models and reaches a shared formalisation of natural phenomena.

* Università degli Studi di Bologna.

** Relazione presentata al IX Convegno Nazionale di «Storia e Fondamenti della Chimica» (Modena, 25-27 ottobre 2001). Lavoro di Tesi di Laurea in Fisica di Serafini F.: *Importanza storica e possibile impiego culturale del tubo di J.J. Thomson*, Corso di Laurea in Fisica, Università degli Studi di Bologna (a.a. 1999/2000). Relatori G. Dragoni, A. Castaldini.

1. INTRODUZIONE

Ci sembra importante sottolineare il valore culturale che il tubo catodico ha avuto nella storia delle scienze, non solo per un puro interesse storico, ma soprattutto per capire i cambiamenti concettuali ed epistemologici che sono avvenuti, grazie alle scoperte scientifiche ad esso collegate.

Ciò aiuterebbe, a nostro avviso, a fondare meglio le basi della conoscenza della Fisica dell'inizio del ventesimo secolo, Fisica ancora attuale in diversi curriculum di studi.

A volte nel percorso di uno studente può capitare di accettare concetti epistemologici inconsapevolmente. Per esempio, rimanendo nell'ambito del presente lavoro, l'esistenza dell'elettrone, e la natura particellare dell'elettricità, possono essere apprese dagli studenti, come un fatto plausibile e non in modo adeguatamente significativo. Questo può succedere per una non sufficiente conoscenza di fatti sperimentali per avvalorare o mettere in discussione queste teorie.

Proprio la ricerca storica potrebbe dare, ad uno studente che si appresta allo studio della struttura atomica o allo studio dell'elettromagnetismo, la conoscenza di fatti sperimentali che avvalorano un modello teorico piuttosto che un altro. Anche la semplice conoscenza dell'esistenza di diverse teorie interpretative, come nel caso della natura dei raggi catodici, e la conoscenza dei motivi sperimentali per i quali una teoria è stata considerata una modellizzazione migliore di un'altra, può accrescere e approfondire il bagaglio culturale dello studente, aiutandolo in una migliore comprensione della Fisica. Naturalmente ancora meglio sarebbe se lo studente potesse «vedere con i propri occhi» l'evoluzione della Fisica, ripercorrendo teorie ed esperimenti storici (intendendo per esperimenti storici quegli esperimenti ormai «superati» ma che conservano una loro potenzialità interpretativa di determinati fenomeni, concetti, leggi e teorie). Questi esperimenti magari adattati didatticamente alle possibilità e agli interessi dello studente, possono metterlo in condizioni di poter meglio comprendere l'evoluzione di importanti passaggi culturali in campi specifici della Fisica, come quelli qui trattati. Per questo nel presente lavoro abbiamo studiato anche la progettazione, la realizzazione e il possibile impiego didattico di un tubo a raggi catodici, ricalcante i modelli costruiti alla fine del diciannovesimo secolo.

Quest'indirizzo di ricerca s'inserisce in un programma di lavoro da anni perseguito dal professor G. Dragoni del dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Bologna e responsabile del relativo museo, in cui si tende ad evidenziare le connessioni tra storia e insegnamento della fisica, sostenendo le possibilità culturali e didattiche offerte da alcuni importanti esperimenti storici e, soprattutto, le valenze educative insite nella replica di tali esperimenti (talora con la ripetizione di misure quantitative stesse) o nella riproduzione di importanti e famosi modelli didattico-sperimentali del passato.

2. NASCITA E SVILUPPO DEL TUBO A RAGGI CATODICI

Per meglio sviluppare l'argomento di fondo del nostro articolo sarà bene inquadrare storicamente i principali episodi che hanno caratterizzato la nascita e lo sviluppo delle teorie sui raggi catodici.

La scarica d'elettricità attraverso i gas è un fenomeno conosciuto fin dal diciottesimo secolo. L'apparecchiatura solitamente usata, per questi esperimenti, è un tubo di vetro riempito d'aria o altri gas e contenente due elettrodi: uno positivo ed uno negativo, cui è collegato un generatore di tensione. Il generatore di alto potenziale solitamente usato era una macchina elettrostatica a strofinio o un rocchetto di Ruhmkorff alimentato a batterie. Riducendo la pressione dell'aria nel tubo e connettendo la sorgente di alto potenziale agli elettrodi, la scarica elettrica luminosa si presenta in varie forme.

Uno dei primi a studiare questi spettacolari effetti fu Benjamin Franklin (1706-1790) che, nel 1752, attribuì al lampo luminoso, la natura di scarica elettrica, cioè di un passaggio di fluido elettrico attraverso l'aria. Altri precedentemente avevano notato questi strani effetti anche per pressioni interne al tubo minori di quell'atmosfera. È il caso di Francis Hauksbee (1666-1713) che nel 1706 osservò fenomeni di scarica con una pressione di un sessantesimo di atmosfera, e quella del fisico e naturalista William Watson (1715-1787) che nel 1748 descrisse come «arco di fiamma lambente» la scarica in un tubo in cui la pressione era di qualche decina di millimetri di mercurio.

Il punto di svolta nelle ricerche fu l'invenzione nel 1855, della pompa da vuoto a colonna di mercurio da parte di Johann Heinrich Geissler (1815-1879). Quest'invenzione permise di abbassare la pressione interna al tubo di scarica fino a qualche millesimo di millimetro di mercurio. Ciò rese possibile nel 1859 un'importante scoperta di Julius Plücker (1801-1868): riducendo la pressione approssimativamente a 0.001 millimetri di mercurio, si nota che il vetro opposto all'elettrodo negativo (catodo), indipendentemente dalla posizione dell'anodo, assume una fluorescenza verdastra che cambia posizione sotto l'azione di un campo magnetico. Plücker attribuì quest'effetto a parti di metallo catodico emesse dal catodo stesso e quindi di natura diversa da quella della solita scarica elettrica. Questa deduzione gli venne dall'osservazione del fatto che dopo un certo periodo di funzionamento si ha una deposizione di atomi del materiale di cui è costituito il catodo sulle pareti interne del tubo (fenomeno oggi noto con il nome di spruzzamento catodico). Uno studente di Plücker, Johann Wilhelm Hittorf (1824-1914), scoprì nel 1869 che se un corpo solido è posto tra il catodo e la parete opposta del tubo si crea un'ombra (nella fluorescenza) di forma simile a quella dell'ostacolo. Hittorf concluse che i raggi sono emessi in linea retta.

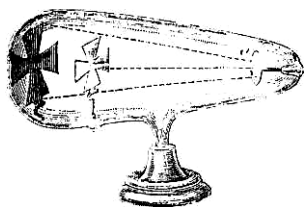


Fig. 1. Tubo con croce di Malta per evidenziare il moto rettilineo dei raggi catodici.

Una serie di esperimenti fatti da Eugen Goldstein (1850-1930) nel 1871, su differenti tipi di catodi, mostrarono che i raggi catodici: a) escono perpendicolarmente alla superficie del catodo; b) danno gli stessi effetti con catodi di platino, oro o altro materiale; c) causano reazioni chimiche. Questi raggi furono denominati nel 1876 dallo stesso Goldstein come raggi catodici.

Nello stesso anno Cromwell Varley (1828-1883), propose una descrizione dei raggi come un torrente di particelle cariche negativamente ed emesse dal catodo perpendicolarmente alla sua superficie.

Nel 1879 il fisico inglese William Crookes (1832-1919), sulla spinta dello stesso Varley condusse nuovi esperimenti sull'azione meccanica e termica con diversi tubi a raggi catodici, tra i quali quello con mulinello rotante per evidenziare gli effetti meccanici dei raggi catodici.

Augusto Righi (1850-1920) studiò questi effetti meccanici riducendoli in gran parte ad un effetto dovuto al riscaldamento del gas residuo, da parte dei raggi catodici, cioè ad un effetto simile a quello presente nel radiometro di Crookes, fenomeno che, peraltro, Righi contribuì a chiarire.

Tale ricerca è riportata in una memoria del fisico bolognese del 1907 [bib. FP11], dove è illustrato un semplice esperimento che consiste nell'inclinare il tubo così da fermare la rotellina, togliere la tensione di alimentazione e riportare diritto il tubo; così si nota che la rotellina continua a girare anche se non sono più presenti raggi catodici, chiara dimostrazione della natura termodinamica dell'effetto. Anche con un semplice calcolo dinamico si può far vedere che il momento meccanico trasferito dai raggi, che attualmente sappiamo costituiti da elettroni, non è sufficiente a mettere in moto la rotellina di Crookes.

Crookes dai suoi esperimenti concluse che i raggi catodici erano molecole del gas contenuto nel tubo che acquistavano carica negativa all'urto con il catodo. Queste nuove proprietà della materia furono attribuite, rifacendosi a tesi già sostenute da Faraday, ad una materia in uno stato ultra gassoso dove le collisioni tra molecole sono eventi così rari da poter essere trascurati. Crookes definì questo stato come «quarto stato della materia». Secondo questa teoria, a causa della carica negativa acquistata, le molecole sono fortemente respinte dal catodo acquistando una grande velocità nella direzione perpendicolare al catodo e, urtando il vetro opposto, producono fluorescenza. Questa teoria, basata sulle «molecole cariche», poteva spiegare molti degli effetti conosciuti sui raggi catodici, ma dovette essere

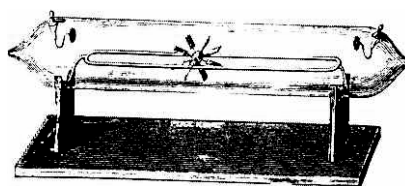


Fig. 2. Tubo di Crookes con rotellina per evidenziare il presunto trasporto di quantità di moto dei raggi catodici.

abbandonata perché incompatibile con la stima del libero cammino medio delle molecole; infatti, il libero cammino medio previsto dalla teoria cinetica dei gas, per una data pressione, era dell'ordine del centimetro, contro i 90 cm misurati.

