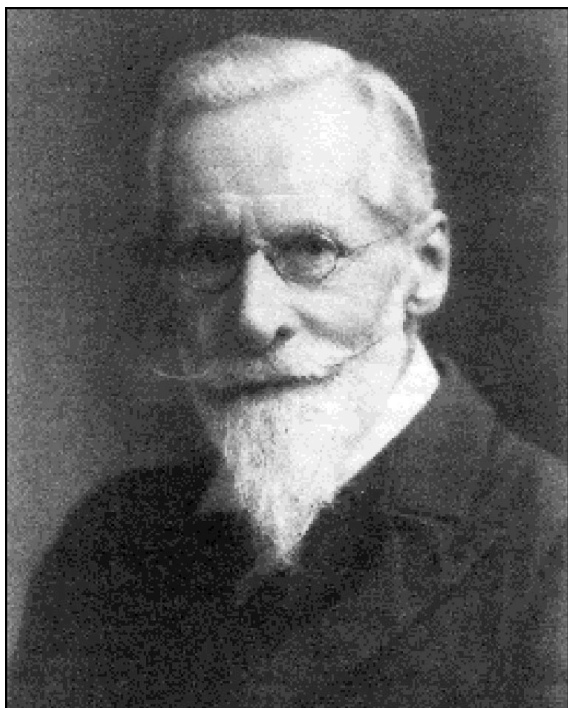


Dipartimento di Chimica "G. Ciamician"
Raccolta Museale

COLLEZIONE DI TUBI A VUOTO

La collezione sottolinea il valore scientifico-culturale che i tubi a vuoto hanno avuto nello sviluppo delle scienze fisiche e chimiche, grazie principalmente ai contributi di Johann H. Geissler (1814-1879), Johann W. Hittorf (1824-1914), William Crookes (1832-1919), Joseph J. Thomson (1856-1940) e Wilhelm C. Roentgen (1845-1923).



W. Crookes (1832-1919)



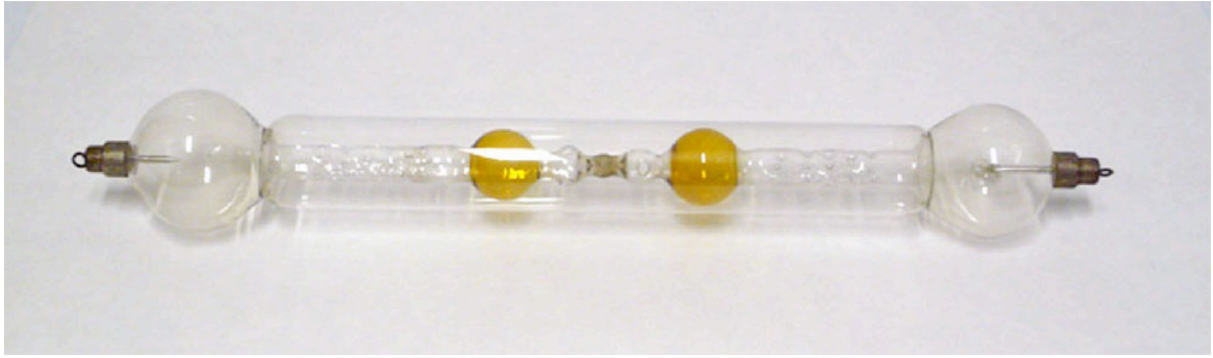
J. Thomson (1856-1940)

La Raccolta Museale comprende apparecchiature di tipo didattico, databili intorno agli anni 1920-30, utilizzate durante le dimostrazioni in aula o laboratorio per studi di spettrometria e delle particelle fondamentali. Esse si prestano ad illustrare, in successione ordinata, molte proprietà della scarica elettrica nei gas rarefatti, rilevando le caratteristiche dei raggi catodici e canale, fino a dimostrare l'esistenza dell'elettrone e dei raggi X.

La collezione comprende tubi a scarica elettrica in gas rarefatti, tubi a raggi catodici per evidenziare le proprietà dinamiche, chimiche e fisiche dei medesimi, tubi per la stima del rapporto e/m degli elettroni (i raggi catodici), tubi a raggi canale per evidenziare l'esistenza di raggi costituiti da particelle cariche positivamente e, infine, tubi a raggi X.

Tutti i tubi della collezione sono esposti al piano terra del Dipartimento (Armadio D3) e sono descritti qui di seguito.

1. Tubo di Geissler. Nel secolo XIX se ne costruirono delle forme più svariate, sia per ricerca che per divertimento. Sono costituiti generalmente da un doppio tubo di vetro, quello interno di forma elaborata; il tubo interno contiene un gas (spesso aria, oppure azoto, idrogeno...) a bassa pressione (qualche mm di Hg, 130-260 Pa) ed è dotato di 2 elettrodi. *All'applicazione di un alto potenziale (qualche kV, ad es., 2kV) una viva luminosità riempie ogni parte del tubo interno, seguendone tutte le sinuosità; il colore della luminescenza dipende dal gas contenuto.*



Tubo di Geissler (Inv. 21, Armadio D3)



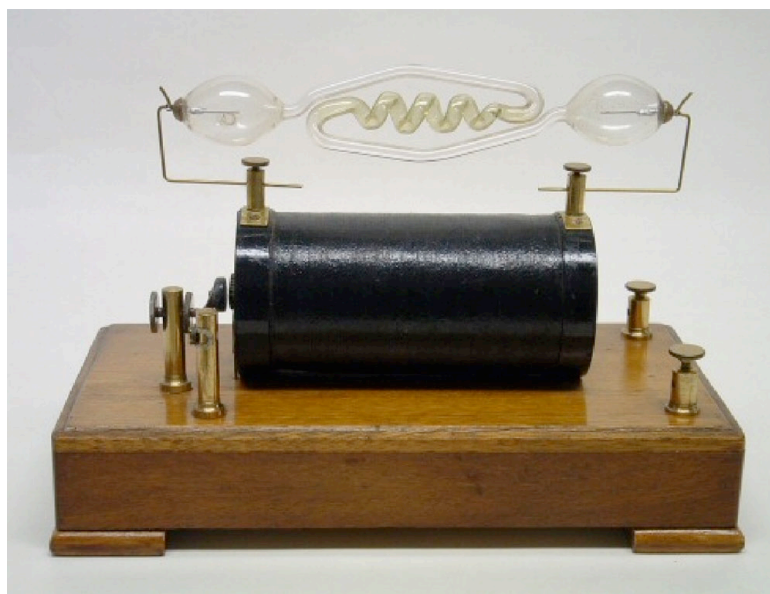
Tubo Geissler a spirale
(www.crtsite.com/page6-2)



