

Ionizzazione nei gas

Andrea Fontana

INFN Pavia

- Rivelatori a gas.
- Gas a bassa pressione: *vuoto ed elettricità*.
- Conduzione elettrica nei gas.
- Scoperta dell' elettrone: raggi catodici e raggi canale.
- Tubo a scarica: descrizione dell' esperienza.

RIVELAZIONE DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI

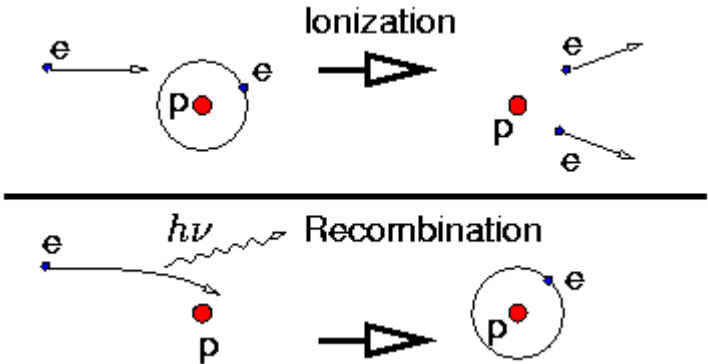
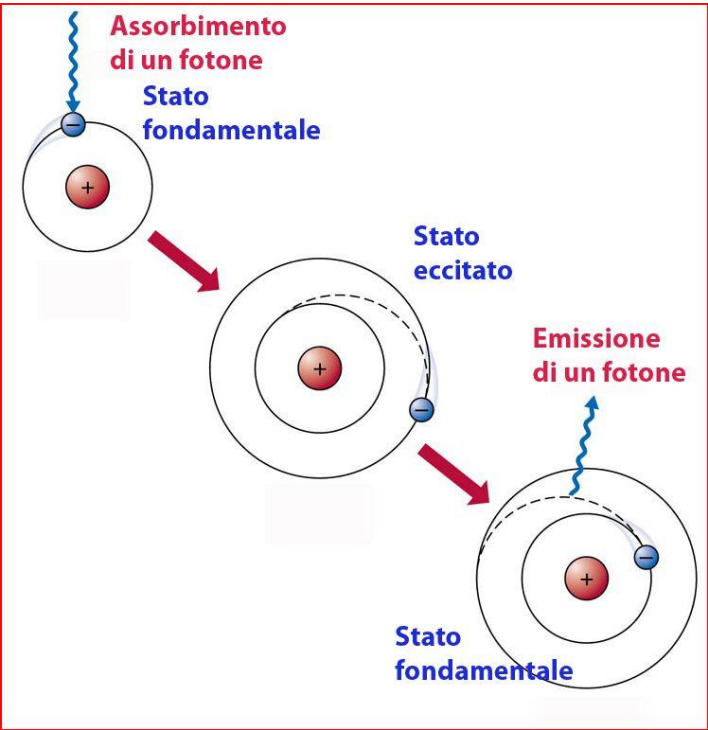
Nelle tecniche di rivelazione delle **radiazioni ionizzanti** le grandezze da rivelare possono essere diverse:

- Fluenza di particelle
- Fluenza di energia
- Informazioni temporali di singolo evento
- Informazioni spaziali di singolo evento
- Identificazione della particella
- Misura dell'energia delle singole particelle (**spettrometria**)

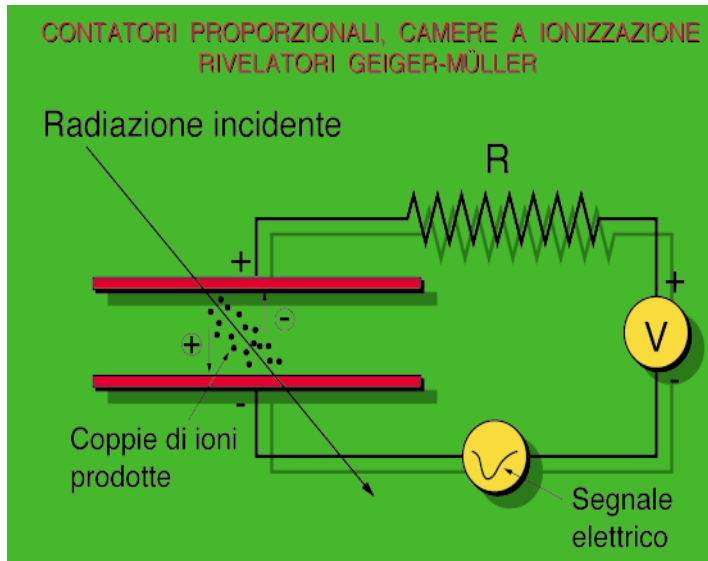
Queste varie informazioni sono ottenibili sfruttando i due processi che avvengono a seguito dell'interazione della radiazione con la materia (rivelatore):