In risposta alla teoria di Crookes, Goldstein, come i successori Wiedemann e Hertz, affermò che i raggi catodici non sono molecole o qualsiasi altro tipo di particella, ma un qualche tipo di onda eterea, come la luce, con la differenza che i raggi catodici sono deviati da un campo magnetico e sono emessi in traiettorie perpendicolari alla superficie del catodo. Per altri aspetti i raggi catodici sono simili alla luce: per esempio viaggiano in linea retta, possono causare fluorescenza del vetro, e quindi luminosità, producono un'ombra di un oggetto, se questo è posto tra il catodo e lo schermo di fluorescenza, e possono trasportare energia.

I teorici tedeschi sostenitori della teoria ondulatoria dei raggi catodici produssero una varietà di argomenti contro la teoria particellare, alcuni dei quali finirono per essere osservati come particolarmente importanti anche dai «teorici particellari» inglesi. Il primo di questi si basa sul fatto che se i raggi catodici fossero costituiti da particelle cariche negativamente, dovrebbero subire una deflessione elettrostatica, come previsto dalla teoria di Maxwell. Ma Heinrich Hertz (1857-1894) in una serie di esperimenti del 1883 disse di non aver osservato nessuna deflessione elettrica. Hertz concluse:

Questi raggi catodici sono elettricamente indifferenti, e tra gli agenti conosciuti i fenomeni sono più vicini a quelli della luce. La rotazione del piano di polarizzazione della luce è l'analogia più vicina alla spiegazione della curvatura dei raggi catodici da parte di un magnete. [bib. FP2]

Il secondo grande problema per i «teorici particellari» nacque da un risultato di una ricerca di Hertz del 1891 nella quale scoprì che i raggi catodici possono oltrepassare sottilissime foglioline d'oro, d'argento o di altro metallo, fenomeno di difficile conciliazione con la teoria particellare di Crookes, essendo le particelle di Crookes di dimensioni confrontabili con quelle dei costituenti del metallo.

Philipp Lenard (1862-1947), studente di Hertz, estese questa ricerca, mostrando che i raggi catodici penetrando attraverso sottili foglioline metalliche poste al centro della zona di fluorescenza viaggiano in aria per qualche centimetro dopo aver superato la lastra potendo così fare esperimenti fuori della zona di scarica.

Un altro argomento di discussione fu quello sulla velocità dei raggi catodici. Il modello corpuscolare di Crookes prevedeva una velocità molto superiore a quella prevista con esperimenti sull'effetto Doppler. Arthur Shuster (1851-1934), fisico inglese, teorizzò nel 1884 un modello corpuscolare dei raggi catodici considerandoli composti da ioni negativi dissociati dalle molecole neutre del gas, risolvendo così il problema nato dall'effetto Doppler. Lo stesso Shuster nel 1890 usando risultati quantitativi, ottenne, con la deflessione magnetica dei raggi catodici e mediante ipotesi sull'energia cinetica acquistata dalle particelle gassose emesse dal catodo, un limite inferiore al valore del rapporto massa su carica (m/e).

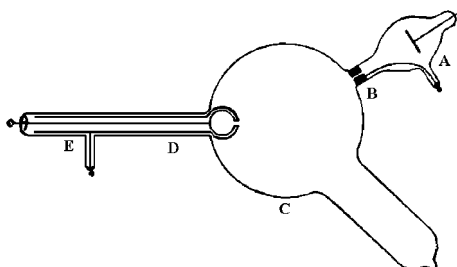


Fig. 3. Tubo a raggi catodici di Thomson per la raccolta della carica elettrica dei raggi catodici, simile a quello costruito da Perrin.

Nel 1895 il fisico Francese Jean Perrin (1870-1942), costruì un tubo a raggi catodici con un raccoglitore di carica (chiamato D in figura 3) per dimostrare, attraverso l'elettrizzazione del raccoglitore, il trasporto di carica negativa da parte dei raggi catodici.

Nel 1894 John Joseph Thomson (1856-1940), nominato professore di Fisica sperimentale al Cavendish Laboratory di Cambridge, condusse esperimenti per misurare la velocità dei raggi

catodici usando due tubi di diversa lunghezza e tentando di determinare il ritardo d'illuminazione prodotta dai raggi. Concluse (erroneamente) che la velocità era circa di 200'000 metri al secondo, molto più piccola di quella della luce, risultato che avvalorava la teoria particellare. Questa misura di velocità dei raggi catodici, così diversa da quella oggi conosciuta, è frutto di uno studio di Thomson riportato in un articolo del 1894 inserito nel numero di Ottobre del Philosophical Magazine [bib. FP1].

Nel 1897 Thomson ripeté gli esperimenti di Perrin, usando un dispositivo di poco differente, riportato in figura 3, che gli permise di dire, inizialmente, che i raggi erano accompagnati da carica elettrica negativa. Il dispositivo di Thomson differiva da quello di Perrin per il fatto che il raccoglitore di carica nel modello di Perrin era in asse con il catodo. Thomson lo modificò spostando leggermente la posizione del raccoglitore per dimostrare che la carica elettrica era solidale ai raggi catodici deviati con un campo magnetico. Ecco le sue parole:

Questo esperimento mostra che in qualsiasi modo noi pieghiamo o deflettiamo i raggi catodici con forze magnetiche, l'elettrizzazione negativa segue la stessa direzione dei raggi e che questa elettrizzazione negativa è indissolubilmente connessa con i raggi catodici. [bib. FP3]

Per risolvere il problema sollevato da Hertz sulla mancata deviazione elettrica, che era invece prevista dal modello corpuscolare, Thomson costruì un tubo speciale, riportato in figura 4, costituito da un'ampolla di vetro con all'interno un anodo (A), un catodo (K) ad emissione termoionica, cioè costituito da una sottile placchetta di platino con sopra una goccia di calce, e una placchetta metallica abbastanza estesa (B) dove indurre una carica per la deflessione elettrica.

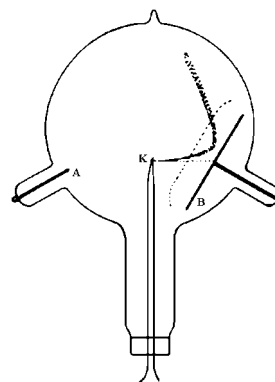


Fig. 4. Tubo di Thomson per la dimostrazione dell'azione di campi elettrici sui raggi catodici. Disegno riportato in un libro di Thomson del 1906 [bib. FP11].

Generato il sottile pennello di raggi catodici scaldando la placchetta di platino con una corrente elettrica, Thomson nota che il pennello di raggi catodici cambia direzione sotto l'applicazione di una carica sulla placchetta di deflessione.

Thomson ripeté anche l'esperimento di Hertz cercando di creare un vuoto più spinto all'interno del tubo. Egli così osservò:

... i raggi catodici, quando passano attraverso un gas, il gas diventa conduttore, così che agendo come conduttore inibisce le forze elettriche agenti sulle particelle cariche ... [bib. FP3]

Il tubo catodico usato da Thomson (Fig. 5) per ripetere l'esperimento di Hertz, è costituito da un catodo a piastrina (C) per l'emissione di raggi catodici e

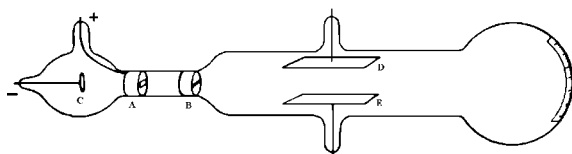


Fig. 5. Tubo di Thomson per la misura del parametro e/m dei «corpuscoli» catodici. Disegno riportato nel famoso articolo del 1897 di Thomson [bib. FP3].

un anodo costituito da due tappi metallici (A e B) ciascuno con una fessura per il passaggio dei raggi catodici. I raggi catodici passano attraverso due lastrine di alluminio (D ed E) poste all'interno del tubo e connesse con elettrodi esterni. Applicandovi

tensione, le placchette (D ed E) sono in grado di deflettere il fascio di particelle catodiche. Infine i raggi arrivano sull'estremità del vetro, generando una macchia di fluorescenza.

Dai risultati di questo esperimento Thomson concluse che i raggi catodici sono costituiti da particelle cariche negativamente.

Così i raggi catodici portanti carica elettrica negativa, sono deflessi da una forza elettrostatica come se fossero elettrizzati negativamente e si comportano sotto l'azione di forze magnetiche nello stesso modo dei corpi carichi negativamente che si muovono in linee rette. È impossibile sfuggire alla conclusione che i raggi catodici sono carichi di elettricità negativa portata da particelle di materia. [bib. FP3]

Thomson procede chiedendosi che cosa siano queste particelle:

... sono atomi o molecole, o materia ancora più piccola di questa suddivisione? [bib. FP3]

Per rispondere a questa domanda, Thomson eseguì degli esperimenti per la misura del rapporto tra la massa di queste particelle e la carica da loro portata.

Egli usò due metodi impiegando diversi tipi di tubo a vuoto: il primo basato sulla misura dell'energia depositata sotto forma di calore e della carica elettrica utilizzando un tubo a raccolta di carica; il secondo basato sulla misura della deflessione magnetica calcolando la velocità (stimata all'incirca con un valore medio di $v=2.7 \cdot 10^7 \text{m/s}$) dall'applicazione di una controdeflessione elettrica utilizzando il tubo di Fig. 5.

Il valore di m/e trovato da Thomson risulta, entro l'incertezza di misura, indipendente dalla natura del gas contenuto nel tubo e dal metallo del catodo. Ciò mette in luce che i raggi catodici non possono essere costituiti da molecole ionizzate del gas presente nel tubo o da molecole emesse dal materiale catodico.