Lo stesso tubo
durante la scarica elettrica



Tubo Geissler composito
(www.crtsite.com/page6-3)

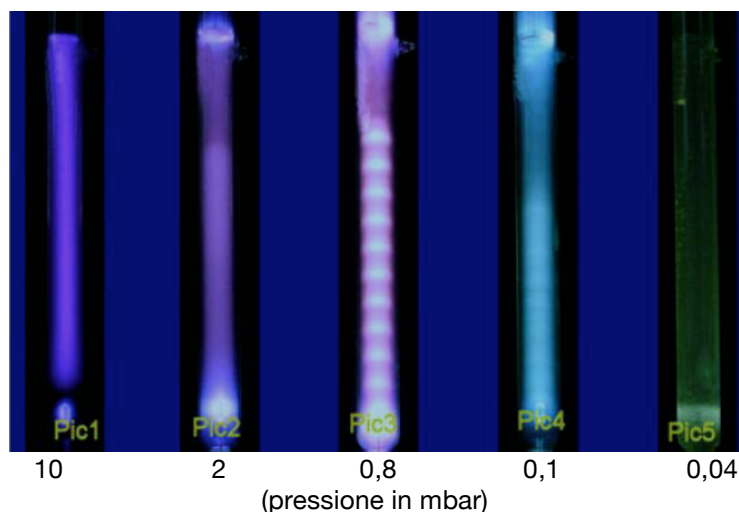


Tubo di Geissler collegato a un rocchetto di Ruhmkorff (da: www.crtsite.com/page8.html)

2. Scala di Cross. Serve per mostrare l'effetto della pressione sulla scarica nei gas rarefatti: 6 tubi a vuoto riempiti dello stesso gas a diversi valori di pressione sono collegati ciascuno a 2 elettrodi.



Scala di Cross (Inv. 31, Armadio D3)



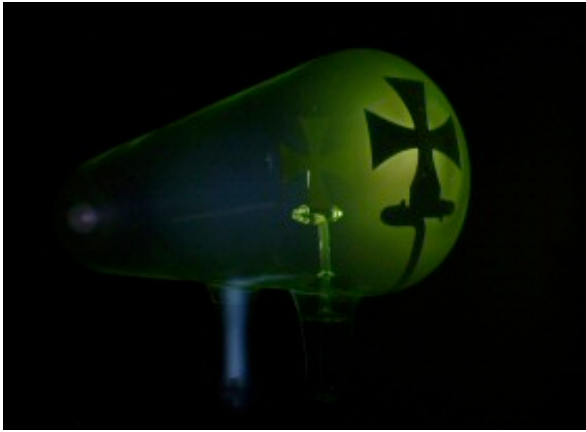
Scala di Cross durante la scarica elettrica
(da: www.liceocurie.it/progettolingue/VacuumScalePL.pdf)

Ogni tubo, applicando un'alta differenza di potenziale, presenta una figura di scarica caratteristica: la differenza di potenziale applicata ionizza il gas contenuto e quindi si avrà un passaggio di cariche; *al variare della pressione del gas varia l'aspetto della scarica elettrica*, che va dalla "scarica a bagliore" (tipo di scarica del tubo al neon) per medie pressioni, fino ad una fluorescenza verde della parete del vetro per bassissime pressioni.

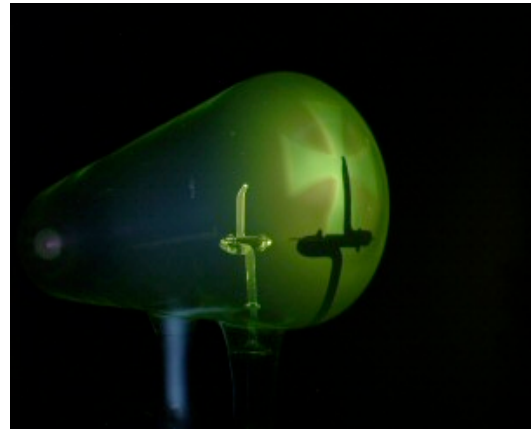
3. Tubo con croce di Malta. Dentro ad un'ampolla di vetro è disposta una croce metallica incernierata su un adatto supporto di vetro, che può essere posta sia in posizione verticale che orizzontale. Con una pompa è fatto il vuoto nell'ampolla e ai due elettrodi è applicata una tensione continua elevata, mentre la croce è in posizione verticale. All'applicazione di questo alto potenziale, il catodo emette un fascio di raggi catodici costituiti da un flusso di elettroni che, accelerati dal campo elettrico, colpiscono la parete di vetro opposta e ne eccitano la fluorescenza, disegnando con un'ombra la sagoma della croce prima incontrata. Con questo esperimento Crookes dimostrò che le radiazioni prodotte dal catodo vengono interrotte da un oggetto metallico, producendo sul fondo dello strumento un'ombra con la medesima forma dell'oggetto, dimostrando così che *queste radiazioni si propagano in linea retta*.



