Ionizzazione nei gas

con dimostrazione sperimentale

Andrea Fontana
Alessia Embriaco

INFN Sezione di Pavia
Dipartimento di Fisica
Università di Pavia

Incontri del Martedì (Lunedì, 6 Marzo 2017)

Argomenti

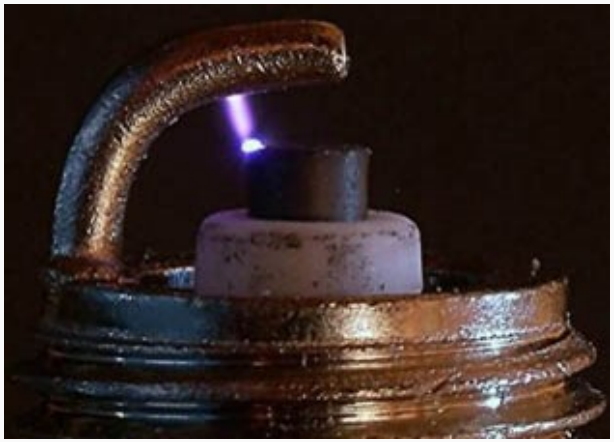
- I parte (teorica)
  - Conduzione elettrica nei gas.
  - Gas a bassa pressione: vuoto ed elettricita'.
  - Scoperta dell' elettrone: raggi catodici e raggi canale.

- II parte (sperimentale)
  - Tubo a scarica: fenomenologia
  - Tubo a scarica: esperienza

L’ aria e’ un isolante o un conduttore?

- isolante: perche’ a circuito aperto una batteria non si scarica?

- conduttore: come si accende un motore a scoppio (benzina)?



Conduzione elettrica nei gas

L'aria ed i gas sono generalmente isolanti, ma in alcuni casi possono diventare conduttori.

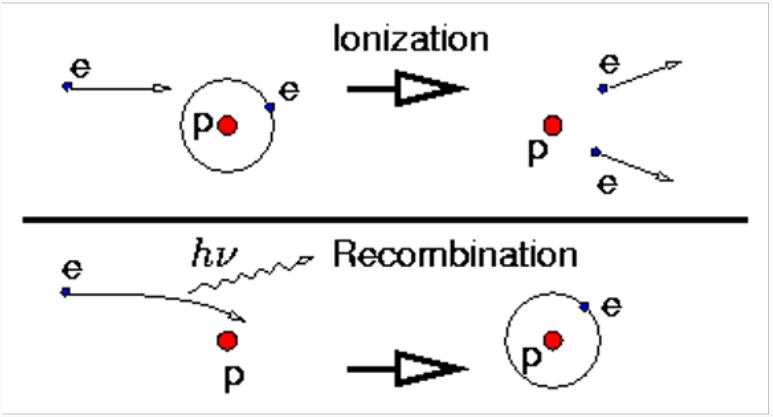
Un gas, in condizioni normali, è costituito da molecole allo stato neutro e quindi non può condurre elettricità, comportandosi così da isolante perfetto.

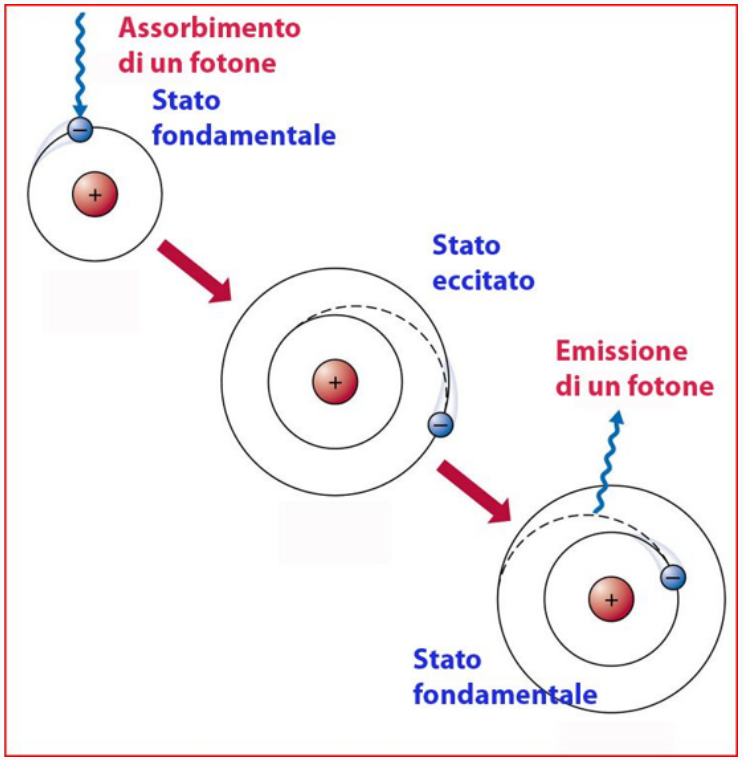
Particolari agenti esterni, investendo le molecole neutre del gas, strappano uno o più elettroni tra quelli più esterni e trasformano le molecole neutre in ioni positivi. Gli elettroni perduti possono anche essere catturati da molecole neutre che si trasformano così in ioni negativi.

Si generano in tal modo, nel gas, ioni positivi, ioni negativi ed elettroni. L'aria atmosferica, anche in condizioni normali, contiene molecole ionizzate che la rendono debolmente conduttrice.

La scarica elettrica attraverso un gas qualsiasi produce in determinate condizioni anche fenomeni luminosi.

Ionizzazione e eccitazione





Curva caratteristica della scarica nel gas

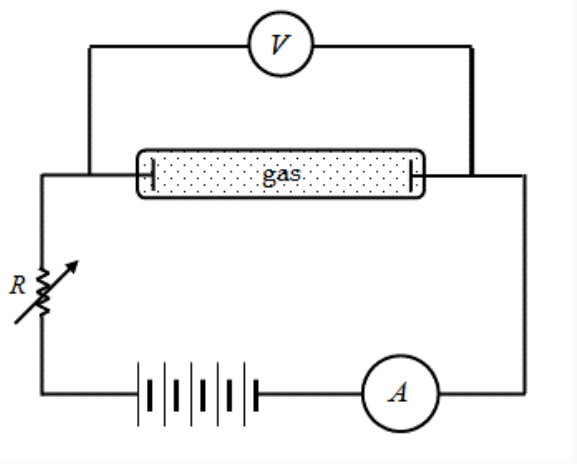
La produzione di ioni per urti determina una **corrente elettrica** tra i due elettrodi (scarica) rappresentabile come funzione della **differenza di potenziale** ΔV:

$$\Delta V = \Delta V(I)$$

detta caratteristica del tubo a scarica.

N.B. **Nei gas non vale la legge di Ohm** $\Delta V = RI$.

La curva caratteristica può essere ottenuta sperimentalmente con un voltmetro, in parallelo con il tubo alimentato da una data f.e.m. costante attraverso una resistenza modulabile (reostato) in serie.

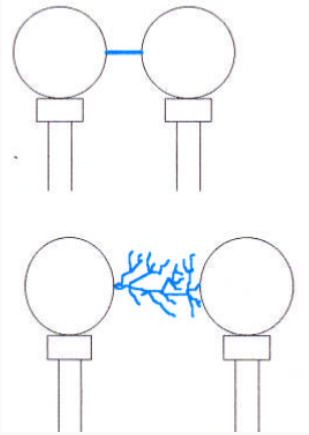


Agenti ionizzanti

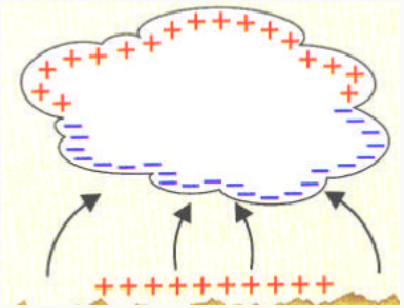
1. Ionizzazione per urto: se le molecole nel loro movimento hanno sufficiente energia cinetica, possono urtare con altre molecole formando ioni positivi e negativi.
2. Ionizzazione termica: una sorgente calda è costituita da molecole dotate di elevata mobilità. Un gas portato ad altissima temperatura risulta conduttore.
3. Ionizzazione per elettroni liberi: raggi β, o gli elettroni liberati dall'incandescenza di una sorgente, e detti termoelettroni, possono urtare le molecole, generando ioni positivi o formando ioni negativi.
4. Ionizzazione per radiazione elettromagnetica: raggi ultravioletti, i raggi X e γ possono espellere degli elettroni dalle molecole e si hanno così ioni positivi ed elettroni liberi che nel loro cammino si fissano ad altre molecole neutre, creando ioni negativi.

Esempi

Questi processi possono produrre sia ionizzazione sia eccitazione di molecole neutre.

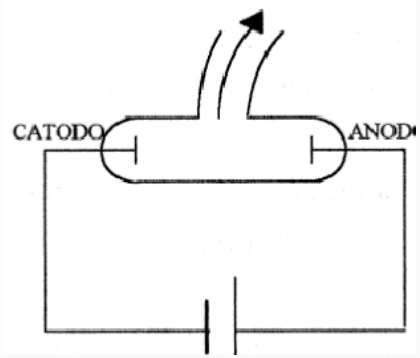


- scintilla: con tensione superiore a un valore d' innesco V_i si ha emissione di luce in corrispondenza della scarica. Per valori opportuni di pressione e di distanza, la scintilla può avere forma rettilinea o ramificata a zig-zag.
- fulmine: un particolare tipo di scintilla è la scarica che avviene tra una nube temporalesca e la Terra. Richiede una d.d.p. tra nuvola e Terra si produce di alcune centinaia di milioni di Volt.



Tubo a vuoto

Si consideri un tubo con 2 elettrodi collegato ad una **pompa pneumatica** che permette di ridurre progressivamente la pressione del gas in esso contenuto.



L'elettrodo collegato al polo positivo prende il nome di **anodo**, mentre quello collegato al polo negativo prende il nome di **catodo**.

Gli ioni, come abbiamo detto, vengono accelerati dalla d.d.p. V esistente tra gli elettrodi.

A pressione ordinaria il loro **cammino libero** è molto breve, poiché incontrandosi con altre molecole, vengono subito rallentati.

Tubo a vuoto

Diminuendo la pressione del gas, il numero di molecole presenti nel tubo va gradatamente diminuendo, cosicché gli ioni accelerati dalla tensione possono compiere un tragitto più lungo prima di incontrare altre molecole.

