

Problemi, metodi e didattica di Fisica Moderna

Luigi Sangaletti

Dipartimento di Matematica e Fisica

Università Cattolica, Via dei Musei 41, 25121 Brescia

Tel. 030-2406744

E-mail: sangalet@dmf.bs.unicatt.it

Note introduttive

- ➔ Fisica Moderna nella scuola secondaria: informazione o formazione?
- ➔ No alla memorizzazione dei risultati e agli esercizi preconfezionati sulla fisica nucleare e delle alte energie o sulla meccanica quantistica.
- ➔ Piuttosto: sviluppare una “*story line*”. Come siamo arrivati a conoscere ciò che conosciamo?
- ➔ La fisica moderna si occupa dell'indagine del mondo fisico ad un livello non direttamente accessibile ai nostri sensi
- ➔ Sintesi e padronanza di concetti della fisica classica come velocità, accelerazione, forza, massa, quantità di moto, energia, carica elettrica, campo elettrico e magnetico all'interno di contesti sperimentali ricchi come l'esperimento di Thomson e il modello atomico di Bohr

Rapporti con le altre discipline e prerequisiti

Chimica: atomi, reazioni chimiche tra atomi o molecole, numero di Avogadro, mole, massa atomica, numero atomico, tavola periodica degli elementi

Ottica fisica: interferenza e diffrazione

Elettromagnetismo: campo elettrico, campo magnetico, moto di particelle cariche in campi elettrici e magnetici

Alcune indicazioni di metodo

Andare oltre la presentazione delle scoperte.

“How do we know what we know?” (A. B. Arons, *A guide to Introductory Physics Teaching*, Wiley, New York)

Capacità di distinguere quali sono i fatti e le evidenze sperimentali, da una parte, e quali le inferenze e le conclusioni, dall'altra.

Attività di laboratorio: esperimento di Thomson, analisi degli spettri a righe, esperimento di Millikan, esperimento di Rutherford, effetto Zeeman, esperimento di Franck-Hertz

PROGRAMMA DEL CORSO

1. Introduzione alla fisica moderna.

I raggi catodici e l'elettrone. L'esperienza di Thomson e la misura del rapporto e/m .
L'effetto Zeeman.

2. La quantizzazione della carica elettrica. L'esperienza di Millikan (1909)
La diffusione delle particelle alfa e il modello atomico di Rutherford (1911)

3. I quanti di energia (I). Lo spettro del corpo nero e l'ipotesi di Planck (1900).
I quanti di energia (II). L'effetto fotoelettrico e l'interpretazione secondo Einstein (1905).
L'effetto Compton (1923).

4. I quanti di energia (III). Gli spettri di emissione degli atomi e il modello di Bohr (1913).

5. La quantizzazione dei livelli energetici. L'esperienza di Frank-Hertz. La scoperta dei raggi X. I livelli atomici profondi e l'emissione dei raggi X (Moseley, 1913).

6. Cenni di meccanica ondulatoria. L'ipotesi di De Broglie.

7. Il principio di indeterminazione di Heisenberg.

8. Diffrazione dei raggi X e degli elettroni (Davisson e Germer, 1927).

Bibliografia e modalità d'esame

Emilio Segré

Personaggi e scoperte della fisica contemporanea. Da Rutherford ai quark
Mondadori Editore (Milano, 1996)

E. Wichmann

La fisica di Berkely. Vol. 4. Fisica quantistica.
Zanichelli Bologna (1973)

Harald A. Enge, M. Russel Wehr, James A. Richards

Introduction to Atomic Physics
Addison-Wesley (Reading, Massachusetts, 1972)

MODALITA' DI ESAME

Sono previsti due modalità di esame, a scelta dello studente.

1. Colloquio su uno degli argomenti svolti durante il corso
2. Compatibilmente con il calendario delle lezioni della SSIS, é data la possibilità di partecipare, con un ristretto gruppo di studenti di scuola secondaria superiore, a una esperienza di laboratorio di fisica moderna, della durata di 2-3 ore, guidata da docenti del Dipartimento di Matematica e Fisica. In tal caso sarà possibile sostenere l'esame presentando una relazione sull'esperimento.

La nascita della fisica moderna

1870-1880: studi qualitativi sulla scarica nei gas e sui raggi catodici

Dicembre 1895: Scoperta dei raggi X (Roentgen)

1896: Scoperta della radioattività (Becquerel)

1896-1897: Esperimenti di Thomson

Che cos'è l'atomo?

0. CHE COS'E' L'ATOMO?

Determinazione della massa atomica
Determinazione del numero di Avogadro
Misura delle dimensioni atomiche

E' possibile "vedere" l'atomo?

Relazioni con le scoperte della chimica:

1803 Dalton Legge delle proporzioni definite
 Legge delle proporzioni multiple

1808 Gay-Lussac

1811 Avogadro

1860 Loschmidt Teoria cinetica dei gas. Misure di viscosità dei gas.
 Cammino libero delle molecole e loro diametro e massa

Leggi dei gas. Modelli per i gas perfetti

Distribuzione di Maxwell-Boltzmann

Relazioni con le scoperte della fisica:

Meccanica classica $\bar{F} = m\bar{a}$

Termodinamica

Elettromagnetismo (Maxwell)

$$\begin{aligned} \operatorname{div} E &= 4\pi\rho & \operatorname{div} B &= 0 \\ \operatorname{rot} E &= -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} & \operatorname{rot} B &= \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{4\pi i}{c} \end{aligned}$$

Teorie in corso di sviluppo:

Meccanica statistica (irreversibilità del mondo macroscopico e reversibilità dei fenomeni elementari: Maxwell, Clausius, Boltzmann, Gibbs)

Teoria della relatività (Einstein 1905)

Fisica nucleare (Becquerel, Curie, Rutherford)

I raggi catodici e l'elettrone

1. I RAGGI CATODICI E L'ELETTRONE.

TUBO A SCARICA: DISPOSITIVO CHE PERMETTE DI OTTENERE UNA ECCITAZIONE DEGLI ATOMI, CON CONSEGUENTE EMISSIONE DI LUCE, E DI PRODURRE FASCI DI PARTICELLE (RAGGI CATODICI E RAGGI CANALE).