Con il primo metodo, il valore medio ottenuto era circa di $m/e=0.49 \cdot 10^{-11} \text{Kg/C}$, valore abbastanza vicino a quello oggi scientificamente accettato ($m/e=0.5687 \cdot 10^{-11} \text{Kg/C}$). Con il secondo metodo Thomson ottenne un valore medio di circa $m/e=1.5 \cdot 10^{-11} \text{Kg/C}$ corrispondente ad un valore di circa $e/m=0.7 \cdot 10^{11} \text{C/Kg}$.

Il valore più piccolo di q/m allora noto, da confrontare con questo era quello dello ione dell'atomo d'idrogeno in elettrolisi di valore di circa $q/m=10^8 \text{C/Kg}$, valore che risultava circa 700 volte inferiore. Il valore attuale della differenza tra i due rapporti carica su massa, sopra citati, è stimata essere di circa 1845 volte.

Thomson stabilì che questo risultato dava adito a diverse interpretazioni: o la massa di questa particella è molto piccola, o la carica è molto grande rispetto agli stessi valori riferiti allo ione dell'idrogeno, o si verifica una combinazione di queste due possibilità. Dai risultati di Lenard sulla penetrabilità di queste particelle attraverso lamine sottili di metallo, Thomson conclude:

...i portatori, allora, possono essere molto più piccoli delle molecole ordinarie. [bib. FP3]

Thomson, considerando che le particelle catodiche sono le stesse (con stesse proprietà) per ogni metallo usato per il catodo, afferma che queste particelle sono costituenti della materia ordinaria.

... abbiamo nei raggi catodici una materia in un nuovo stato, uno stato nel quale la suddivisione della materia è portata molto più oltre che nell'ordinario stato gassoso: uno stato nel quale tutta la materia – cioè materia derivata da differenti sorgenti come idrogeno, ossigeno, ecc. – è unica e dello stesso tipo; questa materia crea la sostanza con la quale gli elementi chimici sono costruiti. [bib. FP3]

Il dubbio ora nasce su come un atomo costituito da queste particelle cariche, mutuamente respingenti, possa essere stabile.

Per spiegare la stabilità, Thomson ricorre al modello dei magneti galleggianti di Julius Lothar Mayer (1830-1895). Lo studio eseguito nella seconda metà dell'ottocento dal Professor Mayer (come lo chiamò Thomson nel suo articolo) si basava sulla ricerca della disposizione spaziale nella quale alcuni dipoli magnetici sono in equilibrio sotto l'azione delle mutue forze respingenti, e sotto l'azione di una forza centrale di attrazione prodotta da un'espansione polare di un grosso magnete posto al di sopra di quelli galleggianti [bib. FS3].

Nel dicembre del 1899, Thomson pubblica i risultati di esperimenti con particelle cariche negativamente prodotti da luce ultravioletta incidente su catodo metallico (effetto fotoelettrico) e dal riscaldamento di un filamento di carbone in atmosfera di idrogeno (effetto termoionico) determinando il valore di m/e in entrambi i casi e trova che è circa lo stesso che nel caso dell'emissione a scarica a catodo freddo.

Nel 1899 Thomson usando la camera a nebbia inventata da Charles Thomson Rees Wilson (1869-1957), riesce a misurare la carica degli «atomi elettrici» dalla loro traiettoria sotto l'azione di un campo magnetico uniforme.

Proprio questo e l'esperimento del 1897 furono gli argomenti trattati nel discorso fatto, nel 1906, da J.J. Thomson al momento dell'accettazione del premio Nobel per la Fisica [bib. FP10].

Thomson usa il termine «corpuscoli» fino a quando il proprio studente Ernest Rutherford (1871-1937) li chiamò, nel 1902, elettroni.

In realtà il termine elettrone, era stato coniato nel 1874 da George J. Stoney (1826-1911) per identificare l'unità di carica elementare corrispondente alla carica dello ione idrogeno, in elettrolisi, determinata sperimentalmente. Egli intendeva individuare un sistema di unità di misura fondamentali nel quale le formule fisiche si presentassero in modo semplice.

Nel 1895 Wilhelm Konrad Röntgen (1845-1923) trovò che quando i raggi catodici incidono sul vetro del tubo una nuova radiazione altamente penetrante (chiamata radiazione X dallo stesso Röntgen) era emessa e poteva essere rivelata da macchie lasciate sulla lastra fotografica o dalla fluorescenza di alcuni materiali sottoposti a questo tipo di radiazione.

A fianco della ricerca sui raggi catodici, si ha la scoperta già dal 1886 da parte di Goldstein dei raggi canale. I raggi canale sono raggi di carica positiva, che oggi sappiamo essere costituiti dalle molecole ionizzate del gas, che si manifestano in catodi perforati. I raggi canale sono generati in un tubo a vuoto inducendo una scarica elettrica ad alto potenziale tra anodo (A) e catodo (C) perforato (Fig. 6). Dietro il catodo perforato si generano pennelli di raggi canale che incidendo sul vetro creano macchie di fluorescenza.

Nel 1898 Wilhelm Wien (1864-1928) studia questo tipo di radiazione misurandone il rapporto e/m con un metodo simile a quello usato da Thomson per i raggi



Fig. 6. Tubo di Goldstein per lo studio dei raggi canale. L'immagine è riportata su un libro di Thomson sullo studio dei raggi canale [bib. FP14].

catodici. Il valore ottenuto con questo metodo, facendo esperimenti su gas diversi, per il gas che dà particelle canale più deflettibili, è di circa: $q/m=10^8 C/Kg$ che risulta dello stesso ordine di gran-

dezza di quello ottenuto in una soluzione elettrolitica per l'atomo d'idrogeno. Quindi attraverso questo ed altri esperimenti, si arriva ad affermare che i raggi canale sono costituiti da particelle del gas presente nel tubo ionizzate positivamente.

3. ESPERIMENTI

Gli esperimenti eseguiti con il tubo a raggi catodici da noi progettato, mirano a ripercorrere le tappe che portarono alla scoperta dell'elettrone. Questi esperi-

menti sono realizzati anche per testare un possibile impiego didattico e divulgativo del tubo stesso.

3.1. Caratteristiche tecniche e geometriche del tubo realizzato

Il tubo catodico realizzato permette di compiere esperimenti qualitativi e quantitativi sulla natura dei raggi catodici e dei raggi canale, e in particolare permette di

misurare i parametri velocità e rapporto e/m degli elettroni catodici.

Il tubo è stato realizzato con vetro pirex composto da due parti: la parte di emissione e quella di focalizzazione e deflessione.

Il catodo, nelle prove per i raggi catodici, era costituito da una placchetta di zinco, ottone o rame. Il catodo era connesso a due elettrodi di rame saldati al vetro con Apiezzon, un materiale vetroso che si scioglie in trielina o per riscaldamento. Altro collante usato, era a base di acrilici, in particolare Araldite, molto

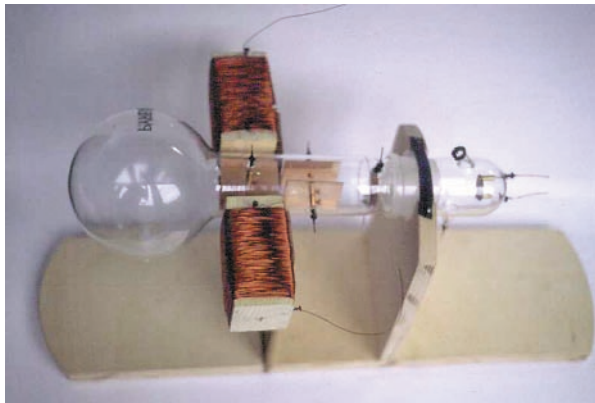


Fig. 7. Tubo catodico realizzato grazie alla ditta Marchi Gabriele che ha realizzato le parti in vetro, e al sostegno finanziario del progetto finalizzato beni culturali del CNR tramite l'Unità Tecnoscienza di Bologna. Si ringrazia per la cortese disponibilità il laboratorio di semiconduttori del settore di struttura della materia del dipartimento di fisica dell'Università degli Studi di Bologna coordinato dalla Professoressa Anna Cavallini ed in particolare si ringrazia il signor Antonio Castaldini.

più resistente del precedente ma anche più difficilmente rimovibile. Sono stati inseriti due elettrodi per il catodo, per eventuali prove con un catodo ad emissione termoionica.

Nella parte di tubo costituente la parte di emissione, sono presenti anche una finestrella di quarzo, angolata e direzionata sul catodo, da utilizzare per eventuali esperimenti sull'effetto fotoelettrico, e un anodo aggiuntivo costituito da un filo di rame.

L'anodo è costituito da un disco di metallo forato al centro (diaframma), montato su un elettrodo uscente in rame. Sono stati fatti esperimenti con anodi di rame, zinco e alluminio.

In un secondo momento, è stata realizzata anche una parte di emissione sostitutiva (Fig. 10) che non contenesse tra catodo e anodo nessuna variazione sulla superficie del vetro, per consentire così una migliore visione dei fenomeni descritti nel primo esperimento.

La parte di deviazione contiene le placchette, in rame, di deflessione orizzon-



Fig. 8. Parte di emissione del tubo a raggi catodici.

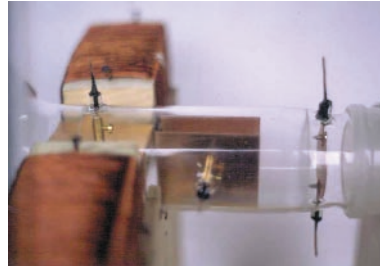


Fig. 9. Parte di deflessione del tubo a raggi catodici

tale e verticale sostenute da elettrodi sempre in rame, saldati al vetro con il metodo prima illustrato.

Si pone il tubo in modo che la zona di deviazione verticale sia quella più vicina allo schermo.

La deviazione verticale è realizzata anche con l'azione di un campo magnetico creato da due bobine affiancate aventi stesso asse di simmetria.

Il catodo, l'anodo-diaframma e le placchette di deflessione sono montati tramite sistemi a vite che li rendono smontabili e quindi sostituibili.