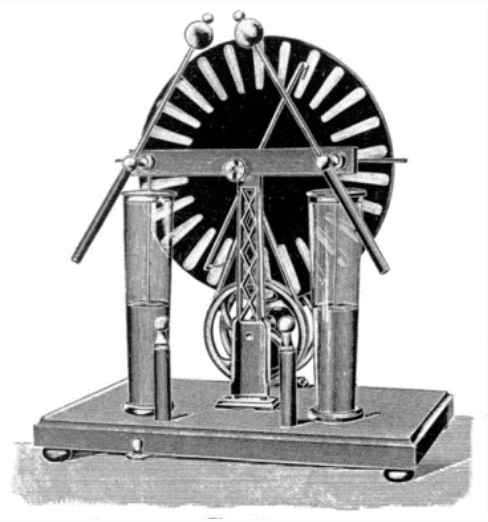
Pertanto la loro velocità aumenta e l'energia cinetica, al momento dell' urto, è sufficiente a provocare la ionizzazione delle molecole che incontra. Quindi, con la rarefazione, i pochi ioni presenti possono generare un numero notevole di ioni e quindi far aumentare la conducibilità del gas.

Curva caratteristica: una funzione complicata, ma interessante...

$$\Delta V = \Delta V(I, P, d, ...)$$

Ma facciamo un passo indietro...

Fenomeni di scariche elettriche in gas sono noti all' uomo da molto tempo, ma solo dalla seconda metà dell' 800 i fisici ne hanno compreso la natura e oggi noi vi conviviamo senza problemi...

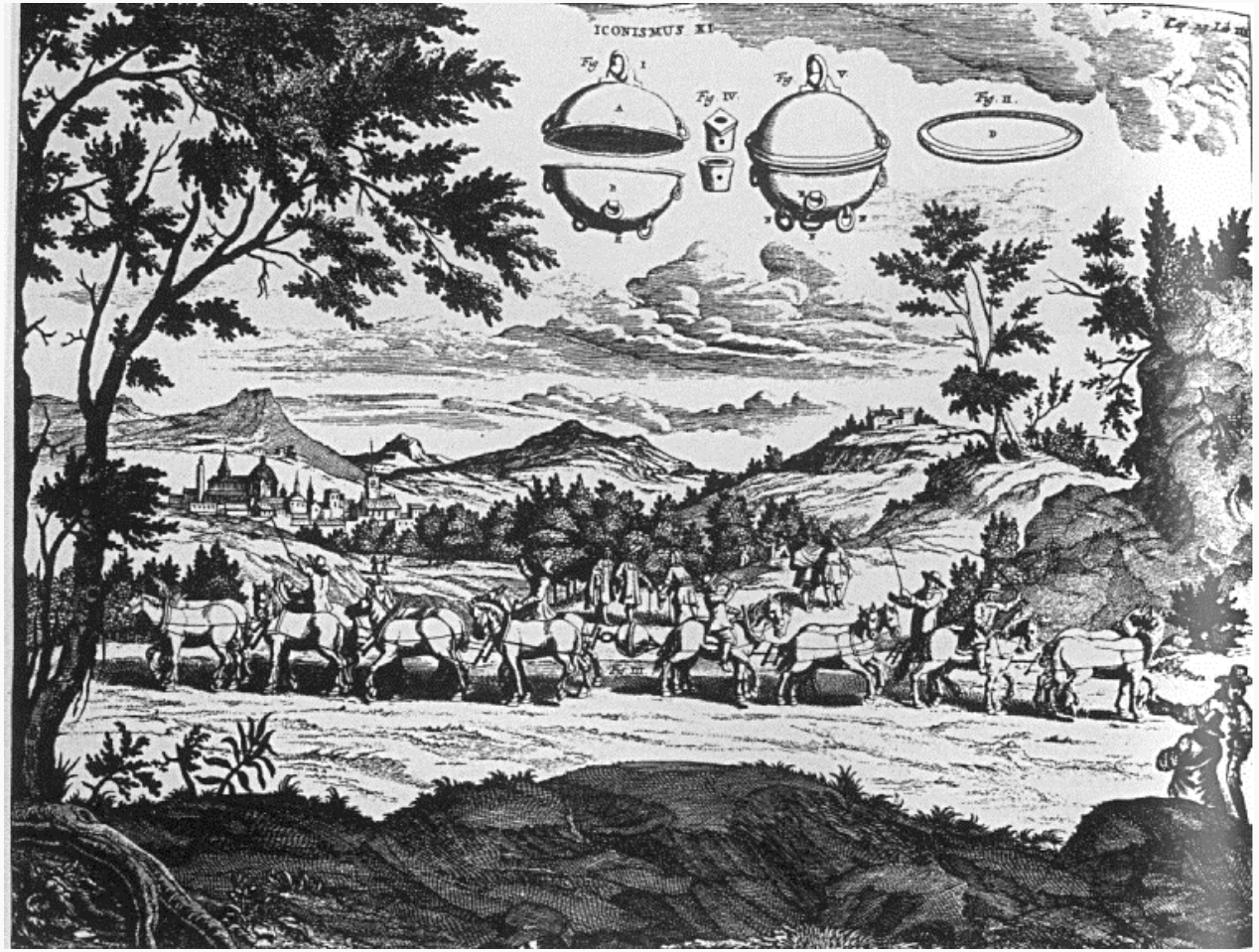


Due "tecnologie" dovettero essere sviluppate affinché si potesse studiare la conduzione elettrica nei gas e scoprire la ionizzazione:

- la tecnologia del vuoto
- la tecnologia dell' elettricità

Lungo e affascinante percorso dal barometro (1643) all'elettrone (1897)...

Il vuoto



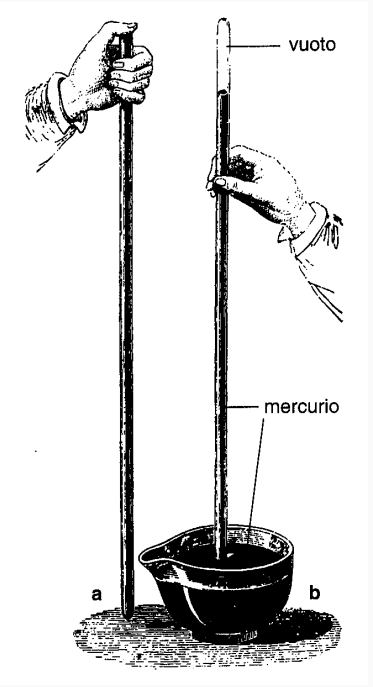
Esperienza di Magdeburgo di Otto von Guericke (1655).

Il ”fosforo mercuriale”

Spostando un barometro (inventato da Torricelli nel 1643), Jean Picard nota un curioso bagliore al di sopra della colonna di mercurio (1676).

Anche Johann Bernoulli si interessa al fenomeno e mostra che la luminescenza è legata al moto del mercurio e al grado di rarefazione (1700).

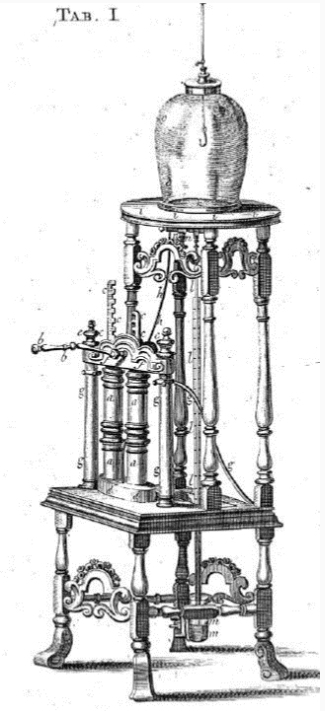
I misteriosi bagliori, che diventano noti con il nome di ”fosforo mercuriale”, vengono studiati da Francis Hauksbee (1705-1709).



La pompa di Hauksbee

Hauksbee inventa la pompa pneumatica a due cilindri nel 1703 e scopre che il mercurio non è affatto indispensabile per ottenere i bagliori: strofinando infatti in aria rarefatta corpi vari, come l' ambra o il vetro, con un panno di lana si ottengono gli stessi effetti luminosi.

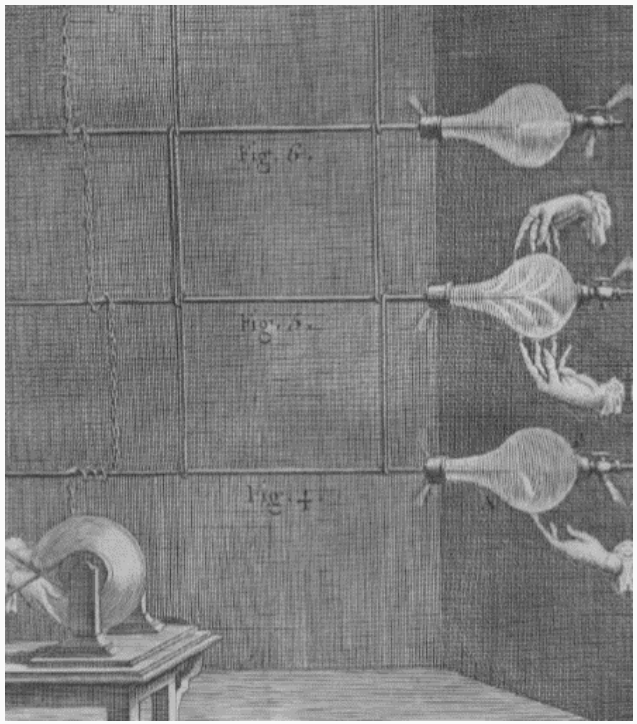
Hauksbee considera come ben distinti l' elettricità e i "bagliori": entrambi si ottengono per strofinio ma si verificano secondo lui in condizioni diverse, l' uno nel vuoto (parziale) e l' altro in presenza di aria.



Nuovi esperimenti

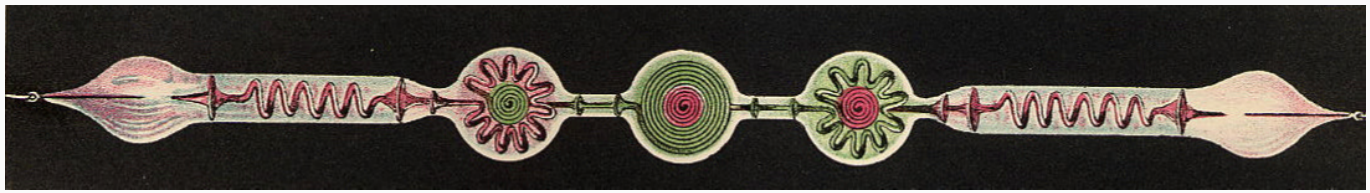
Durante il XVIII secolo diversi esperimenti convincono la comunità scientifica che i ”bagliori” sono di natura elettrica, ossia scariche elettriche in aria rarefatta.

Vengono costruiti nuovi strumenti per studiare i ”bagliori”: recipienti di vetro in cui si rarefa l’ aria e che vengono collegati alla macchina elettrostatica.



Bagliori nel vuoto

Geissler, utilizzando la sua nuova pompa da vuoto a mercurio, riesce a costruire i cosiddetti tubi di Geissler, piccoli tubi di vetro contenenti gas molto rarefatti per l' epoca, all' interno dei quali penetrano due elettrodi (1857).



I bagliori nel vuoto diventano uno dei settori di punta della fisica e le scoperte si moltiplicano.