Tubo di Crookes con croce di Malta (Inv. 23, Armadio D3)

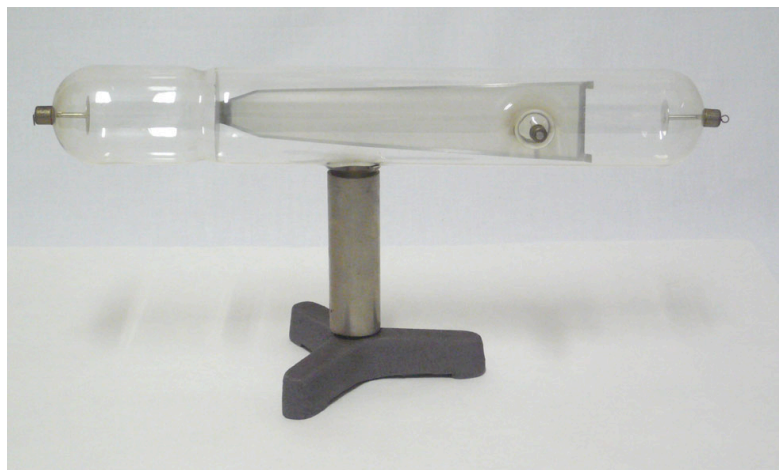


Tubo a scarica con croce metallica in posizione verticale, interposta sul cammino dei raggi catodici (www.crtsite.com/page7.html)

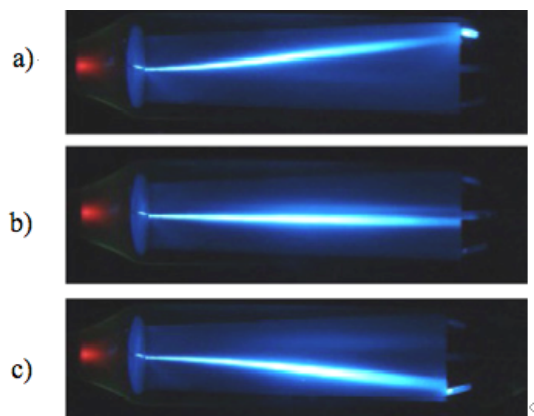


In un momento successivo la croce viene abbassata in posizione orizzontale, fuori dal cammino dei raggi catodici

4. Tubo per mostrare la flessione dei raggi catodici. Caratteristica di questo tubo a vuoto è la presenza di un dischetto posto davanti al catodo, con una fessura orizzontale, e di uno schermo verticale, ricoperto di una sostanza fluorescente, posto obliquamente al cammino dei raggi. Il fascio catodico attraversa la fenditura disegnando sullo schermo uno stretto fascio luminoso rettilineo, immagine della fenditura attraversata. *Quando si avvicina un magnete al tubo il fascio si flette, dimostrando che i raggi catodici sono carichi elettricamente.*



Tubo a raggi catodici per mostrare la deflessione in un campo magnetico (Inv. 24, Armadio D3)



Tubo per mostrare la flessione dei raggi catodici:
a) e c) sotto l'influenza di un magnete; b) in assenza di campo magnetico.
(da: <http://www.crtsite.com/page7.html>)

5. Tubo con mulinello. Il sistema è costituito da un tubo con due elettrodi ed una rotellina molto leggera, che presenta sulle superficie delle alette macchie di sostanza fluorescente per evidenziare la collisione dei raggi catodici. All'applicazione di un alto potenziale, le alette si mettono a ruotare in direzione opposta al catodo. *Questo indica la natura corpuscolare dei raggi catodici, formati quindi da particelle di massa propria.* Nel 1903 Thomson dimostrò però che lo spostamento era dovuto, in buona parte, all'effetto *radiometrico* (vedere scheda del Radiometro): dai suoi calcoli risultava, infatti, che il momento degli elettroni incidenti sulle alette sarebbe stato sufficiente a far compiere alla ruota soltanto un giro completo al minuto.



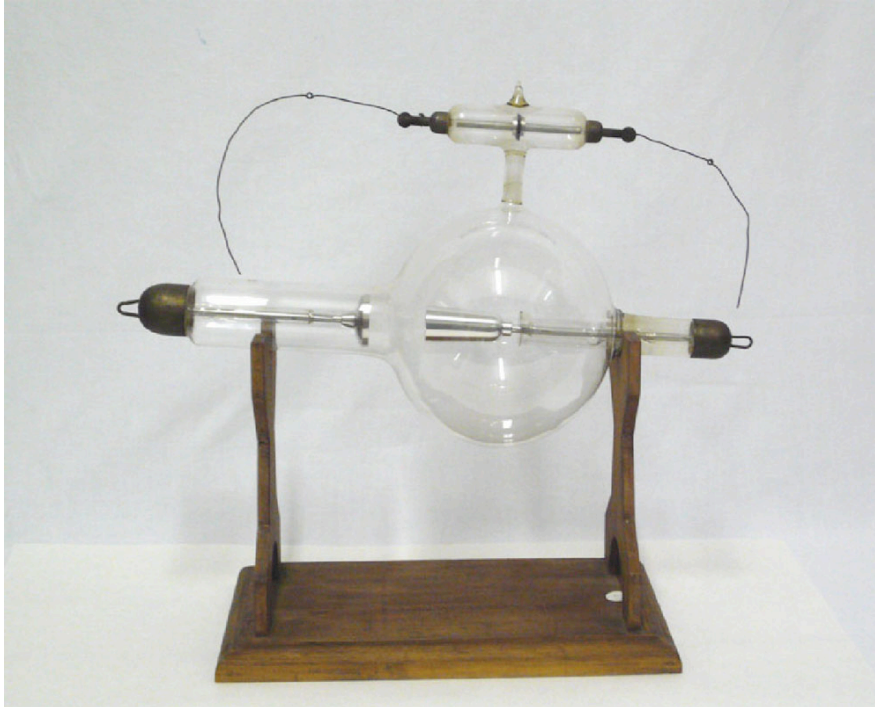
Tubo con mulinello (inv. 37. Armadio D3)

6. Tubo per evidenziare gli effetti termici dei raggi catodici. Questo tubo è caratterizzato da un catodo concavo per focalizzare i raggi catodici sull'anodo, costituito da una sottile lamina di platino verniciata di nero. All'applicazione di un alto potenziale i raggi catodici convergono in un punto sulla lamina anodica, portandola ad incandescenza.