Le due parti costituenti il tubo, sono collegate attraverso due parti tronco-coniche; rispettivamente, femmina sulla prima e maschio sulla seconda, entrambe appositamente smerigliate per tenere il vuoto. Questo sistema ha permesso di smontare varie volte il tubo per interagire sui suoi componenti.

Il sistema è montato su un piedistallo di legno sagomato che sorregge anche le bobine di deviazione magnetica verticale in corrispondenza della zona di deviazione elettrica verticale.

La parte terminale del tubo è costituita da uno schermo sferico di raggio: $c=(63\pm 1)\text{mm}$.

La deviazione sia elettrica sia magnetica « y » sono state calcolate su uno schermo a superficie piana posto alla distanza « D » dal centro di deflessione; quindi è risultato indispensabile calcolare, in fase di progetto, la formula di trasformazione tra la deviazione misurata (arc) sullo schermo sferico e quella calcolata sullo schermo piano.

Tale formula è:

$$y = \frac{cD \operatorname{sen}(\operatorname{arc}/c)}{[D + c (\cos(\operatorname{arc}/c) - 1)]} \quad (1)$$

I parametri geometrici interessanti ai fini dei calcoli sono per la:

Deflessione elettrica verticale:

lunghezza zona: $l_c=(50.0\pm 0.1)\text{mm}$;

distanza di separazione: $d_c=(20\pm 1)\text{mm}$;

distanza della zona di deviazione verticale dallo schermo: $D_c=(160\pm 4)\text{mm}$.

La formula della deviazione elettrica è data dalla relazione:

$$Y_e = \frac{el_e V_d D_e}{md_e v_x^2} \quad (2)$$

Deflessione magnetica verticale:

per la deflessione magnetica sono state realizzate in un primo momento delle bobine con spire quadrate, poi sostituite con bobine a spire circolari.

Bobine a spire quadrate:

I parametri geometrici, interessanti ai fini dei calcoli per la deviazione magnetica verticale sono:

lunghezza zona e lato delle spire quadrate: $l_b = (50 \pm 1) \text{ mm}$;

distanza di separazione: $d_b = (82 \pm 1) \text{ mm}$;

numero spire: $N = (482 \pm 8)$;

lunghezza bobine: $l_{bob} = (81 \pm 1) \text{ mm}$;

distanza dalla zona di deviazione verticale dallo schermo: $D_b = (160 \pm 4) \text{ mm}$;

Il campo magnetico al centro della zona tra le spire è dato dalla relazione:

$$B = \frac{2\mu_0 N i}{l_{bob}} f \quad (3)$$

chiamando:

$$f = \arcsen \left(\frac{l_b^2}{d_b^2 + l_b^2} \right) - \arcsen \left(\frac{l_b^2}{(d_b + 2l_{bob})^2 + l_b^2} \right) \quad (4)$$

L'incertezza è calcolata dalla relazione:

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta l_{bob}}{l_{bob}} + \frac{\Delta i}{i} + \frac{\Delta f}{f} \quad (5)$$

dove l'ultimo termine è calcolato con le formule di incertezza di funzione e il suo valore risulta del 5%. Sommando a questa le prime due incertezze percentuali (2%, 1%) otteniamo l'incertezza percentuale sul campo magnetico:

$$\Delta B/B\% = 8\% + \Delta i/i\% . \quad (6)$$

Il valore dipendente dall'intensità di corrente è:

$$B = 0.00114 * i \text{ T} . \quad (7)$$

Bobine a spire circolari:

I parametri geometrici, interessanti ai fini dei calcoli per la deviazione magnetica verticale sono:

lunghezza zona: $l_b=(53\pm 1)\text{mm}$

distanza della zona di deviazione verticale dallo schermo: $D_b=(160\pm 4)\text{mm}$.

Il campo magnetico, in questo caso è stato misurato con un gaussmetro con risoluzione al centesimo di gauss e fondoscala 10gauss, per così calcolare il coefficiente di proporzionalità tra il campo magnetico e la corrente per valori di questa compresi tra 0 e 3A, misurata con un amperometro montato sul generatore con risoluzione di 0.01A. La misura è stata fatta con una sonda posta al centro della zona tra le bobine, in considerazione dell'ipotesi che il campo magnetico nella zona in cui passano i raggi catodici tra le bobine sia uniforme, costante e di valore uguale a quello al centro. Ciò a rigore non è esatto, ma possiamo ritenere che con una data incertezza, il campo magnetico in un intorno del centro di raggio un centimetro sia compatibile con quello al centro, attribuendo, per i calcoli, un'incertezza assoluta al campo magnetico, determinata dalla deviazione massima tra campo calcolato al centro e in altre zone della regione in esame. Tale incertezza relativa nel nostro caso è di circa il 3%.

Attraverso un fit lineare, con il metodo dei minimi quadrati, si è trovato che il campo magnetico e la corrente sono correlati dalla relazione:

$$B = b \cdot i + a , \quad (8)$$

dove:

$$b = (5.28 \pm 0.02) \cdot 10^{-4} \text{ T/A e}$$

$$a = (0.25 \pm 0.03) \cdot 10^{-4} \text{ T.}$$

La misura della deflessione magnetica è presa dalla differenza tra la posizione del fascio deflesso con una certa corrente e quello non deflesso quindi con corrente nulla (quindi con campo magnetico di deflessione nullo). Ciò indica che ai fini dei calcoli, il termine costante «a» della relazione tra campo magnetico e corrente, può essere trascurato, come può essere trascurato il campo magnetico generato da agenti esterni al sistema, come: il campo terrestre, i cavi elettrici in cui passa corrente, motori elettrici in movimento (es. pompa rotativa), ecc.. perché agenti, nella stessa misura, sia senza, che con deflessione magnetica. Tali campi esterni al sistema, spostano solo inizialmente il fascio che può risultare non centrato nello schermo. Abbiamo constatato sperimentalmente che ai fini dei calcoli quest'effetto non è rilevante.

Quindi il campo magnetico è preso per i nostri calcoli come:

$$B = 0.000528 \cdot i \text{ T} . \quad (9)$$

Con incertezza relativa percentuale, tenendo conto delle stime precedentemente eseguite (1% dalla serie di misure con il gaussmetro, 3% dalle considerazioni sul passaggio del fascio al centro della zona di deflessione):

$$\Delta B/B\% = 4\% + \Delta i/i\% . \quad (10)$$

La formula della deviazione magnetica è:

$$y_b = \frac{D_b I_b Be}{mv_x} \quad (11)$$

3.2. *Esperimenti realizzati*

Gli esperimenti realizzati, mirano a mostrare fenomeni sperimentali ottenibili con un tubo simile a quello di Thomson. Per questa ragione sono illustrati, oltre all'esperimento di Thomson, del 1897 (esperimento 3b), anche altri esperimenti che mettono in luce alcune proprietà dei raggi catodici e dei raggi canale.

3.2.1. *Fasi di scarica nei gas a diverse pressioni*

Studio fenomenologico qualitativo delle varie fasi di scarica nei gas, a pressione, interna al tubo, decrescente, evidenziando la presenza di zone oscure e di luce fino ad arrivare, a pressioni abbastanza basse, a far notare la fluorescenza che si genera sul vetro opposto al catodo.

Osservazioni:

Dopo aver collegato il tubo a raggi catodici realizzato al sistema di pompe a vuoto, si è connesso il generatore ad alto potenziale ai due elettrodi interni al tubo.

Il sistema di pompe era costituito da una pompa rotativa ed una pompa a diffusione. La prima di questa è servita a realizzare un vuoto fino a circa $3 \cdot 10^{-2}$ mmHg misurato con un pressostato di tipo Pirani con scala di misura da 3 mmHg fino a circa 10^{-2} mmHg. La seconda pompa, a diffusione, era innescata quando il prevuoto da rotativa arrivava a circa $3 \cdot 10^{-2}$ mmHg. Il vuoto in diffusione era misurato con la prima scala di un pressostato di tipo Penning con scala da 10^{-2} a 10^{-3} mmHg.

Messo in moto il sistema, abbiamo proceduto ad abbassare la pressione interna al tubo tramite il sistema di pompe appena descritto. Ad ogni fenomeno luminoso interessante, abbiamo fermato il tiraggio delle pompe per fare delle rilevazioni fotografiche e prendere la misura di pressione caratterizzante il fenomeno. In questa fase ci è stata di aiuto prezioso la collaborazione del sig. Antonio Castaldini del laboratorio di semiconduttori del settore di Struttura della Materia del dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Bologna coordinato dalla professoressa Anna Cavallini.

Come già accennato utilizzeremo un componente d'emissione del tubo appositamente costruito per rendere maggiormente visibili i fenomeni luminosi.

Il primo fenomeno luminoso interessante è quello della scarica elettrica, «a lampo», di colore violaceo sull'anodo e bluastro sul catodo con al centro un colore

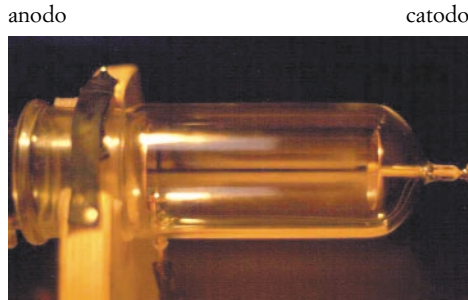


Fig. 10. Parte di emissione per visualizzare i fenomeni luminosi. Il catodo nell'immagine rimane a destra.



Fig. 11. Scarica a pressione maggiore di 3mmHg.

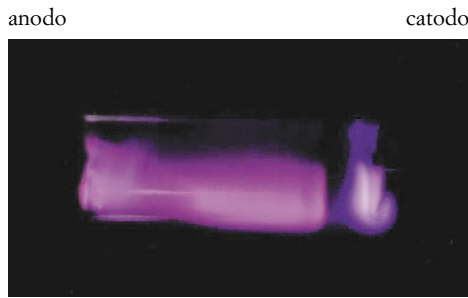


Fig. 12. Scarica a pressione $>3\text{mmHg}$.