Nuove scoperte

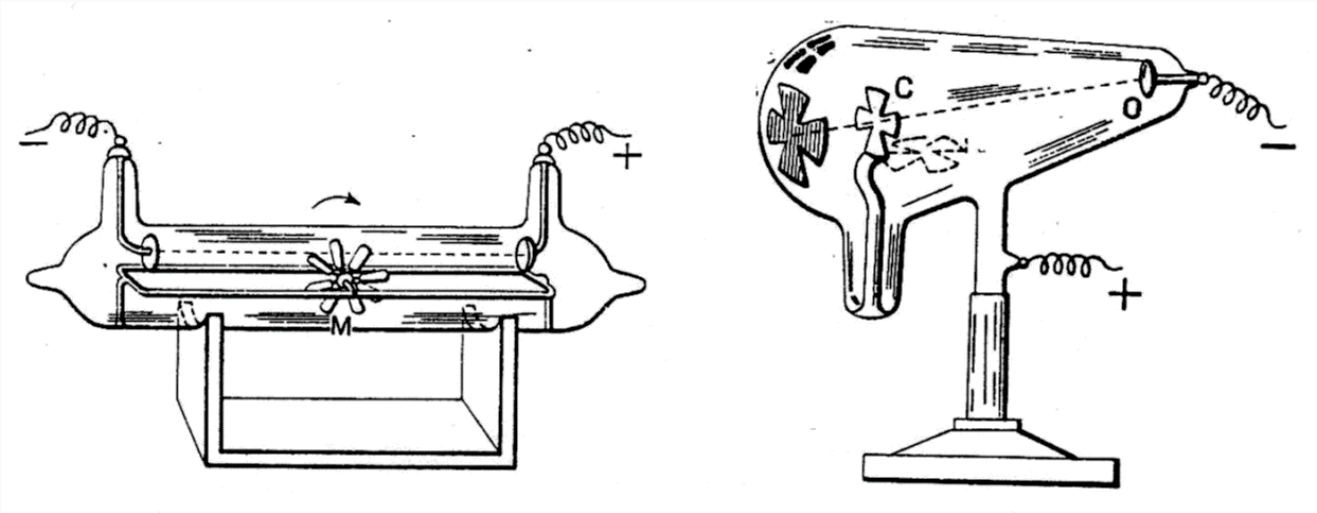
Hittorf stabilisce per la prima volta che quelli che lui chiamava ”Glimmstrahlen” (”raggi splendenti o balenanti”) vengono emessi dal catodo seguendo poi traiettorie rettilinee (1869).

Eugen Goldstein introduce il termine ancora oggi in uso di ”raggi catodici” (1876).

William Crookes studia le proprietà dei raggi catodici a gradi di vuoto dell’ordine di 1/1000 mm di mercurio. Effettua diverse scoperte con i tubi da lui ideati, detti appunto tubi di Crookes (1879).

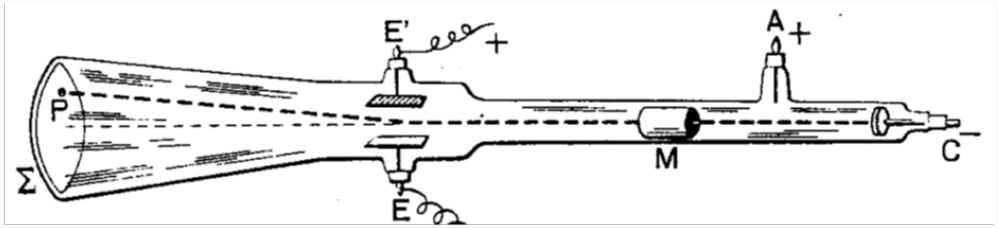
Raggi catodici

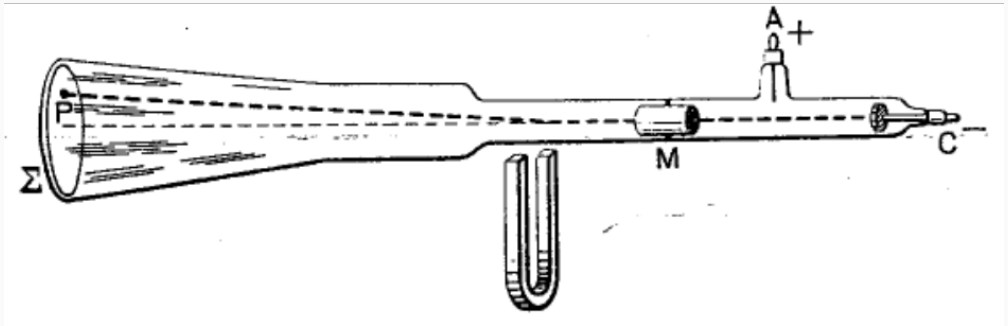
- I raggi catodici partono dal catodo ed hanno effetto meccanico, in realtà termico (vedi radiometro di Crookes).
- I raggi catodici si propagano in linea retta e sono arrestati da ostacoli.



Raggi catodici

- I raggi catodici sono particelle che portano una carica negativa. Inoltre sono deviati da un campo elettrico e da un campo magnetico.





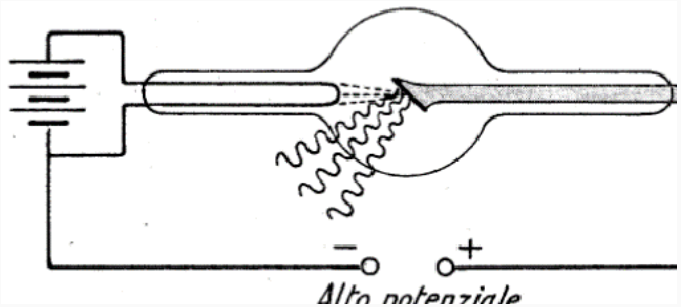
Raggi anodici

Anche dall' anodo di un tubo a vuoto molto spinto partono dei raggi la cui esistenza fu dimostrata da Goldstein con il tubo rappresentato in figura.

Da esperienze analoghe a quelle eseguite per i raggi catodici risultò che essi sono dovuti a corpuscoli con carica positiva uguale o multipla dell'elettrone e vennero identificati come ioni positivi del gas rarefatto.

Raggi X

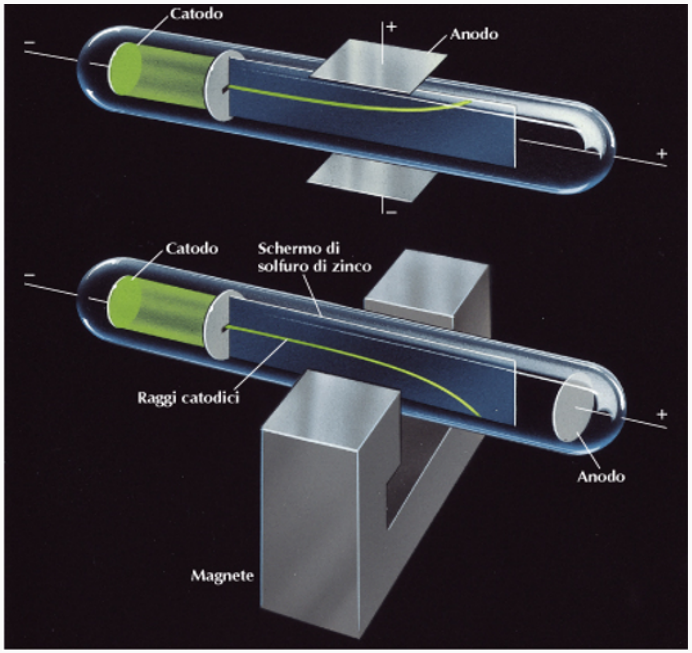
In altissimo vuoto un fascio di raggi catodici, con d.d.p. dell'ordine di qualche decina di migliaia di volt, urta una piastrina metallica di tungsteno collegata con l'anodo: i raggi catodici vengono assorbiti dalla piastrina e che, in loro vece, dalla superficie della piastrina stessa, vengono emessi raggi di natura totalmente diversa da quella dei raggi incidenti.

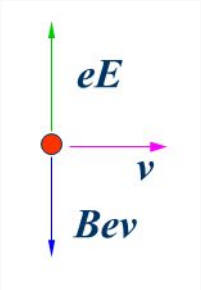


Tali raggi furono scoperti nel 1895 dal fisico tedesco Wilhelm Röntgen, che li denominò raggi X per indicarne la natura misteriosa.

Esperimento di Thomson

Thomson nel 1897, tramite un tubo catodico, in cui le particelle cariche (elettroni) possono essere accelerate, si propose di misurare il rapporto tra la carica (e) e la sua massa (m), cioè: e/m.

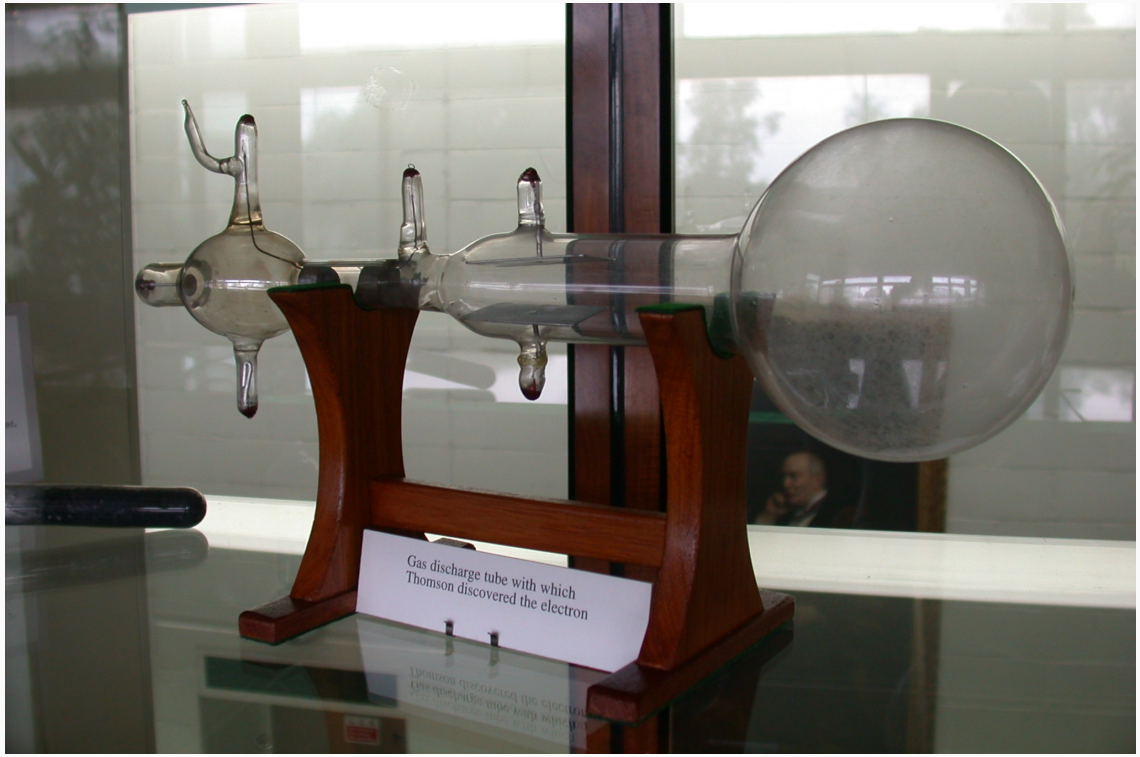




- con $F_E = F_B$: $eE = evB \rightarrow v = \frac{E}{B}$
- con $E = 0$: $evB = \frac{mv^2}{2} \rightarrow \frac{e}{m} = \frac{E}{B^2 r}$ dove r è il raggio di curvatura
- Risulta che:

$$\boxed{\frac{e}{m} = 1.76 \times 10^{11} \frac{C}{Kg}}$$

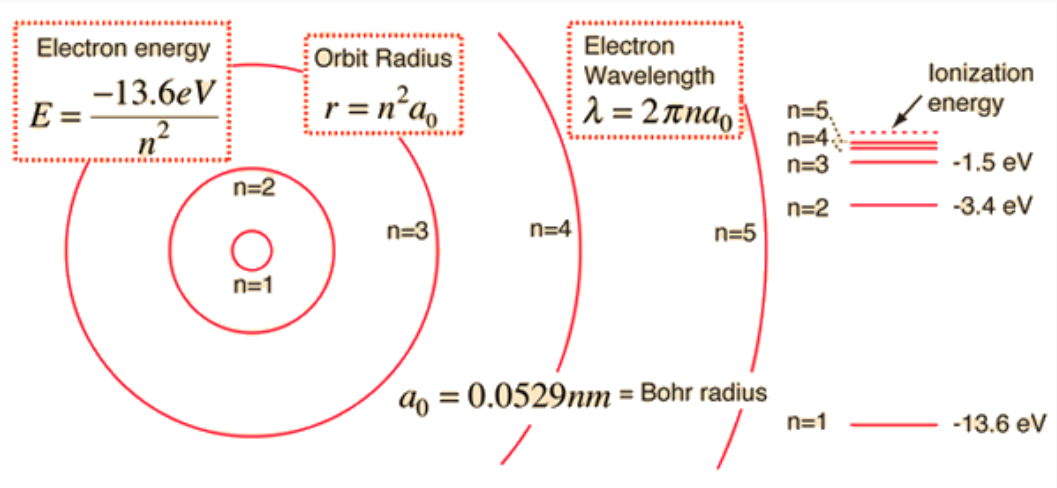
Esperimento di Thomson

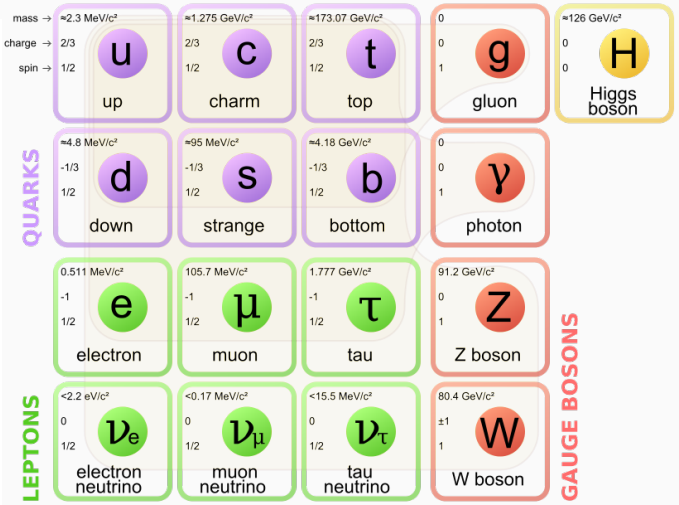


Il tubo originale presso il Cavendish Laboratory (Cambridge).

L’ elettrone

Questa misura portò allo sviluppo dei primi modelli atomici e alla nascita della **Fisica Moderna**.



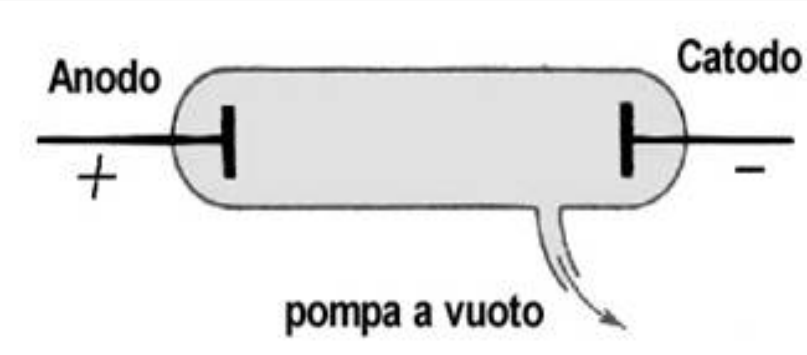


Conduzione nei gas

Torniamo allo studio della curva caratteristica di un gas:

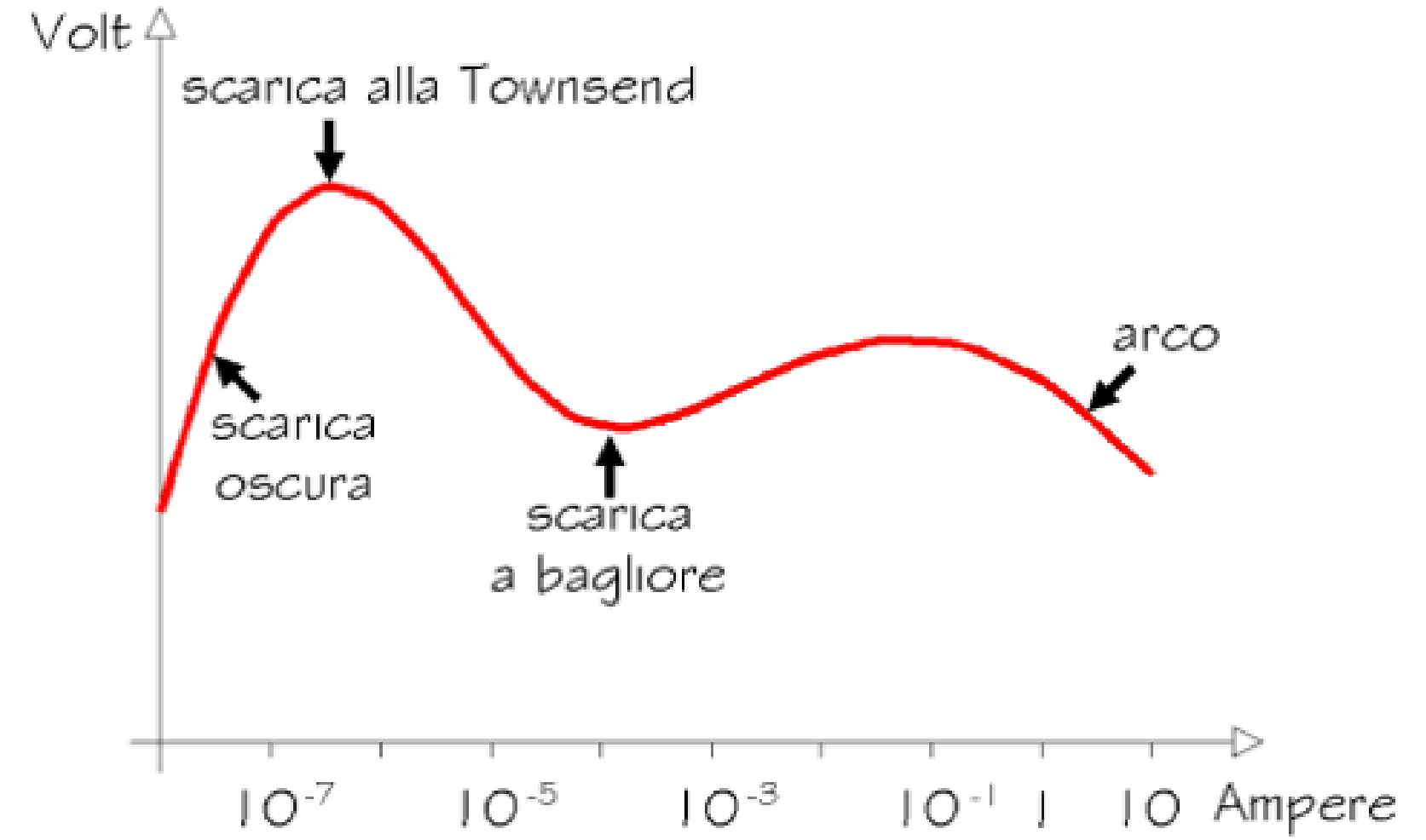
$$\Delta V = \Delta V(I, P, d, ...)$$

con il circuito in figura e la possibilità di variare la pressione del gas:



$$\Delta V \sim 2000 \text{ V}$$
$$10^{-2} \text{ mbar} < p < 1 \text{ mbar}$$

Curva caratteristica



Qualitativamente si osservano quattro tratti distinti.

Primo tratto

- Andamento quasi lineare a comportamento ohmico, con piccole variazioni di corrente anche per grandi variazioni di potenziale;
- Corrente non autonoma ($10^{-8} - 10^{-6}A$), formata prevalentemente dagli ioni primari prodotti dagli elettroni liberi;
- Energia degli ioni non sufficiente a ionizzare o eccitare altri atomi;
- La scarica non emette luce, per cui è detta oscura.

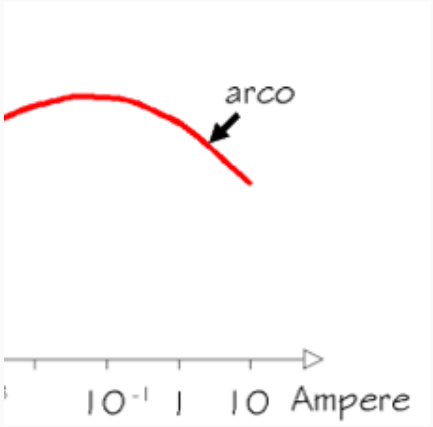
Secondo tratto

- La corrente elettrica ($10^{-6} - 10^{-5}A$) è aumentata a tal punto da generare ioni secondari, alimentandosi in modo autonomo (scarica Townsend);
- Aumento di ionizzazione ed eccitazione con conseguente diseccitazione ed emissione di luce (regime di luminescenza).

Terzo tratto

- Ionizzazione con processo a valanga;
- Ulteriore aumento della corrente ($10^{-5} - 10^{-3}A$) e diminuzione della differenza di potenziale tra gli elettrodi.
- Accumulo di cariche di segno opposto in prossimità degli elettrodi, che alterano l'andamento del campo elettrico.
- Accumulo di carica spaziale positiva che occupa gran parte del volume a disposizione.