I raggi catodici furono descritti per la prima volta da Julius Plucker nel 1859. I raggi canale furono scoperti nel 1886 da Eugen Goodstein.

Nel 1897 J.J. Thomson dimostrò che i raggi catodici sono formati da particelle cariche negativamente, gli elettroni; dal canto suo, Wilhelm Wein, nel 1900, dimostrò che i raggi canale sono atomi carichi elettricamente, cioè ioni.

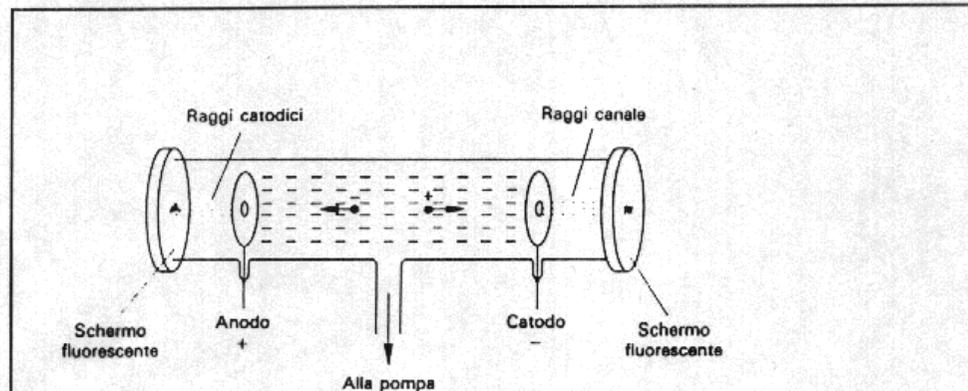
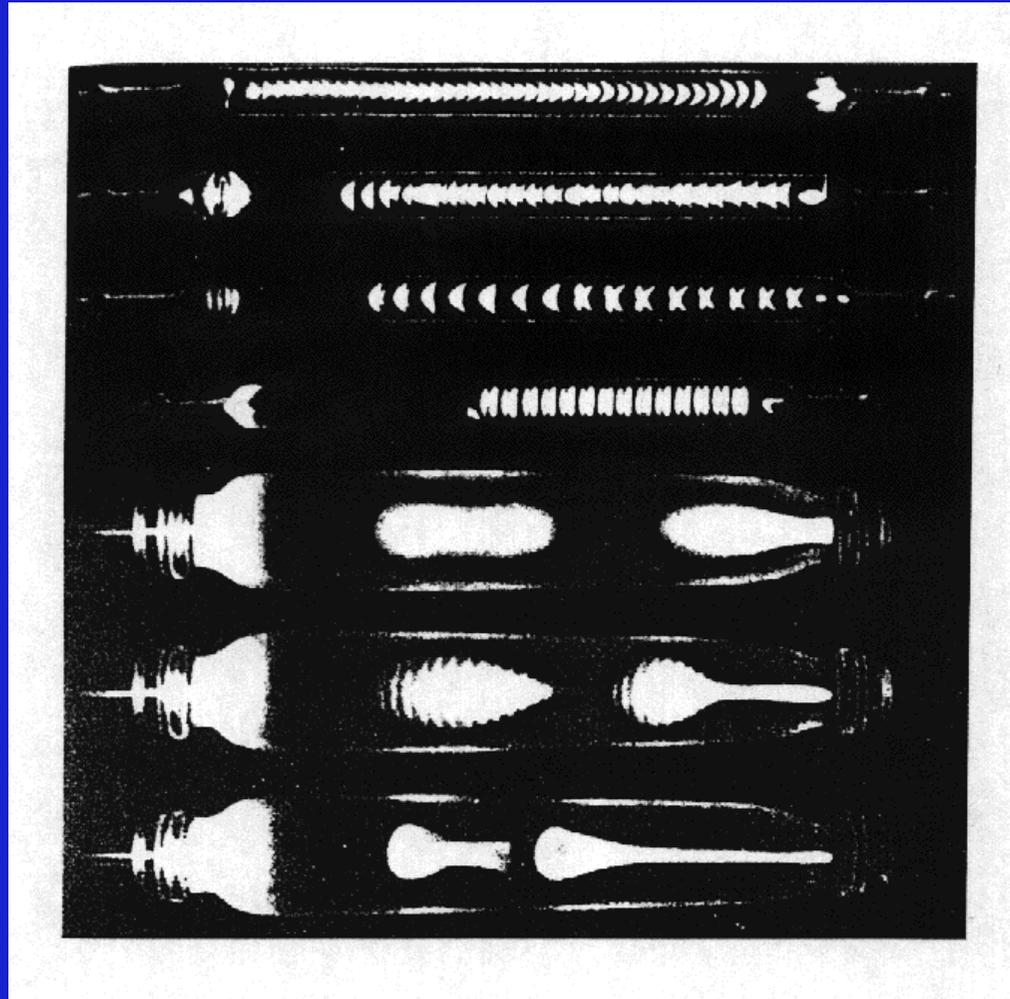


Figura 2.18

Tubo a scarica di gas per la generazione di raggi catodici e raggi canale. Tra anodo e catodo si applica una differenza di potenziale di alcune migliaia di volt. Gli effetti di luminescenza e la formazione di raggi catodici e raggi canale all'interno del tubo dipendono fortemente dalla pressione. Nella zona a campo nullo tra catodo e schermo fluorescente si osservano i raggi canale, che consistono di ioni positivi. Raggi catodici e raggi canale ebbero un ruolo primario, agli albori della fisica atomica, nella determinazione della massa, della carica e della sezione d'urto per diffusione di elettroni e ioni.