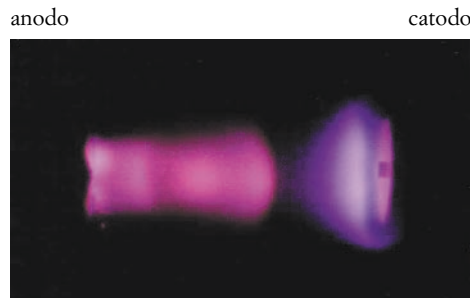


Fig. 13. Scarica a pressione di circa $4 \cdot 10^{-1} \text{mmHg}$.

poco visibile. La pressione era maggiore di 3mmHg, quindi non misurabile con i sistemi utilizzati.

Abbassando la pressione, rimanendo però ancora sopra i 3mmHg, il lampo luminoso si allarga e prende una colorazione rosa intensa abbastanza discontinua evidenziano una zona oscura sopra la luce violacea che inizia a ricoprire il catodo.

A pressione ancora più basse, di valore circa $P=(4 \pm 1) \cdot 10^{-1} \text{mmHg}$ la figura luminosa si presenta abbastanza complessa. Sull'anodo si è formato una zona luminosa rosa intensa, detta *luce anodica* e uno *spazio oscuro anodico*.

Dalla parte dell'anodo, dopo lo spazio oscuro anodico, si presenta una luce violacea stratificata (*colonna positiva*) che finisce con lo *spazio oscuro*, mal delimitato, detto di *Faraday*. Dopo lo spazio oscuro di Faraday, si vede la *luce negativa* rosa intensa staccatasi dal catodo, chiamata *bagliore*, che individua un secondo spazio oscuro (*di Crookes*) tra questa zona e quella, di uno spiccato colore violaceo, presente sul catodo detta *guaina catodica*; appena sopra il catodo si evidenzia un nuovo *spazio oscuro* detto di *Aston*.

Per pressioni $P=(2 \pm 1) \cdot 10^{-1} \text{mmHg}$ la colonna positiva, dopo essere passata per varie stratificazioni, è stata come assorbita dall'anodo e la guaina catodica si è dif-

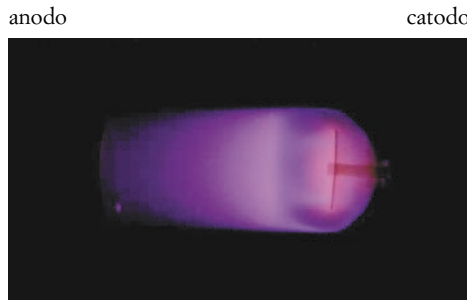


Fig. 14. Scarica in aria a pressione di circa $2 \cdot 10^{-1}$ mmHg.

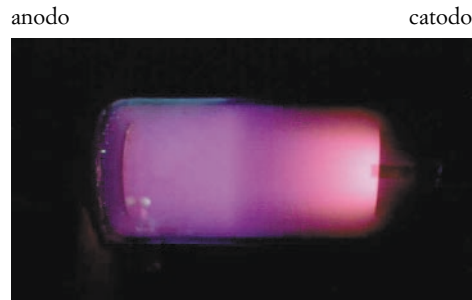


Fig. 15. Scarica in aria a pressione di circa $5 \cdot 10^{-2}$ mmHg. Si evidenzia anche la fluorescenza verdastra a sinistra sul vetro vicino all'anodo.

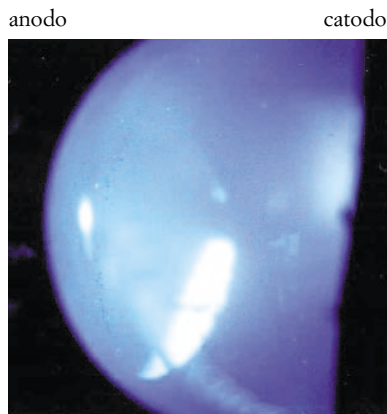


Fig. 16. Immagine del foro del diaframma creato dai raggi catodici.

fusa su tutto lo spazio tra gli elettrodi evidenziando una luce rosata sul catodo dopo lo spazio oscuro di Aston.

Arrivando ad una pressione $P=(5 \pm 1) \cdot 10^{-2}$ mmHg, si nota sul vetro opposto al catodo, vicino all'anodo una viva fluorescenza bianco-verdastra, segno della collisione dei raggi catodici con il vetro. Lo spazio tra anodo e catodo si è riempito di una luce metà violacea, verso l'anodo e metà rosata sul catodo.

In questa situazione si nota anche l'ombra prodotta dall'anodo sullo schermo di vetro opposto al catodo, in particolare montando un anodo a forma di diaframma circolare si nota una piccola macchia luminosa emergente dal foro centrale del diaframma e l'ombra circolare

del diaframma stesso. Proprio la macchiolina ci darà modo di realizzare i successivi esperimenti sulla natura di questi raggi che causano la fluorescenza.

Con la pompa a diffusione, innescata per una pressione di $P=(3 \pm 1) \cdot 10^{-2}$ mmHg si è arrivati ad una pressione interna al tubo dell'ordine di $P=(5 \pm 1) \cdot 10^{-6}$ mmHg. In queste condizioni i fenomeni luminosi spariscono.

I fenomeni luminosi presenterebbero diversi colori a seconda del gas immesso. Nel nostro tubo è molto probabilmente presente una miscela di aria e vapore di acetone usato nella pulizia degli elettrodi.

3.2.2. Studio delle proprietà dei raggi catodici

Il secondo esperimento sempre qualitativo, consiste nell'osservazione sperimentale delle proprietà dei raggi catodici.

Osservazioni:

Alla pressione di rotativa di $P=(4\pm 1)\cdot 10^{-2}$ mmHg, misurata con un Pirani, con una tensione di alimentazione dell'ordine del kV, il fenomeno luminoso consiste in un alone violaceo diffuso tra catodo e anodo ed una *fluorescenza* verdastra (Fig. 17) sulle pareti di vetro del tubo di fronte al catodo.

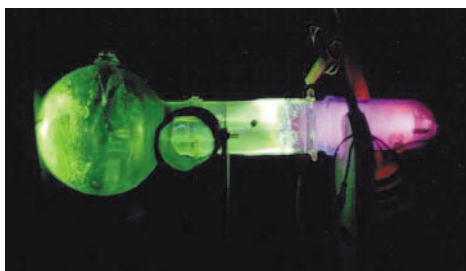


Fig. 17. Scarica nel tubo a raggi catodici a pressioni dell'ordine di $4\cdot 10^{-2}$ mmHg. Si evidenzia la collisione dei raggi catodici anche attraverso la fluorescenza verde data dal Solfuro di Zinco.

Quindi i raggi catodici eccitano il silicato di cui è composto il vetro causando una fluorescenza. In un secondo momento è stata posta sullo schermo una sostanza fluorescente, per la precisione Solfuro di Zinco, che rende ancora più evidente, attraverso una fluorescenza verde intensa, la collisione del fascio catodico sullo schermo.

La fluorescenza sullo schermo in fondo al tubo disegna, con un'ombra, la forma dell'anodo metallico. Questo è stato messo in evidenza nei nostri esperimenti montando un anodo sagomato a «croce di Malta» con un buco al centro e notando che la stessa forma era riportata ingrandita sullo schermo (esperimento di Crookes).

La fluorescenza sullo schermo in fondo al tubo disegna, con un'ombra,

La formazione dell'ombra indica che i raggi catodici usciti dal catodo viaggiano in linea retta.

Di particolare interesse, anche per i successivi esperimenti è la macchia centrale sullo schermo, evidenziata in modo particolare dall'anodo-diaframma formato da un disco metallico con un foro centrale molto piccolo; infatti ci si riferirà a questa macchia centrale per lo studio della *deflessione*.

Avvicinando una calamita al tubo, si nota che l'immagine sullo schermo del fascetto catodico si sposta. Lo spostamento è tanto più accentuato quanto più la calamita è avvicinata al fascio e quanto più la calamita è nei pressi del diaframma.

Alimentando le bobine di deflessione con una corrente continua si ottiene un tipo di deviazione simile a quella ottenuta con la calamita. Si nota anche che con l'aumento della corrente aumenta anche la deflessione sullo schermo e che cambiando polarità all'alimentatore di corrente cambia simmetricamente anche la deviazione del fascio rispetto al punto centrale.

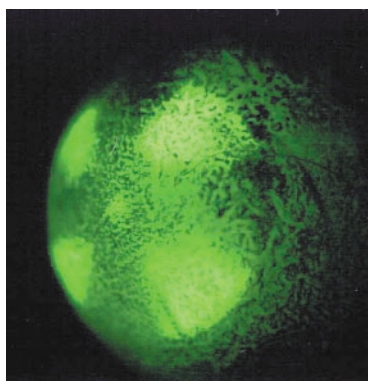


Fig. 18. Formazione dell'ombra dell'anodo a forma di croce di Malta sullo schermo del tubo a raggi catodici.

Un altro tipo di deviazione si ottiene applicando tensione alle placchette deflettrici. Si nota che il fascio si sposta verso la placchetta collegata al polo positivo dell'alimentatore. Lo spostamento del fascio rilevato sullo schermo è maggiormente evidente quando la tensione di alimentazione delle placchette è più elevata. Il verso in cui è deflesso il fascio cambia al cambiare della polarità dell'alimentatore.

La direzione in cui è deflesso il fascio sembra seguire le leggi della teoria di Maxwell del moto di una particella carica in campo magnetico e campo elettrico, come se il fascio fosse costituito da particelle cariche negativamente.