- **IONIZZAZIONE** (rivelatori a gas e a semiconduttore)
- **ECCITAZIONE** (scintillatori)

Eccitazione e ionizzazione



RIVELATORI A GAS



Si sfrutta il processo di **ionizzazione** che avviene nel **gas**, contenuto in una camera, per effetto dell'interazione della radiazione. Le cariche (**elettroni/ioni**) liberate nel gas vengono raccolte da una coppia di elettrodi e producono un segnale elettrico.

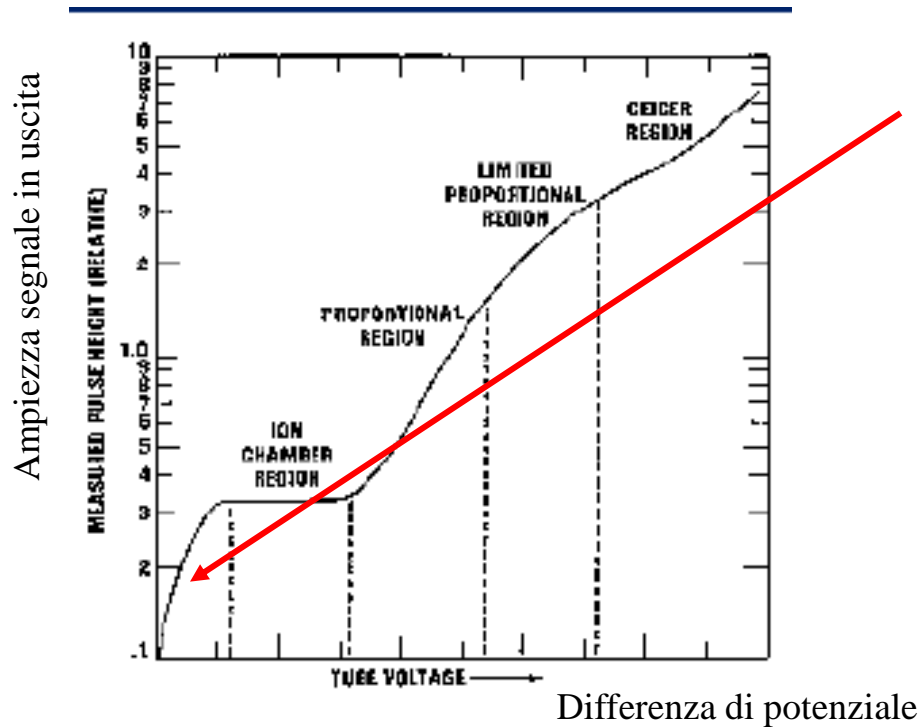
In presenza di un campo elettrico gli elettroni e gli ioni liberati dalla radiazione sono accelerati lungo le linee del campo verso l'anodo e il catodo rispettivamente. Questa accelerazione è interrotta dalle collisioni con le molecole del gas che limita la velocità massima raggiunta ottenuta lungo la direzione del campo. La velocità media raggiunta è conosciuta come **velocità di deriva**. Essa dipende dal **campo elettrico** E e dalla **pressione** P del gas:

$$v = \mu \cdot \frac{E}{P}$$

Il **coefficiente di proporzionalità** μ prende il nome di **mobilità ionica**.
E' molto più elevata per gli elettroni rispetto agli ioni positivi (più massivi):
 v elettroni $\sim 10^6$ cm/s v ioni $\sim 10^3$ cm/s

RIVELATORI A GAS

A seconda della **differenza di potenziale** applicata tra gli elettrodi si hanno diverse caratteristiche del rivelatore, e quindi un diverso utilizzo. L'ampiezza del segnale elettrico in uscita in funzione della tensione applicata agli elettrodi ha un tipico andamento:



Zona di **ricombinazione**: $Q < N \cdot e$

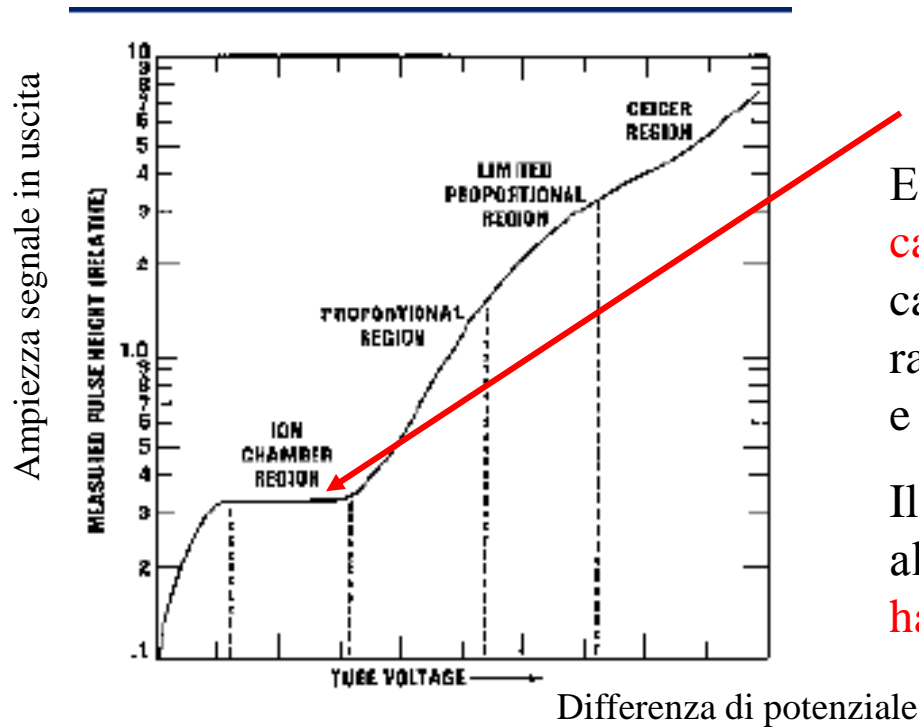
Il campo elettrico applicato non è sufficiente a separare tutti gli ioni prodotti dalla radiazione, che quindi in parte si ricombinano

Si possono avere informazioni sull'istante in cui è passata una particella ma **non informazioni dosimetriche**

- Q : carica totale raccolta (segnale elettrico in uscita dal rivelatore)
- N : numero di coppie e^- /ioni prodotti dalla radiazione
- e : carica elettrica elementare

RIVELATORI A GAS

A seconda della **differenza di potenziale** applicata tra gli elettrodi si hanno diverse caratteristiche del rivelatore, e quindi un diverso utilizzo. L'ampiezza del segnale elettrico in uscita in funzione della tensione applicata agli elettrodi ha un tipico andamento:



Regione di **saturazione**: $Q=N \cdot e$

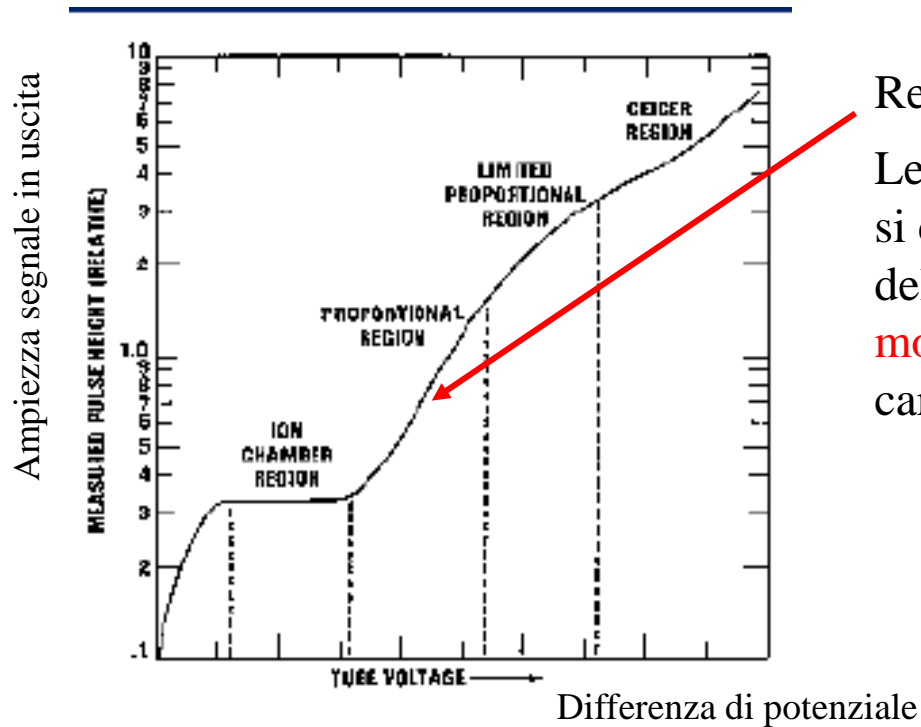
E' l'intervallo di tensione in cui opera la **camera a ionizzazione**. Tutte e sole le cariche liberate dal passaggio della radiazione vengono raccolte agli elettrodi e contribuiscono al segnale elettrico