Tubi a scarica



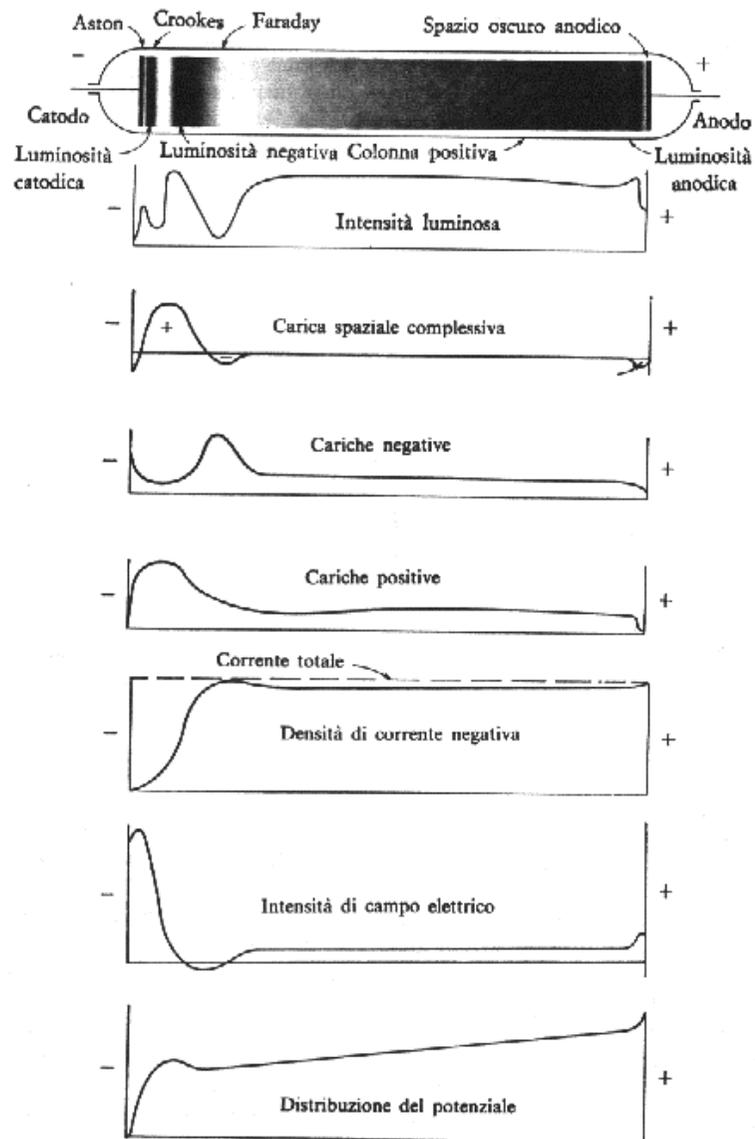
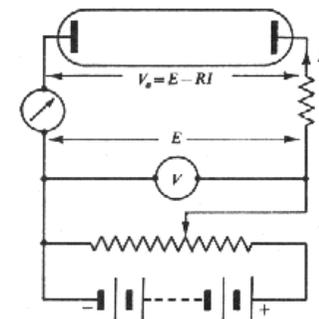
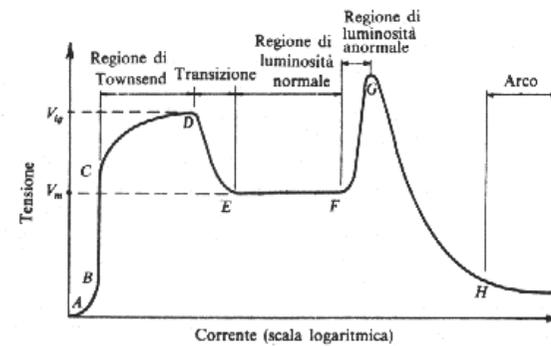


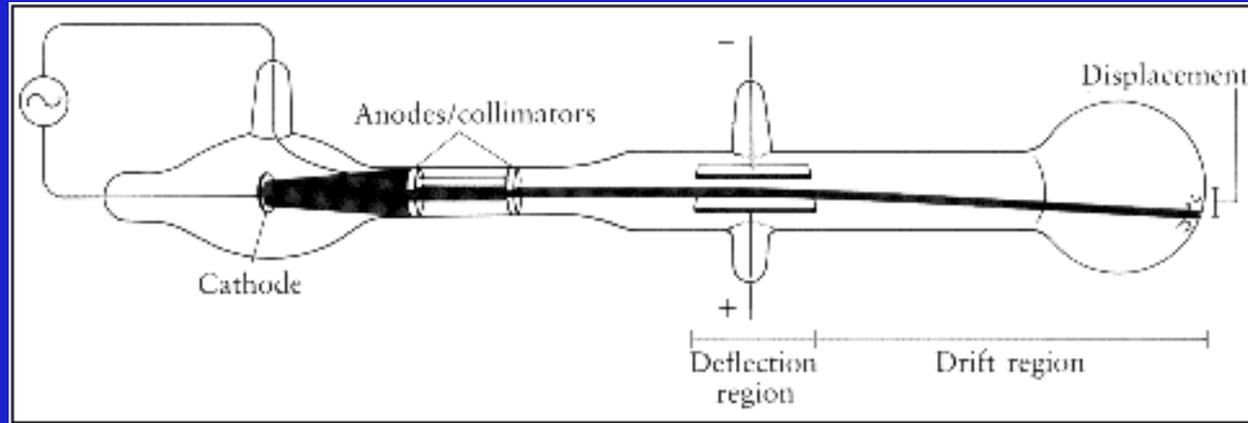
Fig. 6. - Aspetto visivo della scarica e distribuzione delle varie grandezze lungo il tubo a gas.