Tubo per gli effetti termici (Inv. 38, Armadio D3)

7. Tubo per rilevare la carica dei raggi catodici. Tubo a vuoto con catodo concavo a distanza ravvicinata rispetto ad un elemento a forma di stretta campana (quasi un cilindro), che funziona da anodo, sul quale si raccoglie la carica elettrica; se, al cessare della scarica, l'anodo viene collegato esternamente ad un elettroscopio si può evidenziare la carica elettrica negativa raccolta. Nella parte superiore del tubo c'è un dispositivo (praticamente un condensatore) che serve ad evitare scariche anomale eccessive nel tubo per eccesso di differenza di potenziale, quando è collegato alla sorgente di alto voltaggio (ad es., un rocchetto di Ruhmkorff).



Tubo per rilevare la carica dei raggi catodici (Inv. 15, Armadio D3)

8. Tubo per evidenziare la deflessione elettrostatica. Il tubo a raggi catodici presenta tra anodo (con foro centrale) e parete sferica di fondo due piastrine parallele (a destra nella foto) per evidenziare lo spostamento del fascio catodico all'applicazione di un debole campo elettrico alle due piastrine (vedi anche sotto esperimento di Thomson).

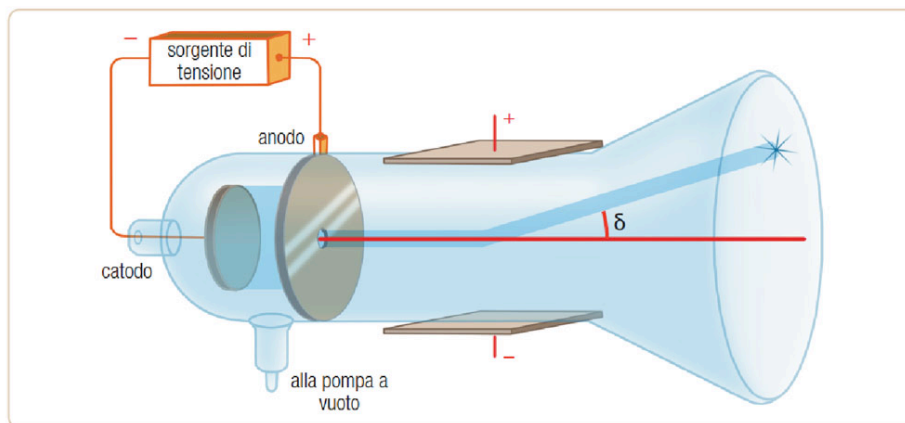


Tubo per esperimenti di deflessione elettrostatica (Inv. 20, Armadio D3)

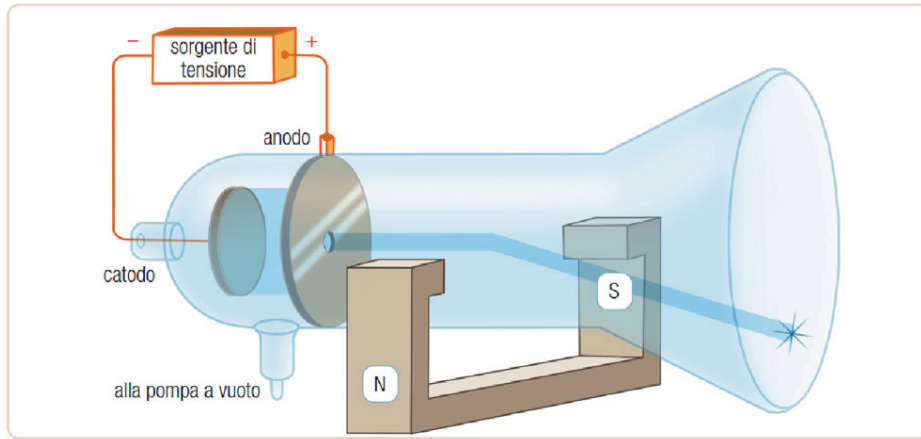
9. Tubo di Thomson. È costituito da un'ampolla di vetro molto lunga, in cui è stato fatto un vuoto elevato; ad un'estremità è presente un catodo piatto che, in presenza di una alta tensione continua, emette elettroni attirati dall'anodo. Subito dopo l'anodo c'è una piastrina forata da cui esce un pennello di raggi catodici che vanno poi a focalizzarsi sullo schermo opposto al catodo, ricoperto di una sostanza fluorescente, su cui i raggi catodici originano una piccola macchia luminosa. Il pennello di elettroni nel suo percorso attraversa lo spazio tra due placche metalliche piane a cui è possibile applicare una modesta differenza di potenziale collegandole ad una batteria: quando le due piastrine non sono collegate, i raggi catodici procedono linearmente, mentre quando la batteria è collegata, si verifica una deflessione del fascio verso la piastrina carica positivamente, con conseguente spostamento della macchia sullo schermo. Si può ottenere un effetto analogo per mezzo di un campo magnetico in prossimità dello schermo. Con questo strumento è stato possibile dimostrare che *il fascio emesso dal catodo è composto di particelle cariche negativamente* e la misura dell'angolo di deviazione di tale fascio ha permesso la stima del rapporto carica su massa (q/m), che contribuì alla caratterizzazione dell'elettrone.