Un'altra conferma sulla *carica elettrica negativa* posseduta dai raggi catodici viene da un altro semplice esperimento: abbiamo collegato il diaframma ad un elettroscopio. L'anodo era collegato all'elettrodo vicino al catodo. Si è notato che alla collisione dei raggi catodici sul diaframma prolungata per qualche secondo, corrispondeva un sollevamento dei due pendolini dell'elettroscopio. Ciò indica che vi è stato un trasferimento di carica elettrica dai raggi catodici all'elettroscopio.

Per conoscere il segno della carica elettrica si è scaricato verso terra l'elettroscopio carico, attraverso un galvanometro balistico, collegando il terminale positivo all'elettroscopio e il terminale negativo a terra. In questa circostanza il galvanometro segnalava uno spostamento negativo, manifestando un flusso di carica negativa dall'elettroscopio alla terra.

Si sono notati altri effetti caratteristici del sistema a raggi catodici: dopo un utilizzo abbastanza prolungato nel tempo, si è rilevato un leggero riscaldamento del vetro tra i due elettrodi. Questo è segno di un *trasporto di energia* da parte dei raggi catodici. Altro fenomeno interessante è lo *spruzzamento catodico* che consiste nell'emissione di particelle metalliche dal catodo che vanno a depositarsi sulle pareti interne del vetro.

Una caratteristica, anche storicamente, importante del tubo a raggi catodici è la generazione di *raggi X*. Tale radiazione è stata rilevata attraverso un contatore Geiger con finestra integrale.

3.2.3. Misura dei parametri velocità e rapporto carica su massa (e/m) delle particelle costituenti i raggi catodici

Con il terzo esperimento si misurano i parametri velocità « v » e il rapporto « e/m » per le particelle catodiche.

Possiamo seguire due procedimenti per la misura dei parametri del fascio valutando in due diversi modi la velocità delle particelle emesse:

a) Valutazione della velocità dal potenziale di emissione (metodo di Kaufmann, 1898): si ipotizza che l'energia di emissione sia tutta trasformata in energia cinetica delle particelle; in questo modo si può valutare la velocità all'uscita della zona di emissione dalla seguente relazione:

$$v_x = \sqrt{\frac{2eV_E}{m}} \quad (12)$$

dalla velocità possiamo stimare il valore di e/m misurando la deviazione magnetica sullo schermo: «arc» e invertendo la formula per

$$y_b = D_b l_b B \sqrt{\frac{e}{2mV_E}} \quad (13)$$

da cui si ottiene:

$$\frac{e}{m} = 2V_E \left(\frac{y_b}{D_b l_b B} \right)^2 \quad (14)$$

con incertezza:

$$\frac{\Delta(e/m)}{(e/m)} = \frac{\Delta V_E}{V_E} + 2 \left(\frac{\Delta y_b}{y_b} + \frac{\Delta D_b}{D_b} + \frac{\Delta l_b}{l_b} + \frac{\Delta D}{B} \right) \quad (15)$$

Il valore di e/m , con relativa incertezza, si utilizza per il calcolo di v_x inserendolo nella (12) e ricavando l'incertezza per v_x da:

$$\frac{\Delta v_x}{v_x} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_E}{V_E} + \frac{\Delta(e/m)}{(e/m)} \right) \quad (16)$$

b) Stima della velocità dal campo elettrico e magnetico (metodo di Thomson, 1897): si produce una deflessione magnetica del fascio catodico e una controdeflessione elettrica riportando il fascio nel punto di non deflessione; si può così valutare il modulo della velocità e il valore di e/m dal valore della deflessione magnetica. Si ha per la velocità:

$$Y_b = \frac{D_b l_b B e}{m v_x} \quad (17)$$

e

$$Y_e = \frac{e l_e V_d D_e}{m d_e v_x^2} \quad (18)$$

con $y_b = y_e$ da cui

$$\frac{D_b l_b B e}{m v_x} = \frac{e l_e V_d D_e}{m d_e v_x^2} \quad (19)$$

semplificando:

$$D_b l_b B = \frac{l_e V_d D_e}{d_e v_x} \quad (20)$$

da cui:

$$v_x = \frac{D_e l_e V_d}{d_e D_b l_b B} \quad (21)$$

con incertezza:

$$\frac{\Delta v_x}{v_x} = \frac{\Delta D_e}{D_e} + \frac{\Delta l_e}{l_e} + \frac{\Delta V_d}{V_d} + \frac{\Delta d_e}{d_e} + \frac{\Delta D_b}{D_b} + \frac{\Delta l_b}{l_b} + \frac{\Delta B}{B} \quad (22)$$

Dalla stima della velocità si può ricavare la stima del rapporto e/m invertendo la formula 17 per la deviazione magnetica:

$$\frac{e}{m} = \frac{y_b v_x}{D_b l_b B} \quad (23)$$

con incertezza:

$$\frac{\Delta(e/m)}{(e/m)} = \frac{\Delta y_b}{y_b} + \frac{\Delta v_x}{v_x} + \frac{\Delta D_b}{D_b} + \frac{\Delta l_b}{l_b} + \frac{\Delta B}{B} \quad (24)$$

Il valore del rapporto e/m e della velocità sono stati calcolati, per entrambi i metodi, mediante un programma in FORTRAN. Questo programma verifica inizialmente, se la differenza tra « y » calcolato con la formula (1), e il valore dell'arco misurato sulla sfera schermo, è minore dell'incertezza della misura stessa sullo schermo. Se questa condizione è verificata, il parametro di deflessione « y », usato nella formula per il calcolo del rapporto e/m , viene sostituito con la misura «arc» presa sullo schermo, cioè, matematicamente, viene approssimata la funzione «seno» al valore dell'angolo ($\alpha = \text{arc}/c$) e la funzione «coseno» a uno; al contrario, se tale differenza è maggiore dell'incertezza di misura si usa il valore calcolato dalla formula (1) associandovi un'incertezza:

$$\Delta y = \frac{(y_{\max} - y_{\min})}{2} \quad (25)$$

dove « y_{\max} » e « y_{\min} » sono i valori di « y » calcolati per la combinazione di valori con incertezza, di «arc», « c », « D », che rendono rispettivamente massimo e minimo

«y». Tali condizioni di calcolo vengono comunicate dal programma tramite una sigla: «app» se il calcolo è stato eseguito con la prima condizione, o con «nap» con la seconda.

La misura della deflessione «arc» è stata calcolata disegnando, sia senza deflessione sia con deflessione, la zona dove la macchia sullo schermo è compresa con abbastanza sicurezza, e misurando lo spostamento massimo e minimo, prendendone un valore medio, associando un'incertezza data dalla differenza tra spostamento massimo e minimo diviso 2.

Per i primi esperimenti (prima sessione di misura), sono state prese 11 serie di dati sperimentali (di una decina di misure ciascuna) e sono state usate le bobine a spire quadrate precedentemente illustrate.

Non riteniamo opportuno riportare tutte le misure per motivi di sinteticità, né una media di queste visto il grande errore percentuale associato ad ogni valore di e/m e di v_x , e la variazione dello stesso con il valore della deflessione sullo schermo (più la deflessione è grande, più l'errore percentuale è piccolo). Riportiamo, per ogni sezione di misura, solo un risultato sperimentale rappresentativo.

Nella prima sezione di misure, i diversi valori trovati di e/m e della velocità, per ogni serie di misure, della sessione in questione, sono compatibili tra loro e presentano un'incertezza relativa abbastanza elevata dipendente anche dal valore della deflessione stessa. Specialmente nelle ultime serie, i rapporti « e/m » calcolati, risultano più compatibili con il valore scientificamente accettato.

Riportiamo di seguito un esempio di misura di questi valori, presa dalla decima serie, con incertezza relativa abbastanza buona.

Potenziale di emissione:

$$V_E = (6990 \pm 10) \text{V}$$

misura n° 3 approssimazione: app

$$i = (1.10 \pm 0.01) \text{A},$$

$$V_d = (1200 \pm 100) \text{V},$$

$$\text{arc} = (42 \pm 2) \text{mm},$$

a) metodo di deflessione magnetica e pot. di emissione

$$e/m = (2.6 \pm 0.9) * 10^{11} \text{C/Kg},$$

$$v_x = (6.1 \pm 1.1) * 10^7 \text{m/s},$$

b) metodo di deflessione magnetica ed elettrica

$$e/m = (2.2 \pm 1.0) * 10^{11} \text{C/Kg},$$

$$v_x = (5.0 \pm 1.4) * 10^7 \text{m/s}.$$

Si noti che i valori di e/m e v_x , calcolati con il metodo (a) e il metodo (b) sono tra loro compatibili anche se per tutte le misure realizzate, quelle fatte con il metodo (b) sono sistematicamente di valore inferiore. Questa sistematicità risponde alla condizione di aver considerato, nel metodo (a) l'energia potenziale di emissione tutta

trasformata in energia cinetica delle particelle. Quindi la velocità stimata con il metodo (a) è una limite superiore alla velocità delle particelle catodiche, ed è abbastanza prossimo al valore della velocità della luce nel vuoto (circa $c = 3 \cdot 10^8 \text{m/s}$).

Si può anche notare che il valore di e/m , in questo caso è compatibile con quello scientificamente accettato (Valore di e/m accettato: $e/m = 1.76 \cdot 10^{11} \text{C/Kg}$) grazie anche alle enormi incertezze associate, ma è comunque, come tutti gli altri risultati, troppo grande; il valore di e/m risulta sovrastimato.

Comunque anche i valori con grande incertezza hanno, a nostro avviso, una loro importanza, dato dalla conferma sperimentale dell'ordine di grandezza.

In una seconda sessione di calcoli, ci si è mossi nella direzione di una migliore valutazione del campo magnetico e della riduzione delle incertezze di misura, per ridurre così l'incertezza assoluta sul valore del rapporto e/m e della velocità.