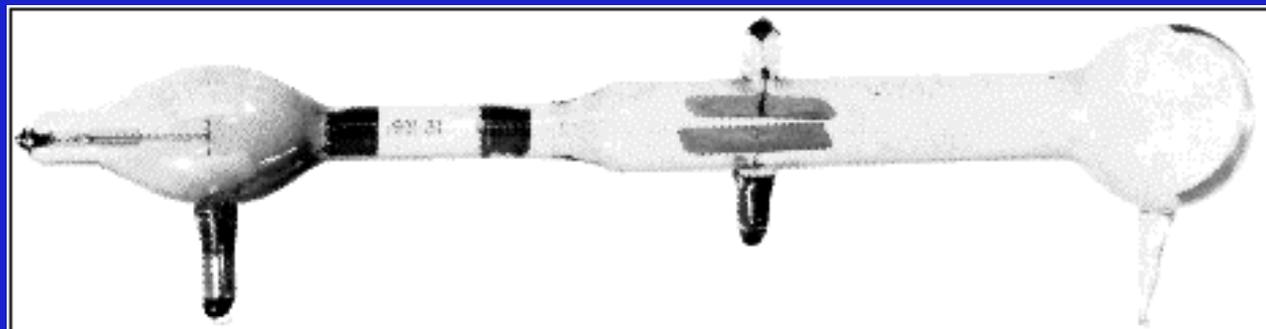
Caratteristica complessiva tensione-corrente per un tubo a gas a catodo freddo e circuito di principio per il suo rilievo sperimentale.

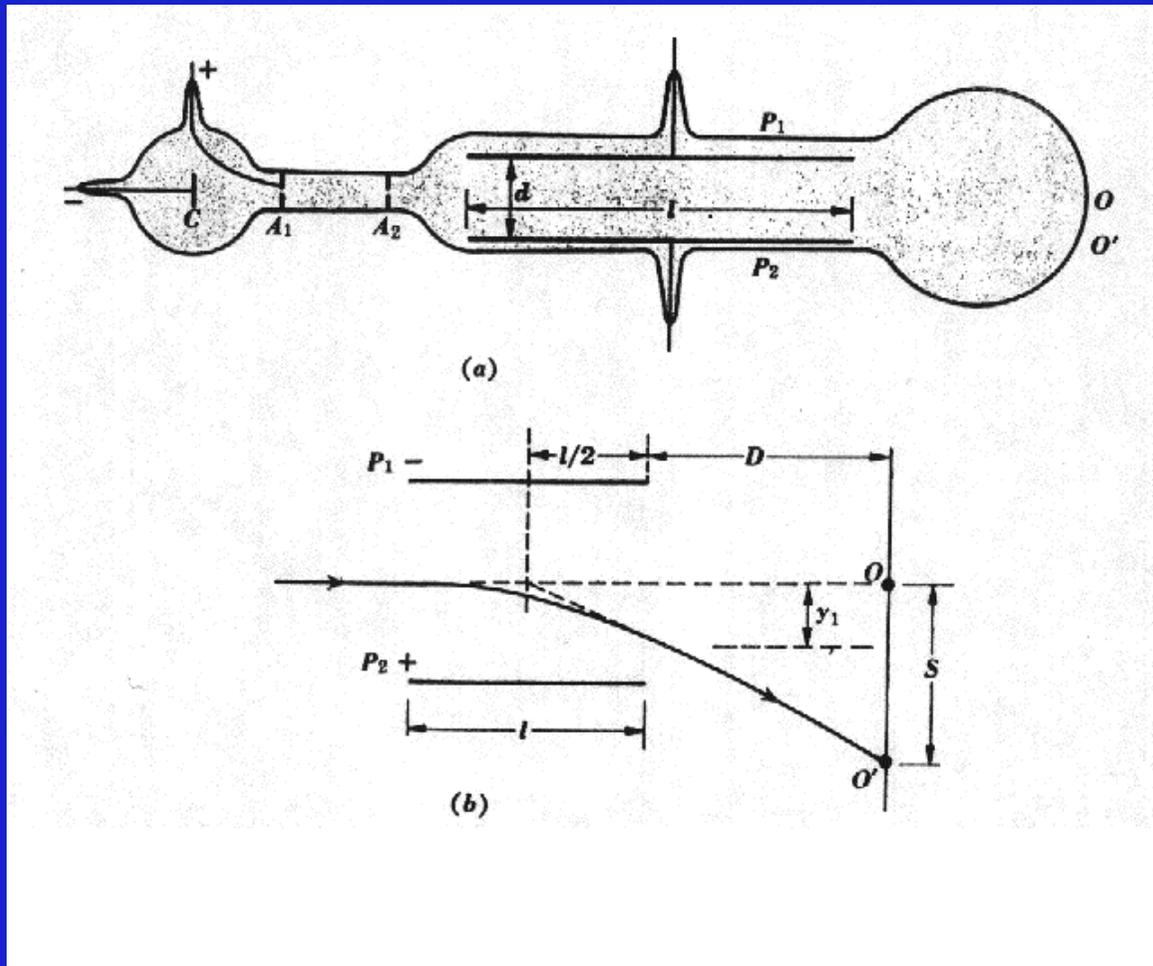
... disputa sulla natura dei raggi catodici. Che cosa erano? Sembrava viaggiassero in linea retta e una croce metallica interposta tra il catodo e l'anodo del tubo proiettava la sua ombra. Forse erano deviati da un campo magnetico, per quanto le opinioni in materia differissero a causa del pessimo vuoto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