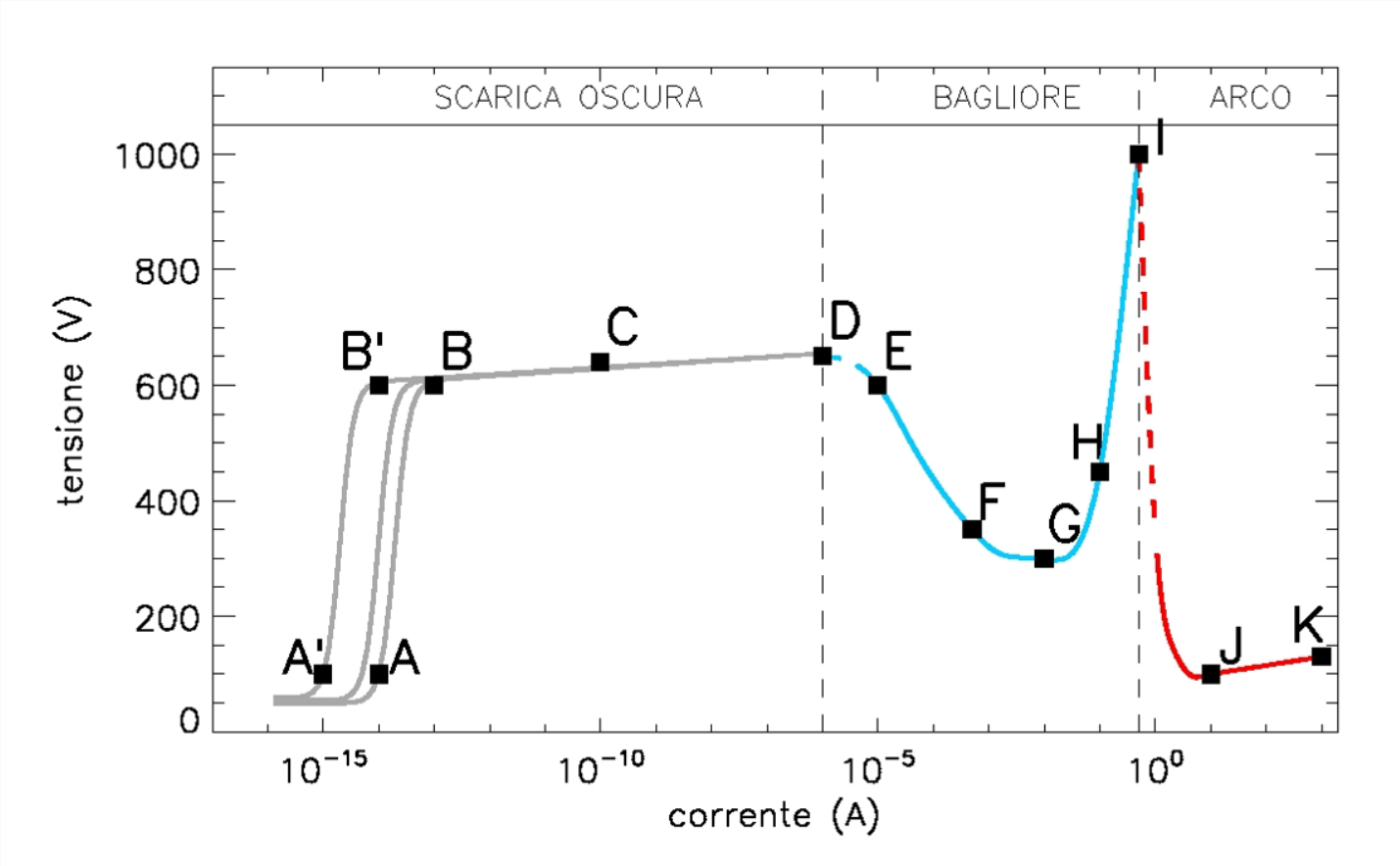
Quarto tratto



- Ulteriore aumento della corrente (> 1 A);
- Scarica ad arco alla quale concorrono gli elettroni emessi per effetto termoionico dal catodo riscaldato fino a 900 °C per l' impatto con gli ioni positivi;
- Diminuzione della tensione.

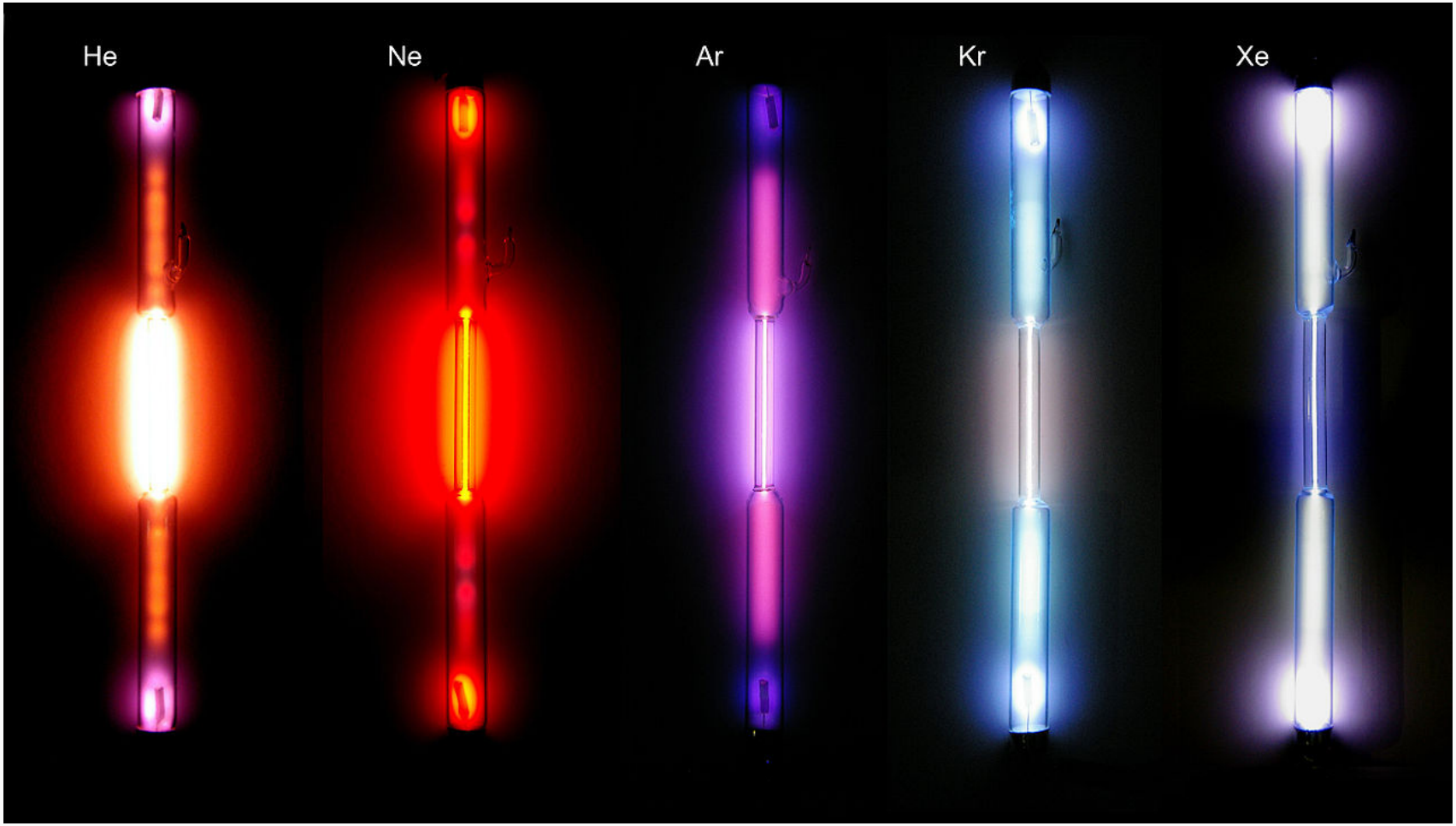
Curva caratteristica

Riassumendo...

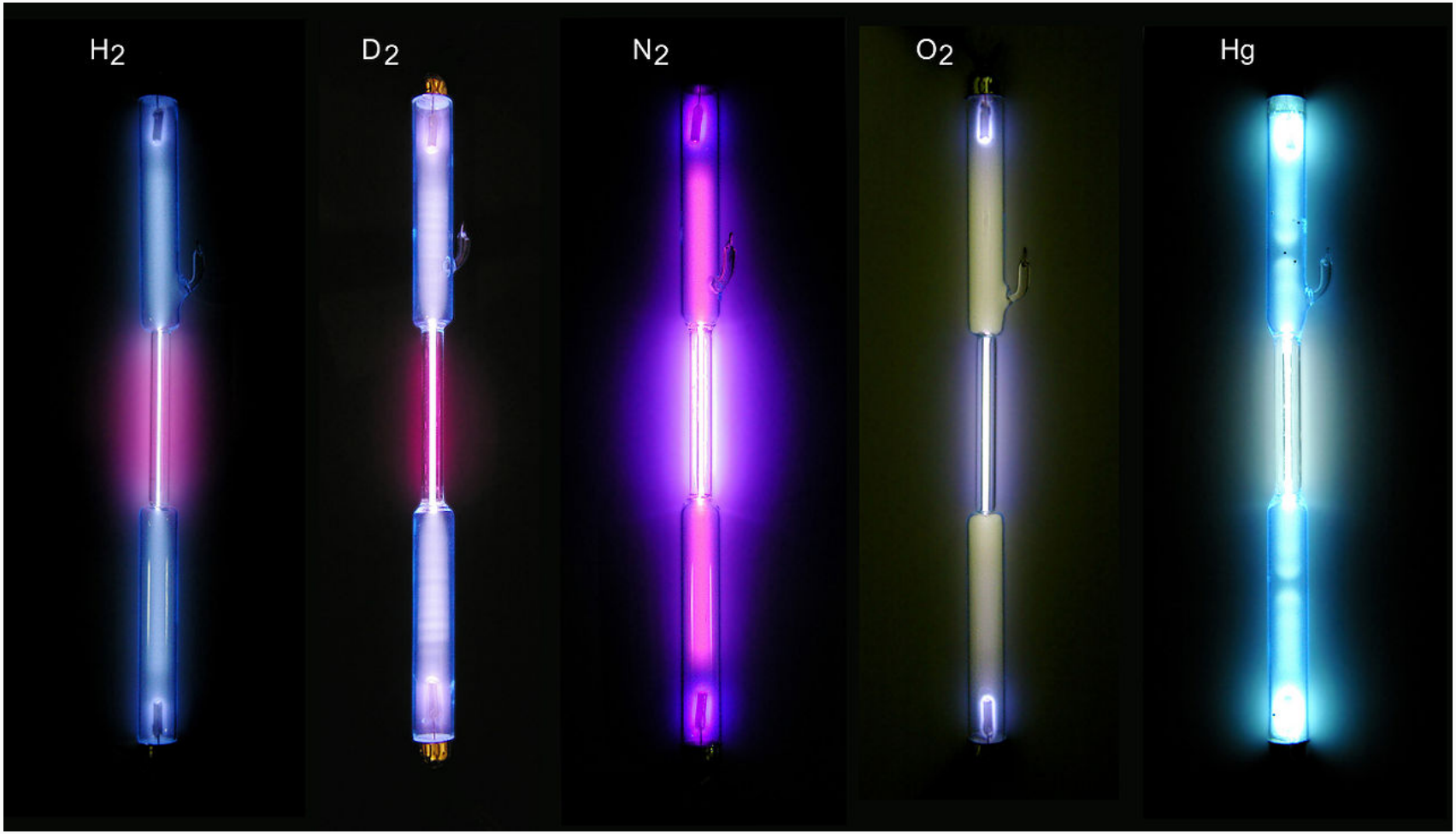


Curva caratteristica di un tubo al Neon, pressione 1 torr, con due elettrodi a disco di 2 cm di diametro, separati di 50 cm.