Nella seconda serie di esperimenti sono state prese due serie di dati (di una ventina di misure ciascuna) utilizzando per la deflessione magnetica, le bobine a spire circolari precedentemente descritte. Alcuni risultati ottenuti, non sono compatibili con il valore scientificamente accettato. Ciò dipende, senza dubbio, dall'imprecisione, a causa delle approssimazioni introdotte, dei metodi di misura, storicamente usati da J.J. Thomson nel 1897 (metodo b), per la scoperta dell'elettrone e delle sue proprietà, e da Kaufmann (metodo a) un anno dopo Thomson, nel 1898.

Se queste ultime misure, vengono confrontate con quelle precedenti, si vede, però, che le incompatibilità derivano anche da una maggiore precisione di misura in questa sessione di determinazioni, che riduce il valore dell'incertezza assoluta.

Comunque i risultati ottenuti, anche quelli non compatibili con il valore scientificamente accettato, sono vicini a quest'ultimo e di stesso ordine grandezza. Riportiamo un esempio di misura:

misura n° 1 approssimazione: app

$$V_E = (8080 \pm 10) \text{V}$$

$$V_d = (900 \pm 1) \text{V},$$

$$\text{arc} = (39 \pm 1) \text{mm},$$

a) metodo di deflessione magnetica e pot. di emissione

$$e/m = (1.7 \pm 0.3) \cdot 10^{11} \text{C/Kg},$$

$$v_x = (5.2 \pm 0.5) \cdot 10^7 \text{m/s},$$

b) metodo di deflessione magnetica ed elettrica

$$e/m = (1.0 \pm 0.3) \cdot 10^{11} \text{C/Kg},$$

$$v_x = (3.0 \pm 0.4) \cdot 10^7 \text{m/s}.$$

Si vede che il valore di e/m per il metodo (a) è compatibile con quello scientificamente accettato attualmente, mentre, quello con il metodo (b) no. Questi due valori, non sono neanche tra loro compatibili e non sono compatibili neanche i valori trovati per le velocità, essendo però vicini tra di loro e di stesso ordine di grandezza.

I valori trovati con il metodo (b) non sono compatibili e sono sistematicamente inferiori, del 30% o 40%, del valore scientificamente accettato; solo alcuni di questi sono compatibili con il valore accettato. Anche in questo caso la stima della velocità con il metodo (a) risulta sistematicamente superiore alla stima con il metodo (b).

3.2.4. Particelle positive costituenti i raggi canale

Con il quarto esperimento si vogliono mettere in luce alcune proprietà dei raggi canale.

Invertendo catodo e anodo nel tubo, attraverso il nuovo catodo (forato), emerge un fascio di ioni positivi detti raggi canale.

Osservazioni:

ad una pressione interna al tubo di circa $P=(4\pm 1)\cdot 10^{-2}\text{mmHg}$ e alimentando il tubo con una tensione continua di qualche kV si vede emergere attraverso il foro centrale dell'elettrodo collegato al polo negativo dell'alimentatore, un fascettino di colore violaceo: un fascio di raggi canale.

Tale fascio si diffonde nella parte posteriore al catodo, non riuscendo così a visualizzare sullo schermo una zona ben definita.

anodo

catodo



Fig. 19. Fascettino di raggi canale evidenziato nel tubo a raggi catodici. Il catodo ora è a sinistra.

Avvicinando un magnete non si nota un'apprezzabile deviazione; tale aspetto trova giustificazione teorica nel fatto che le particelle canale, hanno una massa molto maggiore (circa 2000 volte), rispetto a quella delle particelle catodiche. Il fatto di non riuscire a raggiungere lo schermo può essere imputabile alla presenza di gas residuo all'interno del tubo contro il quale le particelle canali urtano diffondendosi.

Queste caratteristiche dei raggi canale, rendono impossibili, con il

sistema usato, il calcolo dei parametri caratteristici di questi raggi, soprattutto con le relativamente basse tensioni in gioco.

In concomitanza con i raggi canale si nota, dalla parte opposta, il fascio di raggi catodici evidenziato dalla fluorescenza del vetro dietro l'anodo che presenta l'ombra dell'elettrodo positivo stesso.

3.3. Confronto con i risultati dell'esperimento di Thomson

Si vogliono confrontare le metodologie sperimentali e i risultati ottenuti in questo lavoro, con quelli storici, in particolare con quelli ottenuti da J.J. Thomson nel 1897 e pubblicati sulla rivista *Philosophical Magazine* [bib. FP2]. Nel suo articolo, dal titolo «On Cathode Rays», Thomson illustra diversi esperimenti per lo studio della natura dei raggi catodici, usando diversi tubi a vuoto. Thomson inizia il suo articolo illustrando brevemente le due principali teorie (particellare e ondulatoria) sulla natura della radiazione catodica, mostrando le motivazioni della sua posizione particellare e sostenendola con diversi esperimenti. In particolare, Thomson misura il rapporto carica su massa e la velocità delle particelle catodiche per determinarne la natura. La misura è eseguita attraverso due metodi: con un calcolo di energia e carica depositata; oppure valutando la deviazione elettrica e magnetica sullo schermo del tubo a raggi catodici riportato in Fig. 5. Il primo metodo consiste nel dirigere i raggi catodici in un piccolo collettore metallico capace di catturare la carica elettrica delle particelle catodiche e la loro energia cinetica convertendola in calore. Il rapporto tra 0calore «Q» e numero di particelle, può essere valutato sperimentalmente e reso uguale al valore matematico:

$$\frac{Q}{Ne} = \frac{Nmv^2}{2Ne} = \frac{mv^2}{2e} \quad (26)$$

Confrontando questa relazione con quella della deflessione magnetica si possono ricavare i valori sperimentali per il rapporto «e/m» e la velocità «v».

Seguiremo qui il secondo esperimento.

La deviazione sia elettrica sia magnetica, come visto anche nelle sezioni precedenti, dipende da tre parametri del fascio: carica, massa e velocità delle particelle. Quindi con questo sistema si ha solo la possibilità di determinare il rapporto carica su massa conoscendo la velocità da altre relazioni sperimentali.

Nei suoi esperimenti, descritti nell'articolo del 1897, Thomson determinò la velocità generando una deflessione magnetica e una deflessione elettrica della stessa quantità e facendo il rapporto tra le due deviazioni; con questa stima della velocità determinò il valore del rapporto «e/m». Questo procedimento è stato ripetuto in questa ricerca nell'esperimento 3.b.

L'esperimento 3.a è stato storicamente eseguito per primo da Walter Kaufmann (1871-1947) nel 1898, un anno dopo l'esperimento di Thomson, ottenendo un valore medio $e/m=1.85 \cdot 10^{11} C/Kg$. Thomson nel suo esperimento fece prove per diversi valori di deviazione magnetica, diverse pressioni di vuoto, e diverse velocità, inserendo anche nel tubo diversi tipi di gas e montando catodi di diverso materiale. Ottenne per questo esperimento i risultati, trasformati da noi in unità internazionali, riportati in tabella 1.

I valori di Thomson sono tutti dello stesso ordine di grandezza, e sono di

Gas	C.	E [N/C]	B [N/Am]	Y /D	vx [m/s]	m/e [kg/C]
Aria	Al	$1.5 \cdot 10^4$	$5.5 \cdot 10^{-4}$	8/110	$2.7 \cdot 10^7$	$1.4 \cdot 10^{-11}$
Aria	Al	$1.5 \cdot 10^4$	$5.4 \cdot 10^{-4}$	9.5/110	$2.8 \cdot 10^7$	$1.1 \cdot 10^{-11}$
Aria	Al	$1.5 \cdot 10^4$	$6.6 \cdot 10^{-4}$	13/110	$2.2 \cdot 10^7$	$1.2 \cdot 10^{-11}$
H ₂	Al	$1.5 \cdot 10^4$	$6.3 \cdot 10^{-4}$	9/110	$2.4 \cdot 10^7$	$1.6 \cdot 10^{-11}$
CO ₂	Al	$1.5 \cdot 10^4$	$6.9 \cdot 10^{-4}$	11/110	$2.2 \cdot 10^7$	$1.6 \cdot 10^{-11}$
Aria	Pt	$1.8 \cdot 10^4$	$5.0 \cdot 10^{-4}$	6/110	$3.6 \cdot 10^7$	$1.3 \cdot 10^{-11}$
Aria	Pt	$1.0 \cdot 10^4$	$3.6 \cdot 10^{-4}$	7/110	$2.8 \cdot 10^7$	$1.0 \cdot 10^{-11}$

Tab. 1. Risultati dell'esperimento di Thomson del 1897 riportati sul suo articolo [bib. FP2]. I nomi dei parametri riportati nella prima riga sono stati adattati a quelli usati in questa Articolo. Anche i valori sono stati trasformati nelle unità di misura usate in questa Articolo cioè quelle del S.I.

valore molto simile per ogni tipo di gas presente nel tubo, per ogni metallo usato per il catodo e per ogni valore di pressione interna al tubo. Ciò portò il fisico inglese ad affermare che le particelle catodiche avevano una natura propria indipendente dai parametri citati. Questo condusse Thomson alle conclusioni sulla *natura universale* dei raggi catodici, costituiti, secondo lo scienziato, da «corpuscoli» derivanti dall'interno della materia atomica, cioè costituenti fondamentale della struttura della materia.

I valori originali della deviazione magnetica ed elettrica erano espressi dal rapporto tra la deviazione misurata sullo schermo e la distanza tra la zona di deflessione e lo schermo stesso (y/D). Thomson ritenne che il valore di tale rapporto fosse il valore dell'angolo tra la direzione del fascio deflesso e quella del fascio non deflesso, e non il valore della tangente dell'angolo di deflessione. Lo scienziato inglese non riporta il valore delle incertezze sulle sue misure, ma solo una serie di valori. I suoi risultati per il rapporto m/e , come si vede anche dalla tabella 1, sono compresi tra $m/e = 1.0 \cdot 10^{-11}$ e $1.6 \cdot 10^{-11}$ Kg/C dando un valore e/m compreso tra $e/m = 0.6 \cdot 10^{11}$ C/Kg e $e/m = 1.0 \cdot 10^{11}$ C/Kg. I valori ottenuti da Thomson non sono molto vicini a quello oggi scientificamente accettato che è di $e/m = 1.76 \cdot 10^{11}$ C/Kg e sono sistematicamente sottostimati. Pur tuttavia questi valori sono corretti come ordine di grandezza.