da E. Segré: *Personaggi e scoperte della fisica contemporanea* (Mondadori Milano 1996)

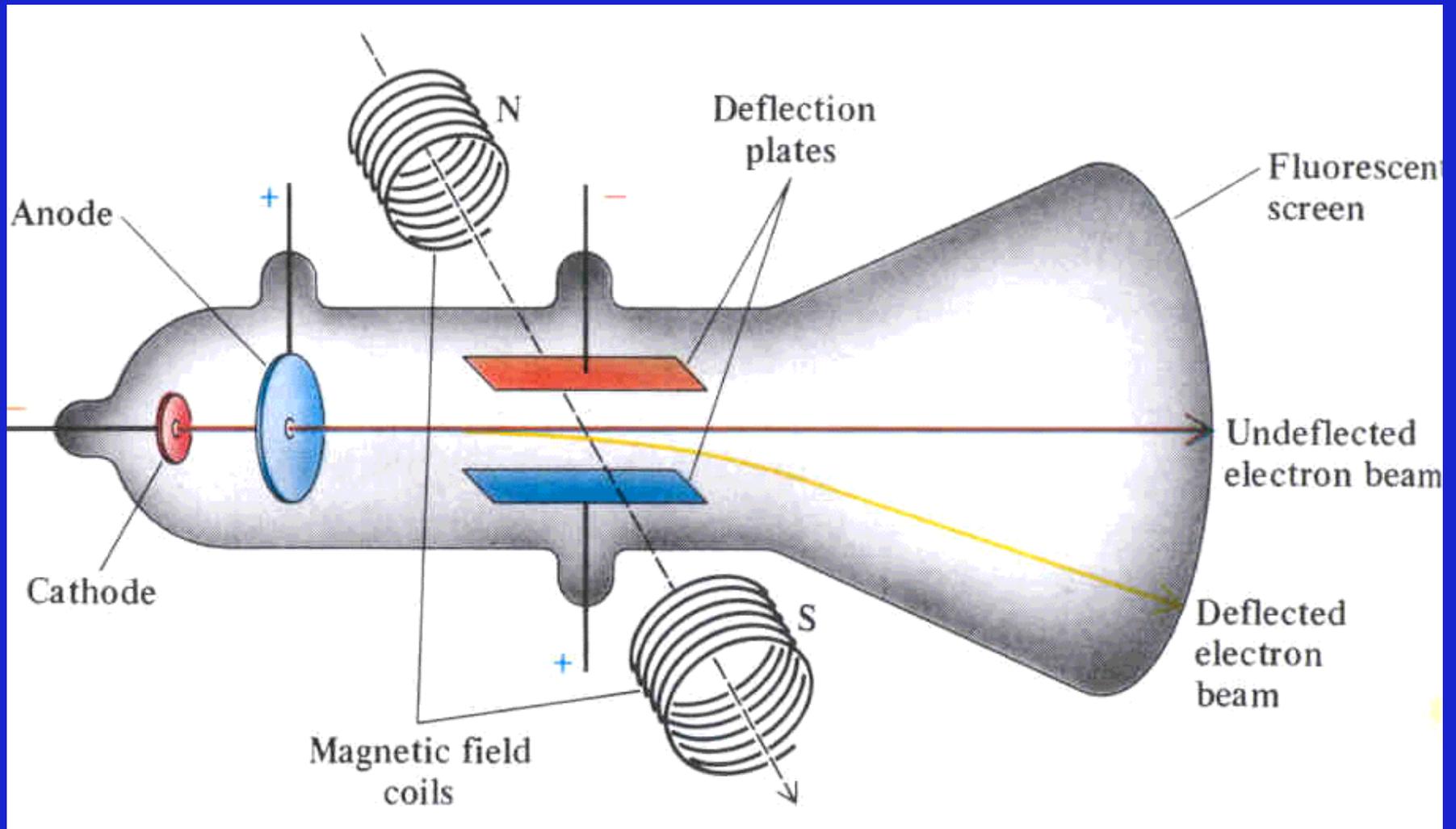


Schema e fotografia di uno dei tubi a raggi catodici usati da Thomson per i suoi esperimenti





Un pennello di raggi catodici emesso dal catodo C e focalizzato in A_1 e A_2 passa tra gli elettrodi P_1 e P_2 fra cui esiste un campo elettrico E_y . Un campo magnetico B viene creato da bobine esterne al tubo (non indicate) ed è perpendicolare al campo elettrico e diretto lungo l'asse z (perpendicolare al piano della lavagna).