Tubo di Thomson (Inv. 18, Armadio D3)



Esperimento di Thomson con applicazione di campo elettrico
(da: www.simonescuola.it/esperimento_di_thomson.pdf)



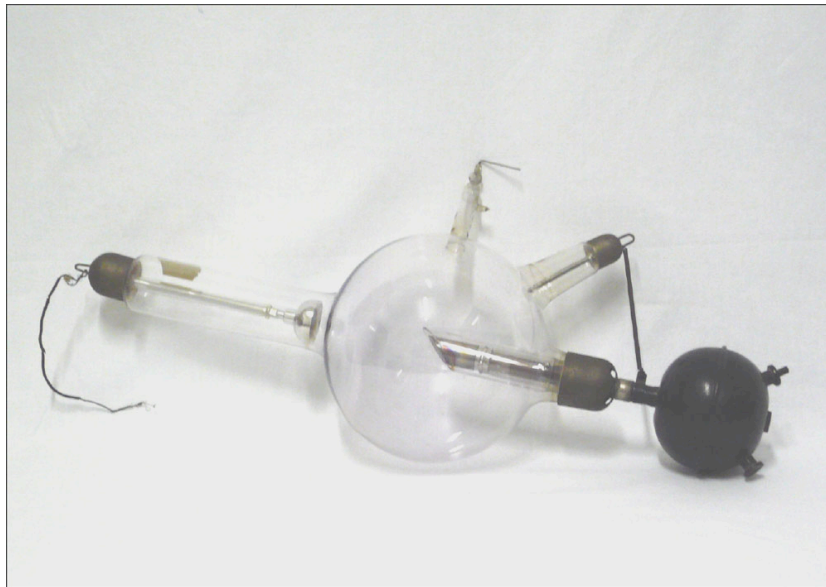
Esperimento di Thomson con applicazione di campo magnetico
(da: www.simonescuola.it/esperimento_di_thomson.pdf)

10. Lampada di Tesla. È un tubo ad alto vuoto, che ad un'estremità porta un filamento di carbonio, collegato ad un elettrodo di un apparato che fornisce un potenziale alternato ad altissima frequenza (radiofrequenze); come conseguenza il filamento si surriscalda, diviene incandescente e provoca una scarica di plasma (miscela di cationi ed elettroni) del gas rarefatto presente nel tubo al bulbo di vetro. Il vetro diviene conduttore e trasmette elettroni al metallo di rivestimento (nel nostro caso, alluminio).

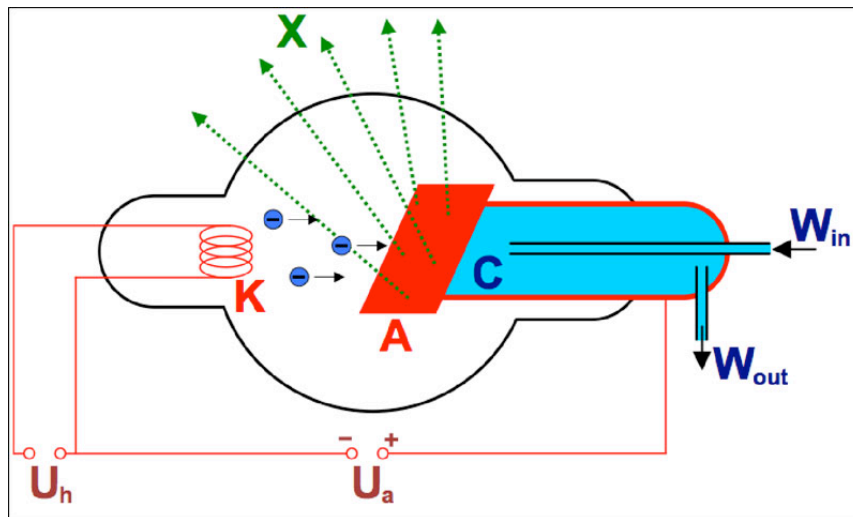


Lampada ad incandescenza (Inv. 22, Armadio D3)

11. Tubo a raggi X. Tubo di Crookes a raggi X dei primi del '900. Il tubo è costituito da: un bulbo di vetro in cui viene fatto il vuoto da 0,1-0,5 Pa; a un estremità del tubo è presente un catodo di alluminio opportunamente concavo; al centro del bulbo è posto un anodo inclinato di 45° rispetto al catodo stesso; nella parte superiore del tubo c'è un dispositivo per la regolazione della pressione interna del gas e infine tra quest'ultimo dispositivo e l'anodo c'è un anticatodo. All'applicazione della differenza di potenziale tra anodo e catodo, dal catodo si genera un raggio di elettroni che, colpendo la piastrina dell'anodo, genera i raggi X; la superficie dell'anodo è regolata in modo che i raggi X si irradiano nelle parete laterale del tubo. La forma concava del catodo fa sì che gli elettroni



Tubo di Crookes a raggi X (Inv. 16, Armadio D3)



Schema di funzionamento del tubo ai raggi X:

K= catodo; A= anodo; U= generatore corrente continua.

(da: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/89/Roentgen-Roehre.svg>)

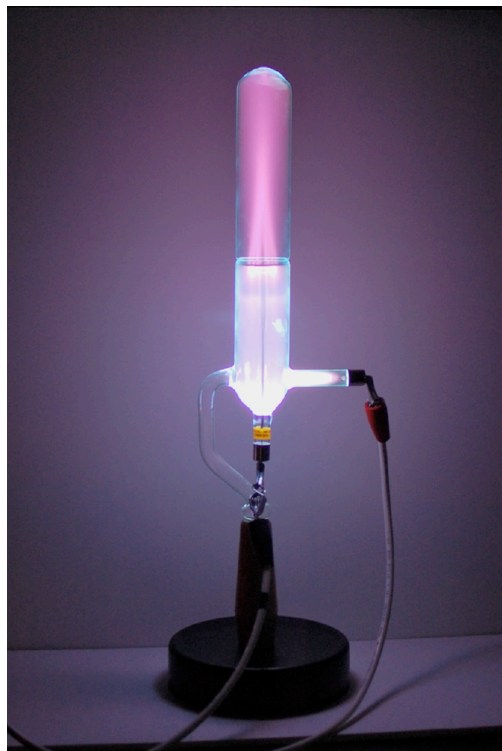
vengano focalizzati in una piccola macchia (circa 1 mm^2) sull' anodo, creando una sorgente quasi puntiforme di raggi X che danno origine a immagini più nitide. Il tubo ha un terzo elettrodo (un anticatodo collegato all'anodo) che aumenta l'intensità dei raggi X emessi, ma la modalità con cui questo è ottenuto non è del tutto compresa. Per far funzionare il tubo, un voltaggio (DC) di circa 100 kV viene applicato tra anodo e catodo. Questo voltaggio crea, e quindi accelera, nel gas a bassa pressione, un piccolo numero di ioni positivi; questi ioni positivi colpiscono altri atomi del gas provocando l'espulsione di elettroni da questi e creando altri ioni positivi in una reazione a catena. Tutti gli ioni positivi vengono attratti dal catodo: quando lo colpiscono provocano espulsione di elettroni dal metallo che, assieme agli elettroni espulsi dagli atomi del gas, vengono accelerati verso la piastra dell'anodo. Quando questi elettroni veloci colpiscono l'anodo provocano l'emissione di raggi X attraverso uno dei 2 processi: a) *Bremsstrahlung* o b) *fluorescenza a raggi X*.