Un'approssimazione introdotta dallo scienziato inglese, nei suoi esperimenti del 1897, è quella di misurare la deviazione sullo schermo del proprio tubo come una misura su uno schermo piano. L'errore sistematico così introdotto sarebbe valutabile conoscendo il raggio della sfera schermo che meglio approssima la superficie dello schermo del tubo di Thomson. Si è attivata per questo scopo una collaborazione con il New Cavendish Laboratory di Cambridge, diretto dal Prof. Malcolm Longair, per la ricerca di materiale ed articoli originali. La discrepanza tra il

valore di e/m oggi accettato e quello trovato da Thomson, deriva sicuramente, almeno in parte, dalla limitata precisione e accuratezza del procedimento sperimentale. Negli esperimenti eseguiti, un secolo dopo rispetto a quelli condotti da Thomson, utilizzando macchinari e sistemi di misura più accurati, hanno dato misure con una precisione non ottima (si è arrivati ad incertezze percentuali dell'ordine del 10-20%) e di valore, in alcuni casi non compatibili con il valore oggi accettato. Ciò avvalorerebbe l'idea appena esposta sulla discrepanza tra le misure di Thomson e il valore attuale. In ogni caso molti ritengono che negli esperimenti di Thomson ci sia un errore sistematico, tutt'oggi non scoperto.

4. CONCLUSIONI: POSSIBILE IMPIEGO CULTURALE E DIDATTICO

L'importanza di un impiego culturale e didattico del tubo a raggi catodici nasce dalla possibilità che esso offre di eseguire esperimenti sulle teorie collegate all'elettrone: fenomenologia della scarica nei gas, prove dell'esistenza dell'elettrone e misura dei parametri velocità e rapporto carica su massa (e/m), natura corpuscolare dell'elettricità, esistenza di particelle positive, e modelli atomici nati dalla scoperta dell'elettrone. Quindi un quadro concettuale veramente molto ricco.

La ricerca storica e sperimentale porta ad una conoscenza approfondita sui fatti che stanno alla base dei cambiamenti epistemologici nella Fisica dell'inizio del ventesimo secolo. I paradigmi nati da questo cambiamento sono ancora fondamentali nella Fisica insegnata negli Istituti scolastici superiori e nei corsi del biennio delle facoltà scientifiche.

La complessità delle tecniche sperimentali utilizzate negli esperimenti: alto potenziale d'alimentazione, tecniche d'alto vuoto ecc., rende, però, inopportuno l'utilizzo diretto del tubo a raggi catodici da parte degli studenti. Anche un insegnante si troverebbe in difficoltà a realizzare questi esperimenti, sia per la reperibilità delle apparecchiature, sia per le tecniche da utilizzare in fase sperimentale che, comunque, implicherebbero la collaborazione di un tecnico specializzato. Così si è pensato ad una diversa possibilità d'impiego: realizzazione di un filmato come ausilio didattico.

Visto il numero e la diversità degli esperimenti realizzabili con il tubo catodico progettato, si è pensato ad un filmato strutturato in moduli. Ogni modulo del filmato contiene un esperimento realizzabile con il tubo catodico progettato. Questa costruzione in moduli, darebbe la possibilità ad ogni insegnante di realizzare un proprio percorso didattico, scegliendo particolari parti e prevedendo la loro collocazione all'interno di un percorso culturale da realizzare in classe.

La realizzazione di un filmato didattico richiede però particolare impegno, per questo, del filmato se ne è sviluppato, per ora, solo un primo progetto sperando in una futura realizzazione.

Questa ricerca porta un esempio di come esperimenti storicamente importanti e didatticamente significativi possono essere affrontati in modo utile e relativa-

mente semplice, contribuendo così ad una didattica della fisica, arricchita dalla conoscenza della storia della disciplina, che parte dalle osservazioni e dalla discussione di modelli interpretativi arrivando ad una formalizzazione condivisa dei fenomeni fisici naturali.

Ringraziamenti

Vorrei sentitamente ringraziare il Prof. Giorgio Dragoni, per la competenza, la cura e l'attenzione con la quale ha seguito lo svilupparsi della mia ricerca di Tesi, e il Sig. Antonio Castaldini che mi ha, molto gentilmente seguito nella parte sperimentale.

Ringrazio per l'interessamento e l'aiuto, la Prof.ssa Anna Cavallini il Prof. Giulio Pozzi, la Prof.ssa Nella Grimellini, il Prof. Silvano Cazzoli, il Prof. Ugo Valdré, il Sig. Daniele Berti e il Prof. Attilio Forino.

Ringrazio anche il Sig. Valerio Lambertini per avermi aiutato a realizzare diverse parti del tubo a raggi catodici, la ditta del Sig. Marchi Gabriele che, con infinita gentilezza, mi ha realizzato i vetri, il Prof. Goliardo Tomassetti, il Prof. Terenzio Bernardi, il Sig. Romano Serra, il Sig. Stefano Patuelli, il Sig. Francesco Albanesi e il Sig. Mirco Zuffa per aver dedicato tempo e attenzione alla parte sperimentale della mia Tesi.

Un sincero ringraziamento al Dipartimento di Fisica, alla sezione INFN di Bologna e al Museo di Fisica di questo Dipartimento per il sostegno economico offertomi per realizzare l'apparato sperimentale oggetto della mia ricerca.

Infine, si ringrazia l'Unità Tecnoscienza (Bologna) del Progetto Finalizzato per i Beni Culturali del CNR e il Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR) per il supporto di questa pubblicazione.

BIBLIOGRAFIA

Fonti primarie (in ordine cronologico di pubblicazione):

1. THOMSON J.J., *Philosophical Magazine*, 38, pp. 358 (1894).
2. HERTZ H., «*Miscellaneous Papers*», London (1896), p. 254.
3. THOMSON J.J., *Philosophical Magazine*, «On cathode rays», 44, pp. 293-317 (1897).
4. THOMSON J.J., *The Electrician*, «On Cathode rays», 21 May, pp. 104-109 (1897).
5. BRAUN, K.F., *Annalen der Physics und Chemie*, 60, pp. 552-559 (1897).
6. MAYORANA Q., *Il Nuovo Cimento*, 4° serie 4, pp. 336 (1897).
7. RIGHI A., *Il moto dei joni*, Bologna, Zanichelli (1903).
8. THOMSON J.J., *Elettricità e materia*, Hoepli (1905) trad. Giuseppe Faè.
9. POINCARÉ L., *La physique moderne son evolution*, Paris, Ernest Flammarion Editeur (1906).
10. THOMSON J.J., *Carrier of negative electricity*, Nobel lecture in Physics, 1906, Amsterdam Elsevic (1967).
11. THOMSON J.J., *Conduction of electricity through gases*, Cambridge, University Press (1906).
12. RIGHI A., *Sulla deviazione elettrostatica dei raggi catodici nel tubo di Braun*, «*Memorie*», Bologna (1907).
13. RIGHI A., *La materia radiante e i raggi magnetici*, Bologna, Zanichelli (1910).
14. THOMSON J.J., *Rays of Positive Electricity and their Application to Chemical Analysis*, London, Logmans (1913).
15. RIGHI A., *Thomson J.J.*, *Nature* 73, pp. 422 (1913).
16. RIGHI A., *I fenomeni elettro-atomici sotto l'azione del magnetismo*, Bologna, Zanichelli (1918).
17. RIGHI A., *La moderna teoria dei fenomeni fisici*, Bologna, Zanichelli (1918).

Fonti secondarie (in ordine alfabetico per autore):

Libri:

1. ABBAGNANO N., *Protagonisti e testi della filosofia*, Torino, Paravia (1996).
2. ABRAHAM H. et al., *Les quantites elementaires d'electricité, jons, electrons, corpuscles*, Paris, Gauthier & Villars (1955).
3. ACHINSTEIN P., *Particles and Waves*, Oxford, University Press (1991).
4. DELCHAR T.A., *Vacuum Physics and Techniques*, London, Chapman & Hall (1993).
5. KUHN T.S., *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Torino, Einaudi (1999).
6. MAXFIELD B., *Theory of gaseous conduction and electronics*, New York, McGraw-Hill (1941).
7. PELLICIONI M., *Fondamenti fisici della radioprotezione*, Bologna, Pitagora (1989).
8. PERUCCA E., *Fisica sperimentale*, Torino, tip. ed. Torinese (1960).
9. RUTHERFORD F. et al., *The project physics course*, New York, Holton and Winston (1937).
10. URTHAPER-SCHAM et. al., *Fisica a cura del PSSC*, Bologna, Zanichelli (1995).
11. WEINBERG S., *The discovery of subatomic particles*, New York, Scientific American Library (1983).

Enciclopedie e manuali:

1. *American Institute of Physics Handbook* (1992).
2. *Scienziati e Tecnologi*, Milano, Mondadori (1974).
3. UCCELLI A., *Enciclopedia storica delle scienze e delle loro applicazioni*, Vol. 1, Milano, Hoepli (1977).

4. DRAGONI G., BERGIA S., GOTTARDI G., *Dizionario Biografico degli Scienziati e dei Tecnici*, Bologna, Zanichelli (1999).
5. *Fanfare Fisica. Attività didattica al Museo di Fisica*, a cura di G. DRAGONI, Consiglio Nazionale delle Ricerche e Museo di Fisica, dell'Università degli Studi, Bologna (2000).

Siti internet:

1. WWW.aip.org/History/Electron
2. WWW.chem.uiuc.edu/demos/cathode.htm
3. WWW.chimie-scola.ac/paris.fr