Gli elettroni di un fascio di raggi catodici sottoposti ad un campo elettrico E_y sono soggetti a una forza

$$F_E = e E_y$$

(dove e è la carica dell'elettrone, considerata con il suo segno) diretta come il campo elettrico; sottoposti a un campo magnetico B_z sono soggetti ad una forza

$$F_B = (e/c) \mathbf{v}_x \wedge \mathbf{B}_z$$

dove B_z è il campo magnetico, v_x la velocità dell'elettrone, c la velocità della luce. Il prodotto vettoriale $v_x \wedge B_z$ è un vettore perpendicolare a v_x e a B_z , di modulo $B_z v_x \sin\theta$ (dove θ è l'angolo compreso tra v_x e B_z) e diretto lungo l'asse y .

Ognuna di queste forze produce una deviazione, lungo y , secondo la legge di Newton

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_E + \mathbf{F}_B = m \mathbf{a}_y$$

dove m e \mathbf{a}_y sono rispettivamente la massa e l'accelerazione della particella. Si noti che se \mathbf{E}_y , \mathbf{B}_z , v_x sono perpendicolari l'uno all'altro e se inoltre

$$E_y / B_z = v_x / c$$

la forza a cui è soggetta la particella si annulla ed essa si muove di moto uniforme e rettilineo.

Ne segue che in un dispositivo di campi elettrici e magnetici perpendicolari tra di loro e a un fascio di particelle, solo le particelle di una certa velocità non sono deflesse, le altre lo sono e abbandonano il fascio. Un dispositivo siffatto serve quindi ad avere particelle della stessa velocità, nota, una volta che si conoscono \mathbf{E}_x e \mathbf{B}_z .

Ora rimuoviamo il campo magnetico. Le particelle di velocità costante v_x vengono deflesse dal campo elettrico. L'accelerazione che acquistano è:

$$a_y = eE_y/m$$

per un intervallo di tempo l/v_x

Quindi:

$$y_l = 1/2 a_y t^2 = 1/2 E_y (e/m) (l/v_x)^2$$

da cui si può ricavare il rapporto e/m .

Thomson trovò che, indipendentemente dal tipo di gas che riempiva il tubo e dal materiale che costituiva il catodo, il rapporto tra la carica e la massa dell'elettrone valeva:

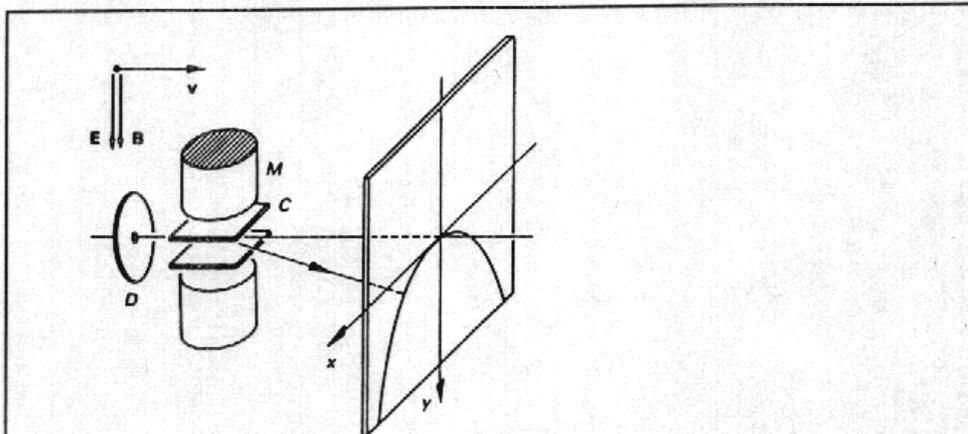
$$e/m = 1.7 \times 10^{11} \text{ C/Kg}$$

Applicazioni I: spettrometro di massa (industria chimica, monitoraggio ambientale di gas inquinanti)

Equazioni per lo spettrometro di massa.
Condensatore come filtro di energia (lungo y) e
magnete come filtro di impulso (lungo x).

LO SPETTROMETRO DI MASSA.

Il metodo della parabola di Thomson (1913)



Rappresentazione schematica del metodo della parabola. Il fascio ionico, collimato dal diaframma D, viene deflesso nelle direzioni x e y dal magnete M e dal condensatore C. La curva descritta dall'equazione [3.5] dà la traccia delle particelle su uno schermo rivelatore posto subito dopo il condensatore e il magnete. A distanze più grandi le parabole vengono deformate dalla proiezione.

Lo spettrometro funziona come filtro di energia (nella direzione y) e come filtro di impulso (nella direzione x). Esso permette di ricavare il rapporto carica/massa (e/m) di una particella.

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{e}{m} E \quad (E \equiv E_y) \quad \text{Integrando:}$$

$$y = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} t^2 = \frac{e}{2m} E \frac{l^2}{v^2}$$

l = lunghezza del condensatore

v = velocità iniziale della particella

$$y \sim \frac{1}{v^2}; \quad E_c = \frac{1}{2} m v^2 \Rightarrow \text{lungo } y \text{ il condensatore funziona da filtro di energia}$$

$B \equiv B_y \Rightarrow$ deviazione della particella lungo x

Forza di Lorentz: $\vec{F}_L = e(\vec{v} \times \vec{B}) \Rightarrow$ curvatura della traiettoria

$$|\vec{F}_L| = |m \vec{a}_c| = \frac{m v^2}{r_c} = e v B$$

$$\Rightarrow r_c = \frac{m v}{e B}$$

$$\text{Accelerazione centripeta } a_c = \frac{v^2}{r_c} \Rightarrow a_c = \frac{e B v}{m}$$

Poiché la particella percorre un arco di circonferenza di piccola apertura possiamo confondere l'accelerazione nella direzione x con $a_c \Rightarrow a_x \cong a_c$

$$\text{Quindi } x = \frac{a_c t^2}{2} = \frac{e B v}{m} \frac{(l/v)^2}{2}$$

$$\Rightarrow x = \frac{e B l^2}{2 m v}$$

$\Rightarrow x \sim \frac{1}{m v}$ il magnete che genera il campo B funziona da filtro di impulso.