Effetti luminosi in gas diversi



Effetti luminosi in gas diversi



Studi sperimentali

- Libero cammino medio e pressione;
- ”Onde di ionizzazione”;
- Verifica della legge di Paschen;

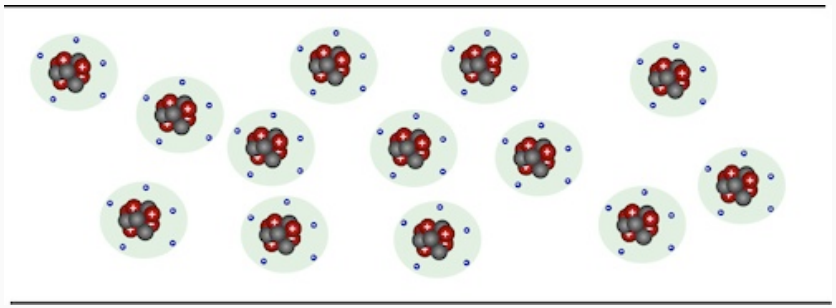
- Effetto di magneti;
- Studio di spettri luminosi;
- ...

Investigating spontaneous gas discharge in air as a function of pressure

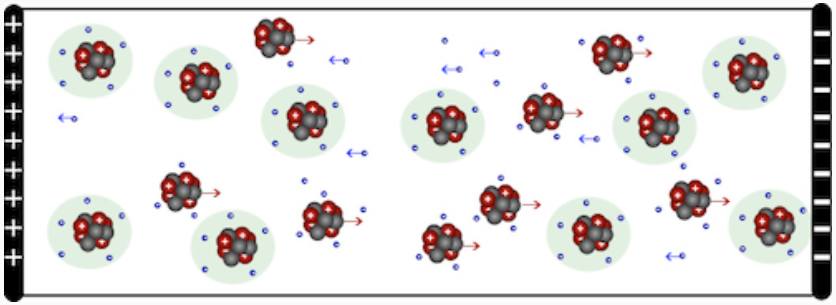
Objects of the experiments

- Observing spontaneous gas discharge in air as a function of pressure.
- Measuring the high voltage from the current-limited high-voltage power supply as a function of pressure.

Effetto del potenziale

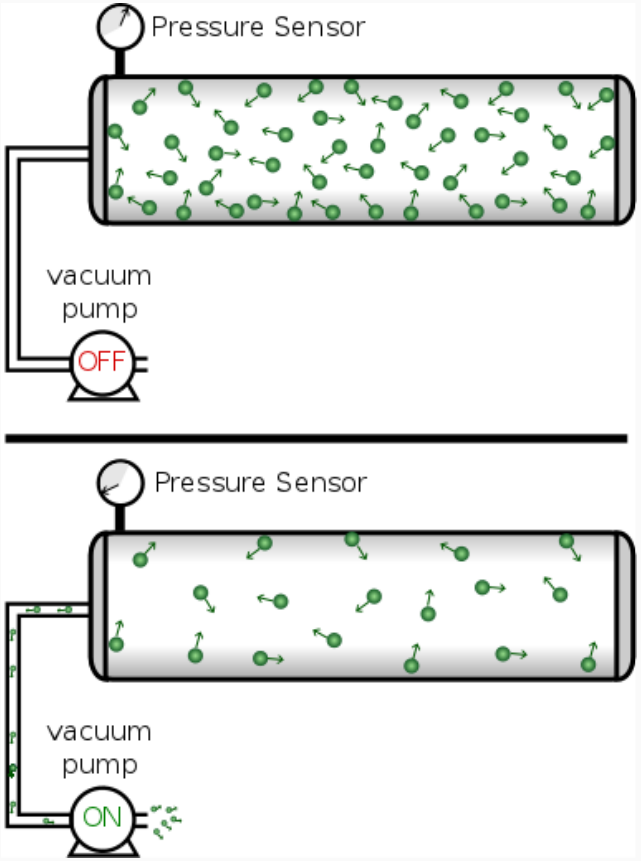


Gli ioni vengono accelerati dalla ΔV tra gli elettrodi.



Effetto della pressione

L'aspetto della scarica nel gas varia con la pressione del gas:



- A pressione ambiente il cammino libero degli ioni è molto breve, poiché incontrandosi con altre molecole, vengono subito frenati.
- Diminuendo la pressione, il numero di molecole nel tubo diminuisce e gli ioni accelerati possono compiere un tragitto più lungo prima di urtare altre molecole. Pertanto la loro velocità aumenta e l'energia cinetica, al momento dell'urto, è sufficiente a provocare la ionizzazione delle molecole che incontra.

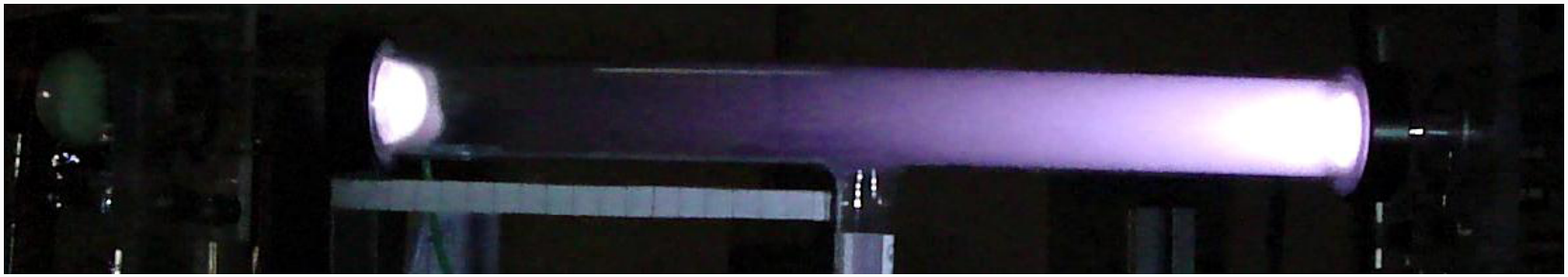
Osservazione della scarica

La pompa a vuoto viene spenta quando $p \sim 10^{-2}$ mbar.

- Inizialmente come si ci aspetta, non si nota alcun effetto luminoso.
- $p \sim 1.2 \cdot 10^{-1}$mbar: la superficie davanti all'anodo inizia a ricoprirsi di un sottile strato luminoso, in prossimità del catodo si forma una luminiscenza diffusa. L'estremità dietro all'anodo diventa fluorescente.

Osservazione della scarica

- $p \sim 3.2 \cdot 10^{-1}$mbar: davanti all'anodo si ha una luminescenza diffusa che occupa oltre metà del tubo.
  Sull'anodo inizia a formarsi il primo anello luminoso, dovuto all'eccitazione indotta da elettroni secondari emessi per ionizzazione.



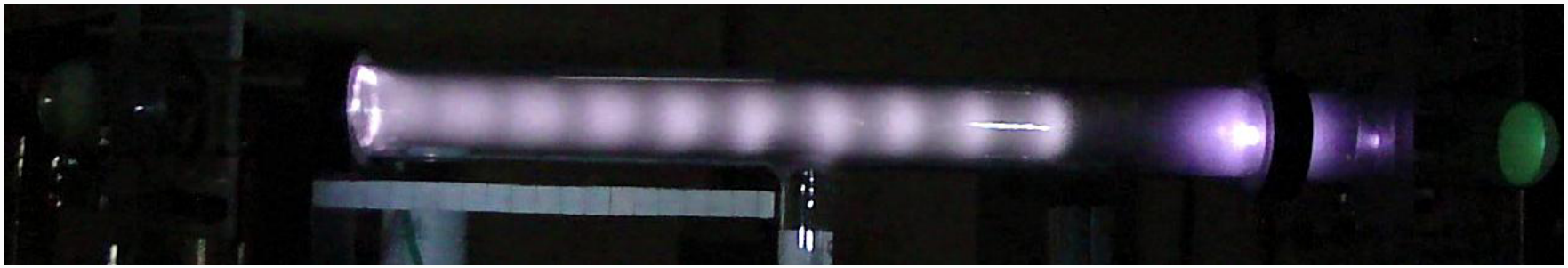
Osservazione della scarica

- $p \sim 5.3 \cdot 10^{-1}$mbar: permane il bagliore intenso davanti al catodo. Sull'anodo compaiono diversi anelli luminosi dalla tipica forma a "mushroom".

Man mano che si formano gli anelli, la distanza tra di essi, proporzionale al libero cammino medio, diminuisce.

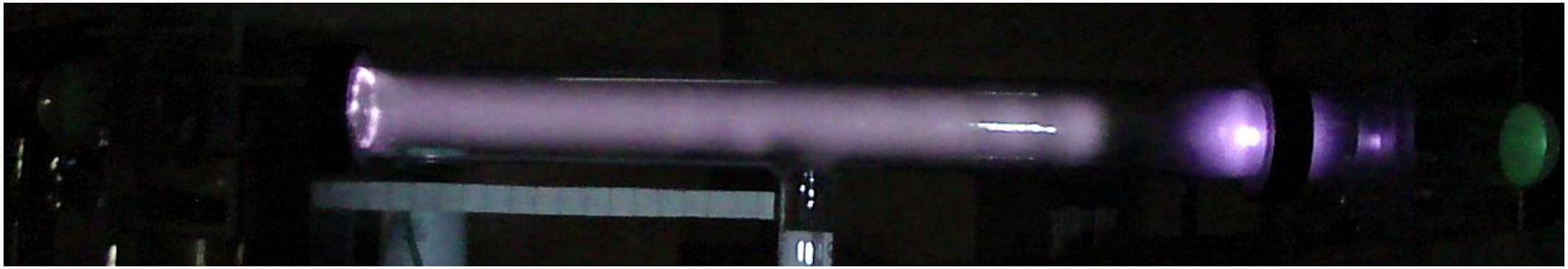
Osservazione della scarica

- $p \sim 9.5 \cdot 10^{-1}$mbar: **gli anelli luminosi tendono a unirsi.** L'estremità fluorescente dietro al catodo emette luce verde, indice del passaggio di ioni positivi attraverso l'elettrodo.



Osservazione della scarica

- $p \sim 1.2$mbar: gli anelli luminosi si sono praticamente fusi in un unica colonna luminosa. Permangono dei bagliori davanti al catodo.