Nel primo processo i raggi X derivano da elettroni che colpiscono l'anodo e da esso vengono rallentati: l'energia cinetica degli elettroni viene in parte convertita in radiazione elettromagnetica (raggi X). Nel secondo processo l'impatto degli elettroni con gli atomi dell'anodo ne provoca l'eccitazione elettronica; questi atomi eccitati, decadendo allo stato fondamentale, provocano un'emissione di fluorescenza a raggi X. Da notare che per evitare il surriscaldamento dell'anodo, quest'ultimo è dotato di un circuito di raffreddamento.

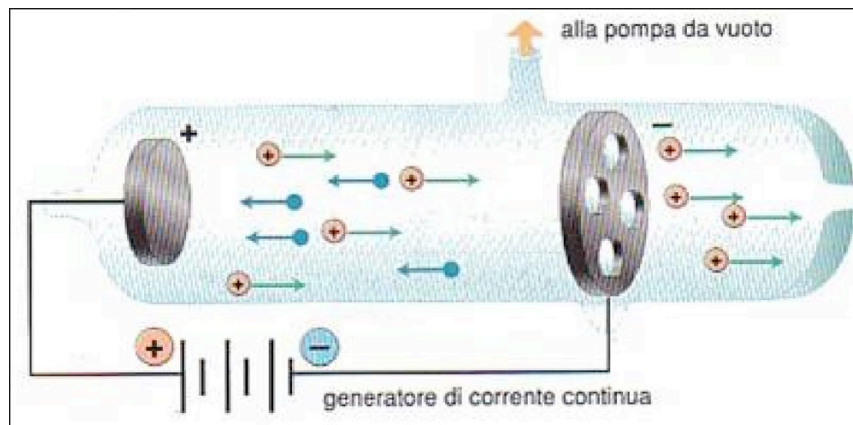
12. Tubo a raggi canale. Collegando l'elettrodo a tappo forato al polo negativo (catodo) e collegando uno dei due elettrodi a piastrina al polo positivo (anodo) si nota, oltre all'emissione di raggi catodici da parte del catodo, una formazione di pennelli violacei dai fori della piastrina catodica. Questi pennelli luminosi che si dissolvono poco più avanti, sono causati dalle molecole ionizzate positivamente del gas (raggi canale) che collidono con il gas residuo.



Tubo a raggi canale (Inv. 14, Armadio D3)



Tubo a raggi canale durante la scarica elettrica
(da: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/69/Anode_Ray_Tube.jpg)

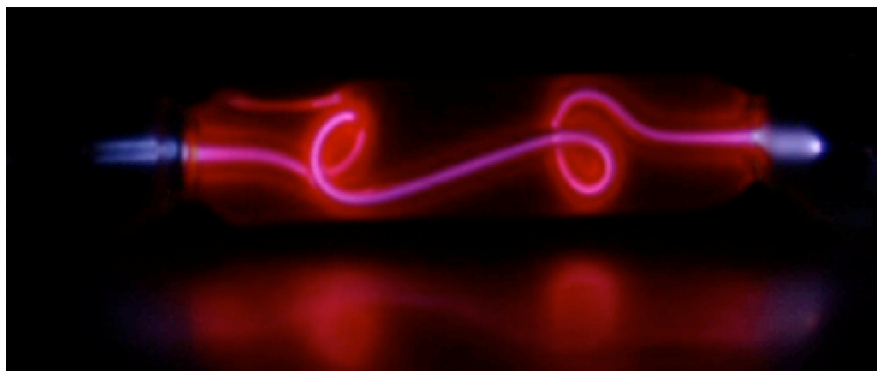


Schema di funzionamento di tubo a raggi canale
 (da: www.leonardoscienze.it/joomla/chimica/la-scoperta-delle-p...scoperta-elettro-ne-leonardoscienze.pdf)

ESPERIMENTI STORICI CON I TUBI A VUOTO

La scarica d'elettricità attraverso i gas è un fenomeno conosciuto fin dal XVIII secolo. L'apparecchiatura è costituita da un tubo di vetro con gas rarefatto, contenente due elettrodi ai quali è collegato un generatore d'alto potenziale, come un rocchetto di Ruhmkorff.

A metà del XIX secolo il fisico tedesco **Johann Heinrich Geissler** (1814-1879) descrisse la luminosità di scarica che riempie tutto il tubo a vuoto di qualsiasi forma esso sia. La forma della scarica elettrica si manifesta diversamente a seconda della pressione del gas presente nel tubo, creando zone di luce, più o meno intensa, intervallate da zone oscure. A pressione pari a circa 0,01 mm Hg ($1,33 \times 10^{-5}$ bar), il vetro opposto a catodo assume una fluorescenza verdastra, che cambia posizione sotto l'azione di un campo magnetico.



Tubo di Geissler durante la scarica elettrica (www.crtsite.com/page6-2.html)

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*.