Eliminando v dalle espressioni di x e y si ottiene:

$$y = \frac{2E}{e^2 B^2} \frac{m}{e} x^2$$

Equazione di una parabola.

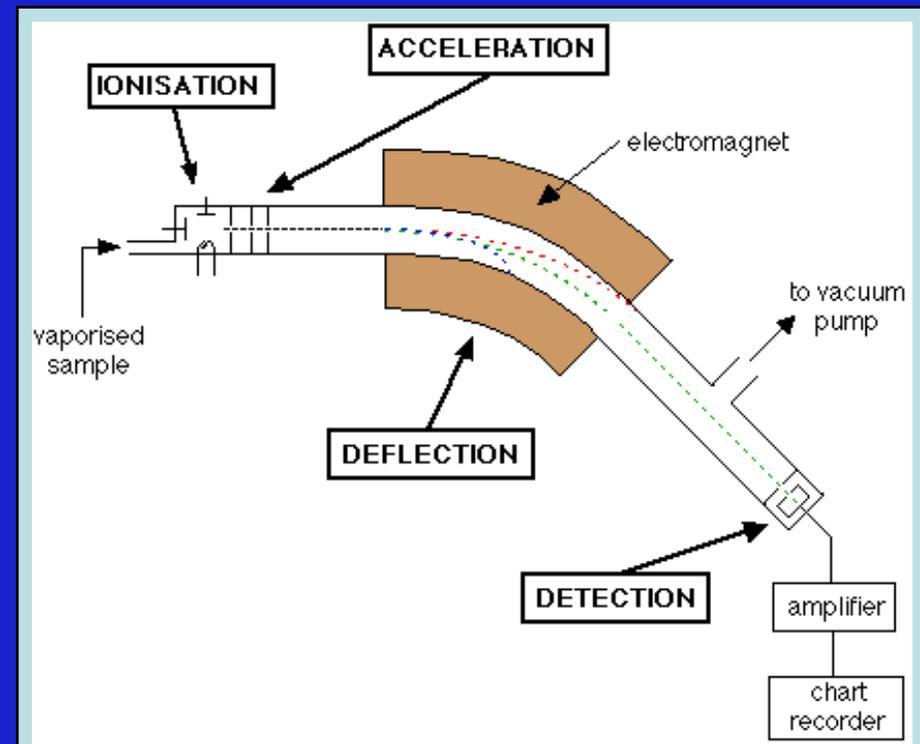
An outline of **what happens in a mass spectrometer**. Atoms can be deflected by magnetic fields - provided the atom is first turned into an ion. Electrically charged particles are affected by a magnetic field although electrically neutral ones aren't. The sequence is :

Stage 1: Ionisation. The atom is ionised by knocking one or more electrons off to give a positive ion. This is true even for things which you would normally expect to form negative ions (chlorine, for example) or never form ions at all (argon, for example). Mass spectrometers always work with positive ions.

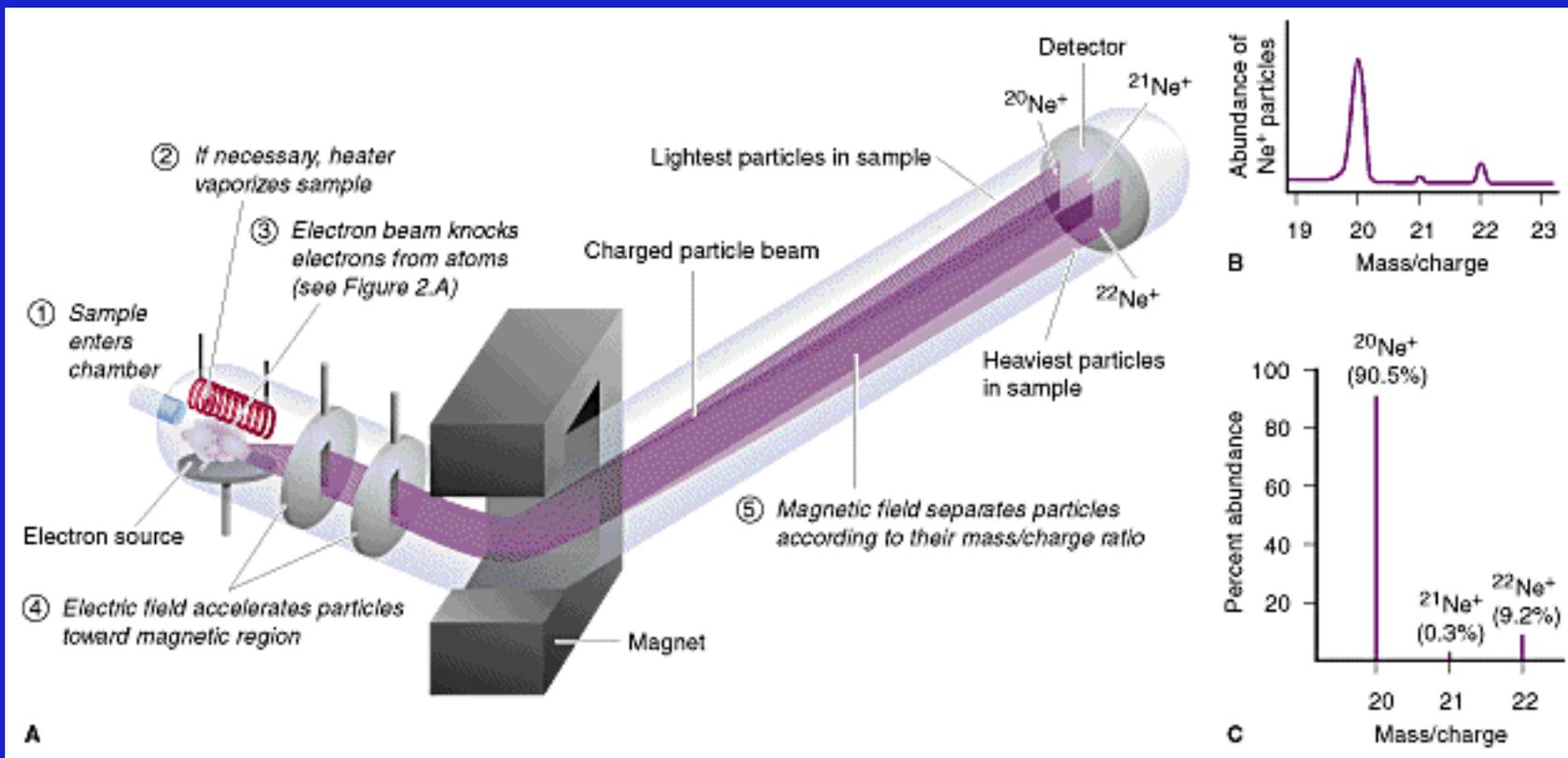
Stage 2: Acceleration. The ions are accelerated so that they all have the same kinetic energy.