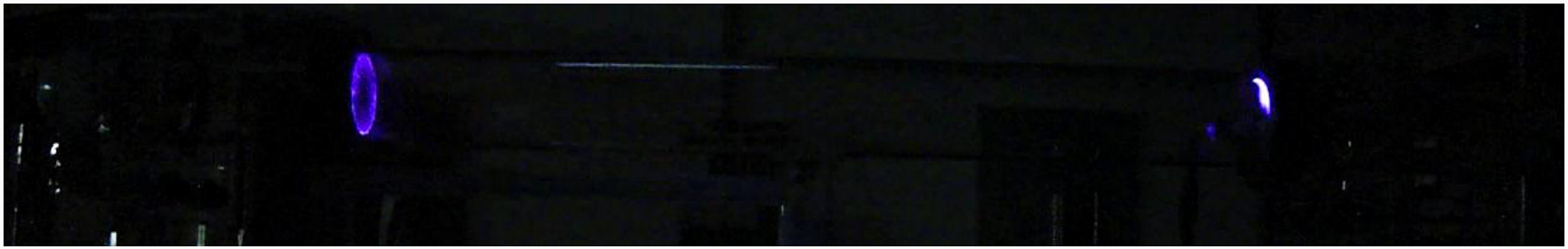


Osservazione della scarica

- $p \sim 1.4$mbar: un pennello di luce si estende progressivamente dall'anodo verso il catodo, fino a occupare circa metà del tubo. Si tratta dell'inizio dell'arco elettrico.

Osservazione della scarica

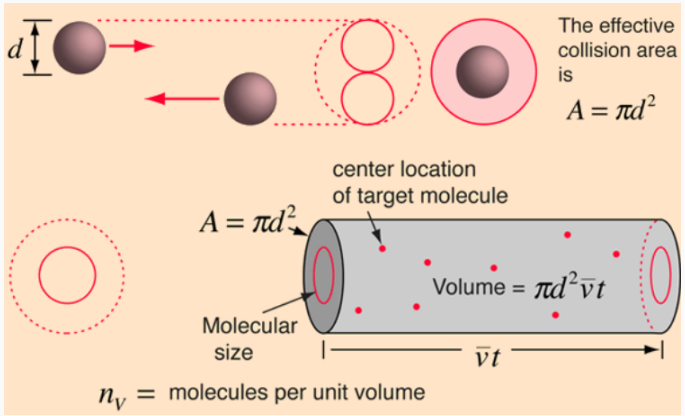
- $p \sim 5.7$mbar: permane una leggera luminescenza di colore blu solo sugli elettrodi.



con $p > 6$mbar: non si nota più alcun effetto luminoso.

Libero cammino medio

Il libero cammino medio è la distanza percorsa tra 2 collisioni.



Il libero cammino medio può essere calcolato come la lunghezza del percorso diviso il numero di collisioni:

$$\lambda = \frac{\bar{v}t}{\pi d^2 \bar{v}_{rel} t n_v} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n_v}$$

Il numero di molecole per unità di volume può essere determinato da:

$$n_V = \frac{nN_A}{V} = \frac{nN_A}{\frac{nRT}{p}} = \frac{N_A p}{RT}$$

Il libero cammino medio sarà:

$$\lambda = \frac{RT}{\sqrt{2}\pi d^2 N_A p}$$

Libero cammino medio e sezione d'urto

Il libero cammino medio di una particella nel mezzo è una misura della sua probabilità di interazione ed è collegato alla sezione d'urto:

$$\sigma\lambda = \frac{\Omega}{N} = \frac{A}{N_A\rho}$$

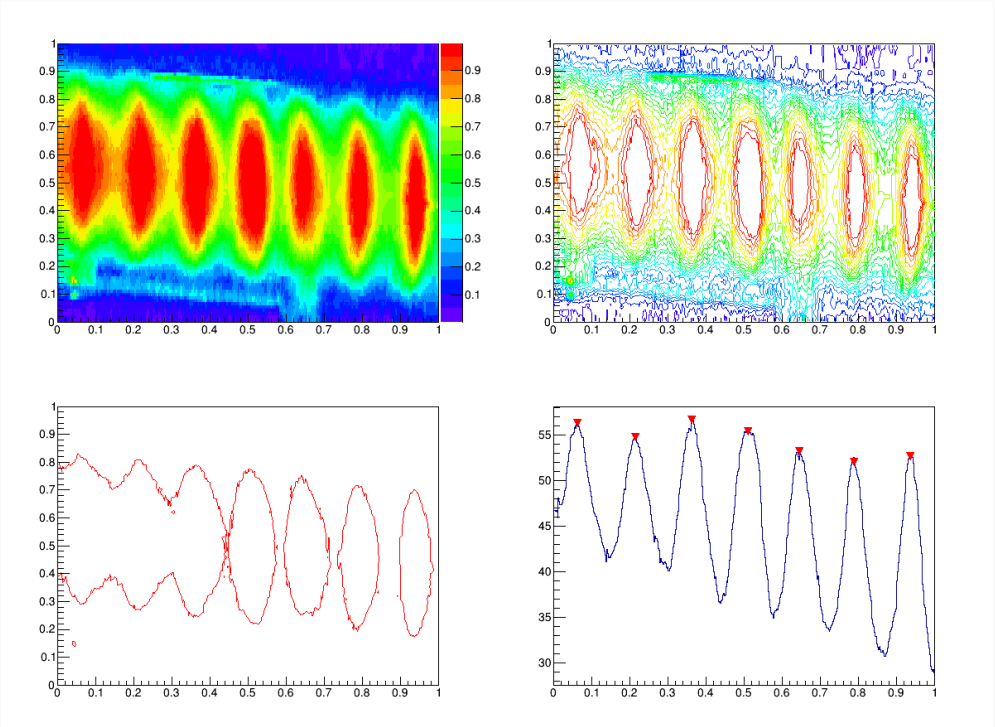
dove Ω è il volume in cui avviene l' interazione e N il numero di particelle in Ω.

Il libero cammino medio è la media della distribuzione delle distanze, che seguono una legge esponenziale negativa:

$$P(x)dx = \frac{1}{\lambda}\exp(-\frac{x}{\lambda})dx$$

Analisi dei ”mushrooms”

Utilizzando un software di analisi dei fotogrammi si può fare una stima della distanza tra i ”mushroom”, che è proporzionale a $\frac{1}{\lambda}$.

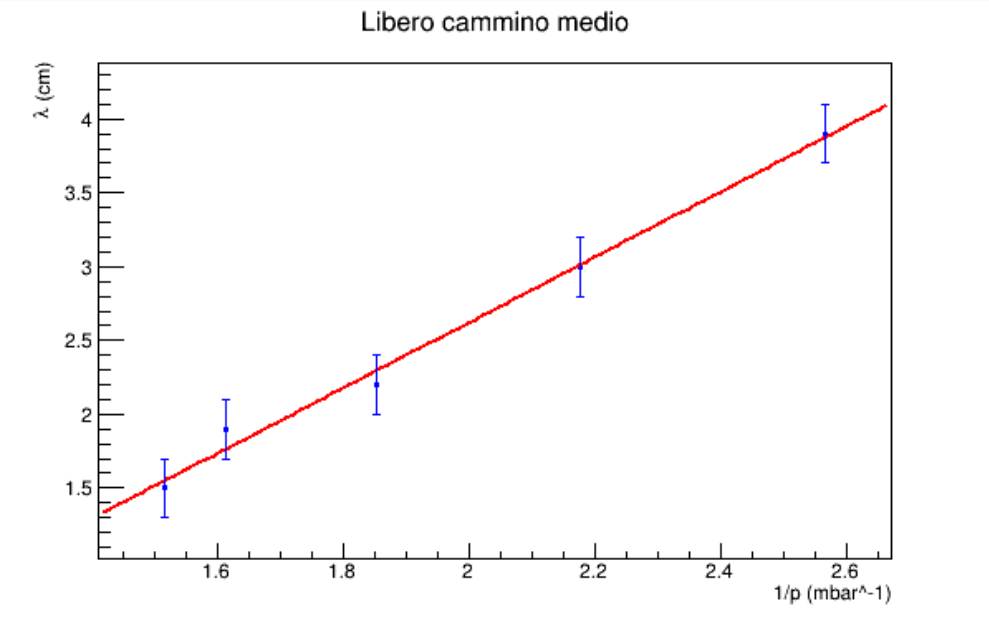


Tesi triennale: E. Tiengo.

Libero cammino medio

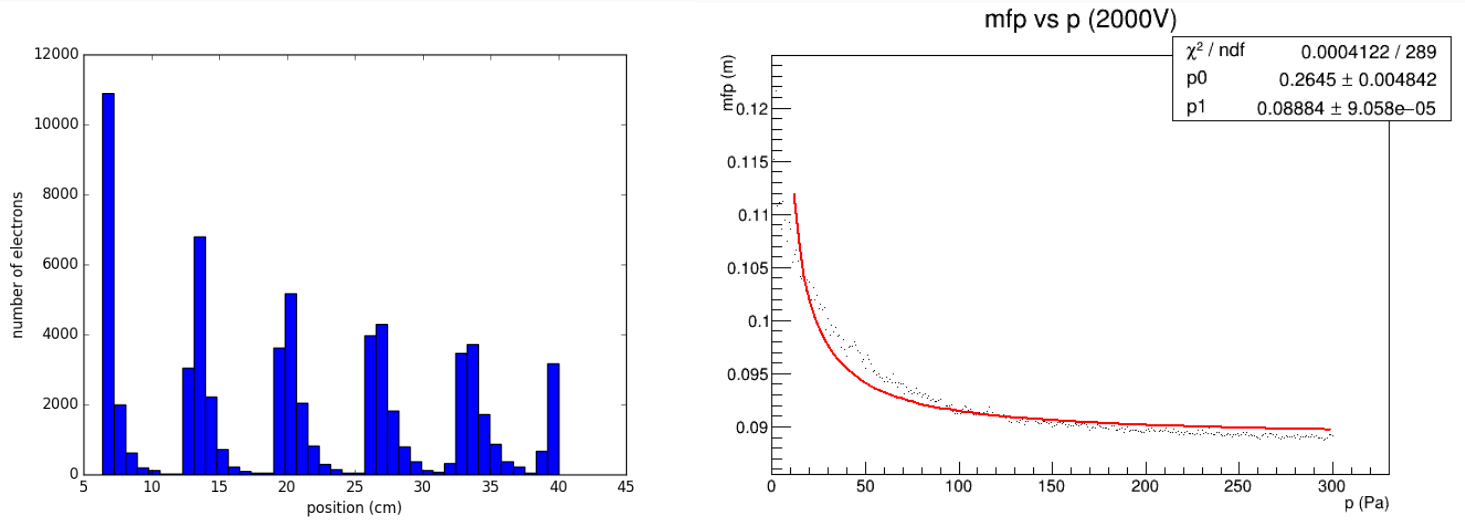
Andando a valutare la distanza degli anelli al variare della pressione si ottiene un grafico che segue la legge:

$$\lambda \times p = const$$



Simulazione numerica della scarica

Utilizzando il **metodo Montecarlo** è possibile studiare alcuni aspetti del processo di scarica, in particolare la distribuzione spaziale delle ionizzazioni e la relazione tra distanza tra i mushrooms e la pressione.