(per un filmato dimostrativo: http://www.youtube.com/watch?v=Xt7ZWEDZ_GI
 vedere anche: www.leonardoscienze.it)

Ponendo un ostacolo a forma di diaframma, si ottiene una focalizzazione del fascio utile per evidenziare i fenomeni di deflessione magnetica. Questi raggi furono denominati "catodici" nel 1876 dal fisico tedesco **Eugen Goldstein** (1850-1930). (per un filmato dimostrativo: <http://www.youtube.com/watch?v=Sikzu09q6cc&feature=related>)

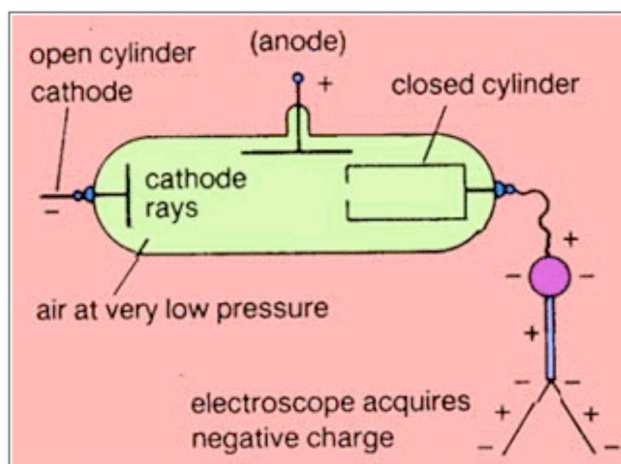
Nel 1879 il fisico inglese **William Crookes** (1832-1919) condusse nuovi esperimenti sull'azione meccanica e termica con diversi tubi a raggi catodici, tra i quali quello con mulinello rotante per evidenziare gli effetti meccanici e quello con all'interno una sottile lamina di platino resa incandescente dall'urto di raggi focalizzati per evidenziare gli effetti termici. Crookes concluse che i raggi catodici erano molecole del gas contenuto nel tubo che acquistavano carica negativa nell'urto con il catodo.

(per un filmato dimostrativo: <http://www.youtube.com/watch?v=yX2T4k-WySA&feature=related>)

Il fisico italiano **Augusto Righi** (1850-1920) studiò questi effetti meccanici riconducendoli in gran parte ad un effetto dovuto al riscaldamento del gas.

In contrapposizione alla teoria di Crookes, **Eugene Goldstein**, seguito da Wiedemann e Hertz, affermò che i raggi catodici erano assimilabili ad un tipo d'onda eterea, come la luce. I teorici tedeschi sostenitori della teoria ondulatoria dei raggi catodici si basarono anche su uno studio compiuto nel 1883 dal fisico tedesco **Heinrich Hertz** (1857-1894), secondo il quale se i raggi catodici fossero stati costituiti da particelle cariche negativamente, avrebbero dovuto subire una deflessione elettrostatica, come previsto dalla teoria di Maxwell.

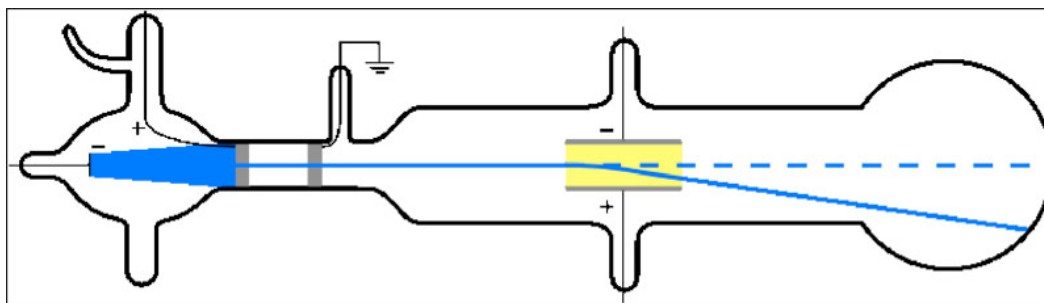
Nel 1897 il fisico francese **Jean Perrin** (1870-1942) costruì un tubo a raggi catodici con un raccogliitore di carica per dimostrare, attraverso l'elettrizzazione del raccogliitore rivelata da un elettroscopio, il trasporto di carica negativa da parte dei raggi catodici.



Schema di funzionamento del tubo di Perrin

(da: <http://schools.cbe.ab.ca/b858/dept/sci/teacher/zubot/phys30notes/investnurays/investnurays.htm>)

Nel 1897 il fisico inglese **John Joseph Thomson** (1856-1940), per risolvere il problema sollevato da Hertz, costruì un tubo speciale con un catodo a piastrina per l'emissione di raggi catodici e un anodo costituito da due cilindretti metallici, ciascuno avente una fessura. I raggi catodici passano attraverso due lastrine d'alluminio, cui è applicata una tensione per deflettere il fascio. Essi arrivano, infine all'estremità del tubo, generando una macchia di fluorescenza sul vetro.

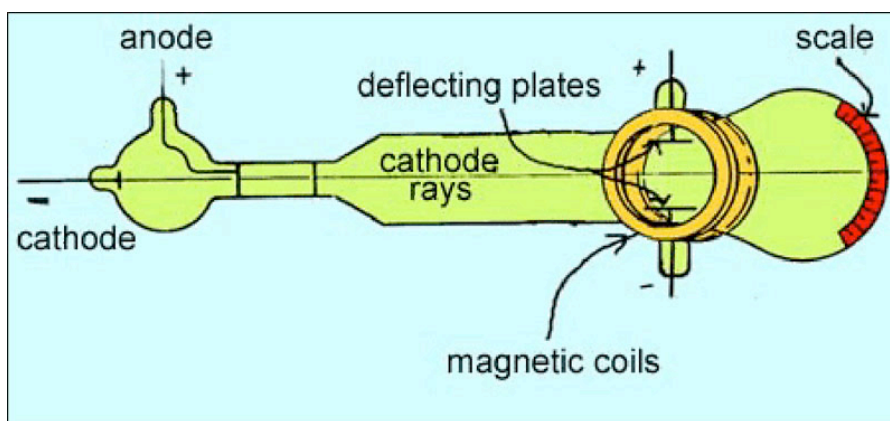


Tubo di Thomson con raggi catodici deviati da un campo elettrico.