Stage 3: Deflection. The ions are then deflected by a magnetic field according to their masses. The lighter they are, the more they are deflected. The amount of deflection also depends on the number of positive charges on the ion - in other words, on how many electrons were knocked off in the first stage. The more the ion is charged, the more it gets deflected.

Stage 4: Detection. The beam of ions passing through the machine is detected electrically.



<http://www.chemguide.co.uk/analysis/masspec/howitworks.html#top>



http://www.chem.ufl.edu/~chm2040/Notes/Chapter_2/isotopes.html

Applicazioni II: Il tubo catodico

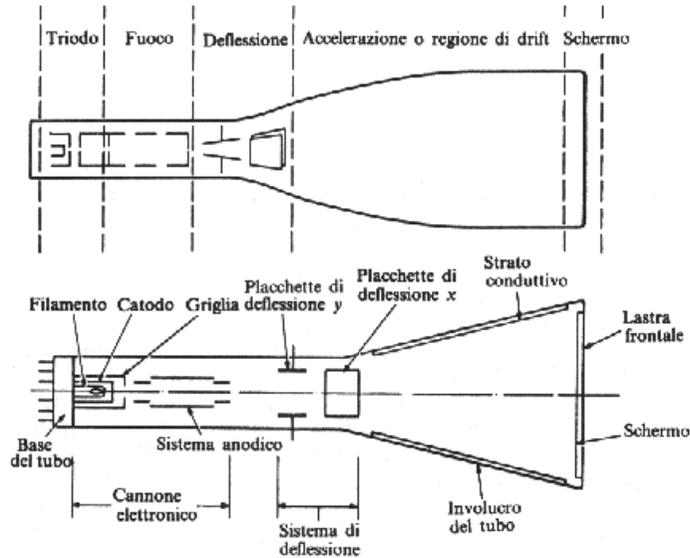


Fig. 1. - Sezioni longitudinali dei tubi a raggi catodici.

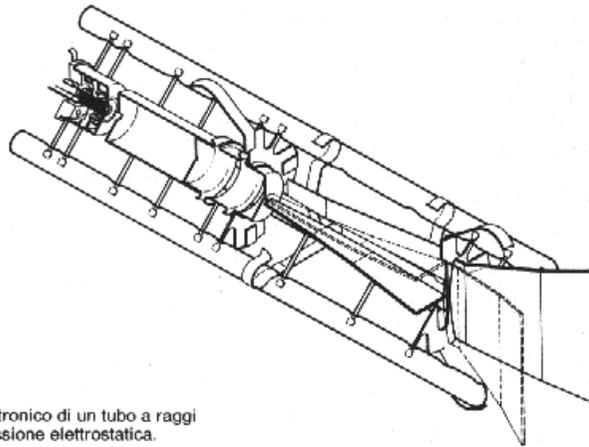


Fig. 2. - Tipico cannone elettronico di un tubo a raggi catodici e placchette di deflessione elettrostatica.

Siti web

<http://www.aip.org/history/electron/jjhome.htm>

Sito, in inglese, sulla scoperta dell'elettrone, curato dal center for History of Physics dell'American Institute of Physics.

<http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/AtomicStructure/Disc-of-Electron-Images.html>

<http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/AtomicStructure/Disc-of-Electron-Intro.html>

<http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/AtomicStructure/Disc-of-Electron-Results.html>

Sito, in inglese, scritto nel 1996 da John L. Park del ChemTeam, facente parte della TutDiamond Bar High School Teachers' Home Page orial for High School Chemistry.

<http://webserver.lemoyne.edu/faculty/giunta/thomson1897.html>

Sito riportante (in inglese) l'articolo di Thomson apparso in *Philosophical Magazine*, **44**, 293 (1897), in cui descrive ipotesi, esperimenti e conclusioni del proprio lavoro del 1897.

http://www.exploratorium.edu/xref/phen_index.html