Sviluppo: L. Herbas Burgos.

Fenomenologia della scarica

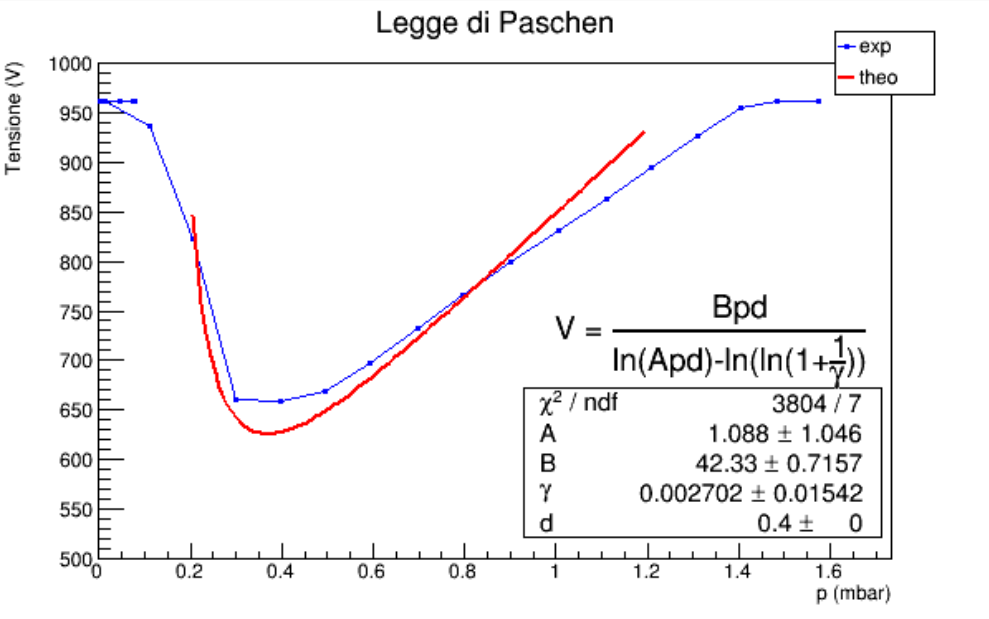
- Corrente di saturazione direttamente proporzionale alla distanza d tra gli elettrodi.
  Il campo elettrico stesso diventa allora un agente ionizzante, con processo di produzione a valanga di ioni.
- Tensione d' innesco V direttamente proporzionale alla pressione P del gas.
  Al diminuire della pressione aumenta il percorso compiuto in media da una molecola tra un urto ed il successivo e quindi aumenta l'energia cinetica.
- A parità di pressione, la tensione d' innesco V è direttamente proporzionale alla distanza d tra gli elettrodi.

$$V = V(P, d, \ldots)$$

Legge di Paschen

Paschen studiò la minima tensione di rottura tra due elettrodi in un gas, in funzione della loro distanza e della pressione.
La tensione di innesco soddisfa la relazione:

$$V = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln(\ln(1 + \frac{1}{\gamma}))}$$



Scarica nei gas

Lo studio della scarica in gas rarefatti ha portato:

- primo **acceleratore** di particelle
- scoperta dell' **elettrone**
- scoperta dei raggi X

Bibliografia

- Y.P. Raizer, Gas Discharge Physics
- B.M. Smirnov, Physics of ionized gases
- S.A. Wissel et al, The use of dc glow discharges as undergraduate educational tools, American Journal of Physics 81, 663 (2013); doi: 10.1119/1.4811435
- R.G. Gibson, Experimental observation of ionization waves, American Journal of Physics 51, 1028 (1983); doi: 10.1119/1.13443
- R.A. Treumann et al, Physics of electric discharges in atmospheric gases: an informal introduction, arXiv:0711.1672v2 [physics.space-ph] 2008
- N.St.J.Braithwaite, Introduction to gas discharges, Plasma Sources Sci. Technol. 9 (2000) 517–527

Contatto

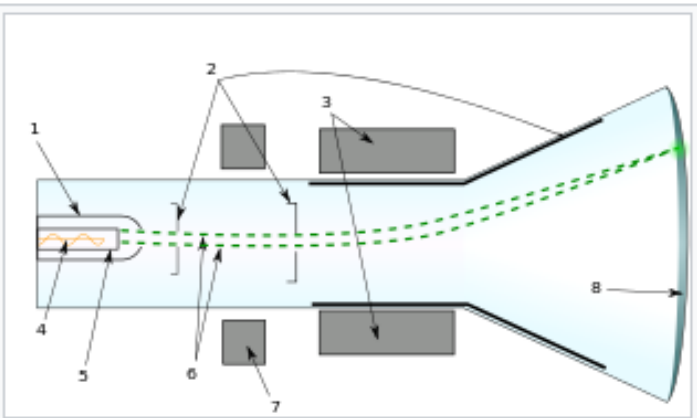
andrea.fontana@pv.infn.it
alessia.embriaco@pv.infn.it

http://www.pv.infn.it/∼fontana

Riserva

Applicazione: Dall'elettrone al televisore

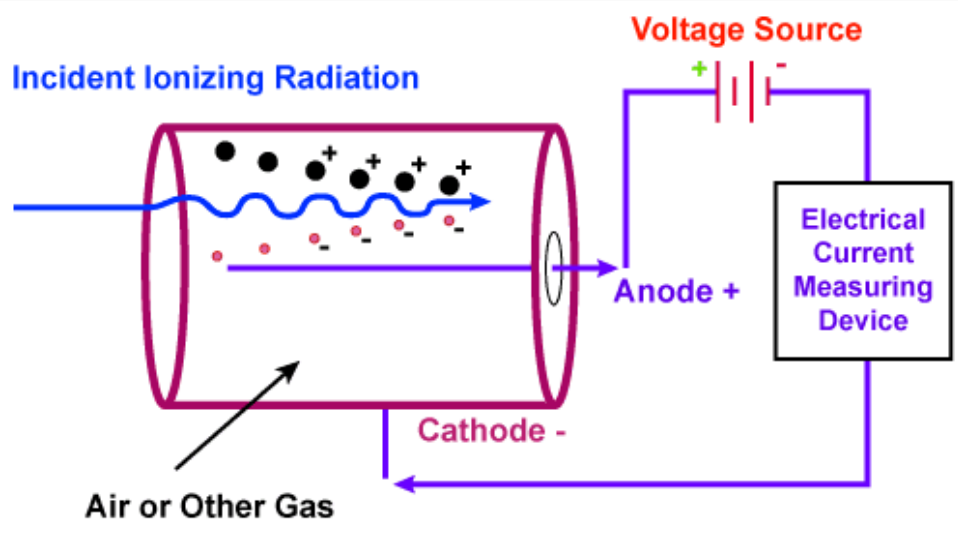
I vecchi televisori a tubo catodico utilizzavano dei fasci di elettroni che vengono convogliati ad hoc su di una superficie rivestita di materiale fluorescente.



Sezione schematica di un tubo a raggi catodici monocromatico
1) Controllo della griglia
2) Anodo
3) Bobina deflettrice
4) Riscaldatore
5) Catodo
6) Fascio di elettroni
7) Bobina di messa a fuoco
8) Schermo fluorescente

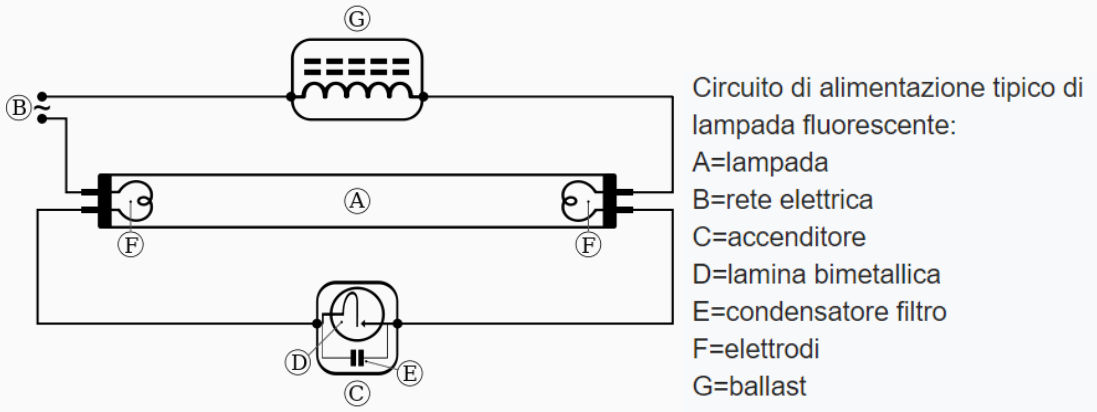
Applicazione: rivelatori a gas

Contatore Geiger per misure di radiazione α, β o γ.



Applicazione: lampada al neon

...o meglio **tubo a fluorescenza** (non contiene neon! luce rossa...)



- Tubo, con superficie interna rivestita di **materiale fluorescente**, in cui viene praticato il vuoto e introdotto un gas nobile (**argon** o **krypton**) a bassa pressione e una piccola quantità di **mercurio**, che in parte evapora mescolandosi al gas.
- Il passaggio della corrente sollecita i gas a emettere radiazione nell' **ultravioletto**.
- Il materiale fluorescente, investito da tali radiazioni, emette a sua volta radiazione visibile

Derivazione I (cenni)

Parametri principali: coefficienti α e γ di Townsend:

- primo coefficiente α: rappresenta numero di elettroni prodotti per unità di lunghezza.
- secondo coefficiente γ: regola emissione di elettroni secondari e il punto di rottura elettrica (scarica autosostenuta).

- Corrente di elettroni durante la scarica a valanga: $I = I_0 e^{\alpha d}$
  I_0: corrente di saturazione.
- α è inversamente proporzionale al cammino libero medio λ_e e dipende anche dall' equazione di Saha:

$$\alpha \propto \frac{1}{\lambda_e}$$
$$\alpha \propto e^{\frac{\epsilon}{E\lambda_e}}$$

λ_e: la distanza media tra 2 collisioni successive.
ϵ: energia di ionizzazione
E: campo elettrico

Derivazione II (cenni)

- λ_e è inversamente proporzionale alla pressione P:

$$\lambda_e \propto \frac{1}{P}$$

- quindi si ottiene:

$$\alpha = APe^{\frac{\epsilon}{E/P}}$$

- Il coefficiente γ fornisce la condizione di innesco della scarica nella forma:

$$\alpha d = log(1 + \frac{1}{\gamma})$$

Dal confronto segue la legge di Paschen:

$$V = \frac{BPd}{log(APd) - log[log(1 + \frac{1}{\gamma})]}$$

I coefficienti A e B dipendono dal tipo di gas.