(da: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:JJ_Thomson_Cathode_Ray_Tube_2.png)

Dai risultati di questo esperimento Thomson concluse che *i raggi catodici sono costituiti da particelle cariche negativamente*. Thomson eseguì esperimenti per misurare il rapporto tra la massa e la carica di queste particelle. Il principale esperimento è basato sulla misura della deflessione magnetica stimando la velocità delle particelle dall'entità della controdeflessione elettrica.

Il valore di $e/m = 0,7 \times 10^{11}$ C/kg trovato da Thomson risultò indipendente dalla natura del gas e del metallo del catodo. Con queste prove sperimentali Thomson poté dimostrare, in maniera inconfutabile, che il raggio catodico non era composto da frammenti ionici di atomi, ma da particelle universali contenute in tutti gli elementi, alle quali venne poi dato il nome di *elettroni* (proposto nel 1891 dall'irlandese G. J. Stoney per l'unità di carica elettrica negativa).

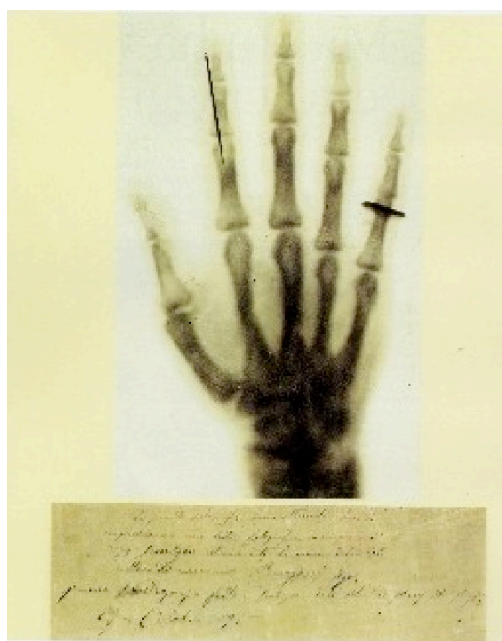


Tubo di Thomson con raggi catodici devianti da un campo magnetico, controdeflessi da un campo elettrico.

(da: <http://schools.cbe.ab.ca/b858/dept/sci/teacher/zubot/phys30notes/investnurays/investnurays.htm>)

Thomson usò per i raggi catodici il termine “corpuscoli” fino a quando un suo allievo, **Ernest Rutherford** (1871-1937), li chiamò *elettroni* (1902), riprendendo la definizione di Stoney.

Nel 1895 **Wilhelm Conrad Röntgen** (1845-1923) trovò che, quando i raggi catodici incidono sul vetro del tubo o su parti metalliche interne al tubo, si produce una nuova radiazione altamente penetrante e invisibile ad occhio nudo, a cui diede il nome dei *raggi X*. Questi, a differenza dei raggi catodici, potevano attraversare la materia, impressionando selettivamente schermi fluorescenti o lastre fotografiche.

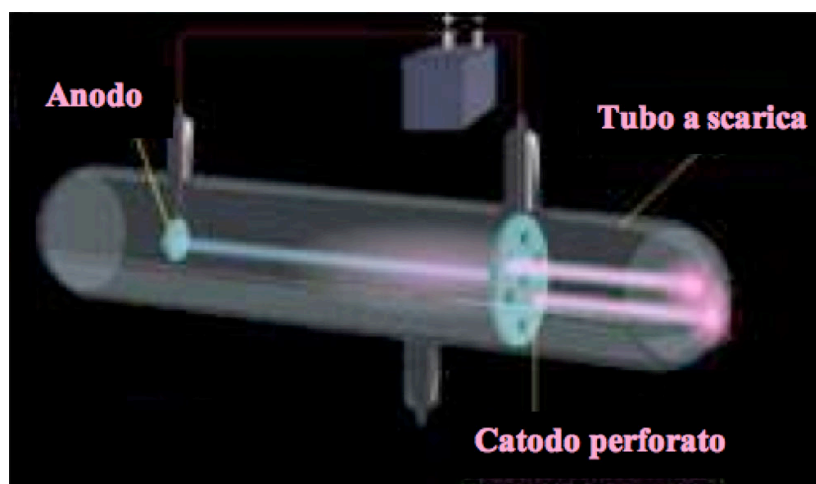


Radiografia a raggi X eseguita dal Prof. Augusto Righi
(da: <http://www.scienzagiovane.unibo.it/favole/tac/raggix.html>)



Foto di esperimento ai raggi X con uno dei primi tubi di Crookes, alla fine del 1800. L'uomo in piedi sta esaminando l'immagine delle ossa della sua mano con un fluoroscopio, mentre quello seduto sta radiografando la sua mano su una lastra fotografica. Nessuna precauzione veniva presa contro l'esposizione ai raggi X, perché a quel tempo non ne era nota la pericolosità. (http://en.wikipedia.org/wiki/File:Crookes_tube_xray_experiment.jpg)

A fianco della ricerca sui raggi catodici, si ha la scoperta già dal 1886 da parte di Goldstein dei **raggi canale**. I raggi canale hanno carica positiva, essendo costituiti dalle molecole ionizzate del gas, che si manifestano in presenza di catodi perforati, applicando una scarica elettrica ad alto potenziale tra anodo e catodo perforato.



Funzionamento di un tubo a raggi canale (www.chimica-online)

Bibliografie utili:

- <http://www.crtsite.com/>
The Cathode Ray Tube Site (sito valido per molti tipi di tubi a raggi catodici)
- <http://bagliorinelvuoto.scienze.unipd.it/documenti.html>
Dal fosforo mercuriale ai tubi di Crookes.
- <http://www.leonardoscienze.it/joomla/chimica/la-scoperta-delle-particelle>
I tubi catodici e la scoperta dell'elettrone.