Il segnale prodotto è quindi proporzionale all'energia rilasciata nella camera: **si hanno informazioni dosimetriche**

- Q : carica totale raccolta (segnale elettrico in uscita dal rivelatore)
- N : numero di coppie e^- /ioni prodotti dalla radiazione
- e : carica elettrica elementare

RIVELATORI A GAS

A seconda della **differenza di potenziale** applicata tra gli elettrodi si hanno diverse caratteristiche del rivelatore, e quindi un diverso utilizzo. L'ampiezza del segnale elettrico in uscita in funzione della tensione applicata agli elettrodi ha un tipico andamento:



Regione di **proporzionalità**: $Q = M(\Delta V) \cdot N \cdot e$

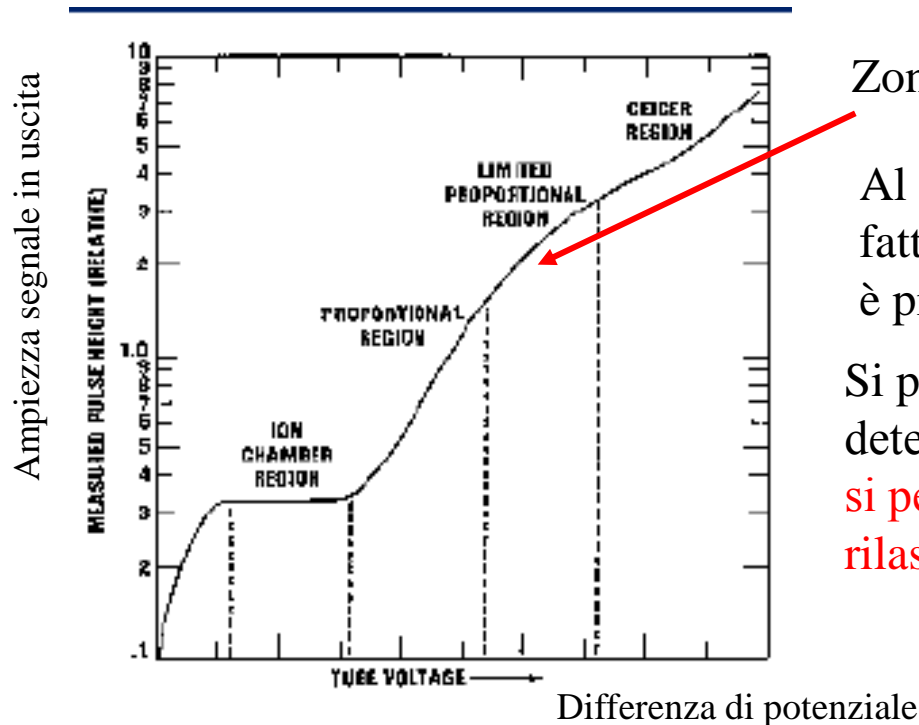
Le tensioni sono sufficientemente alte da far sì che la carica liberata dalla interazione della radiazione con il gas venga **moltiplicata** per effetto degli urti delle cariche stesse con le molecole neutre del gas

Fissata la tensione ΔV , il fattore moltiplicativo M è una costante. Il segnale prodotto è quindi ancora proporzionale all'energia rilasciata nella camera: **informazioni dosimetriche**

- Q : carica totale raccolta (segnale elettrico in uscita dal rivelatore)
- N : numero di coppie e^- /ioni prodotti dalla radiazione
- e : carica elettrica elementare

RIVELATORI A GAS

A seconda della **differenza di potenziale** applicata tra gli elettrodi si hanno diverse caratteristiche del rivelatore, e quindi un diverso utilizzo. L'ampiezza del segnale elettrico in uscita in funzione della tensione applicata agli elettrodi ha un tipico andamento:



Zona di **limitata proporzionalità**: $Q = M^* \cdot N \cdot e$

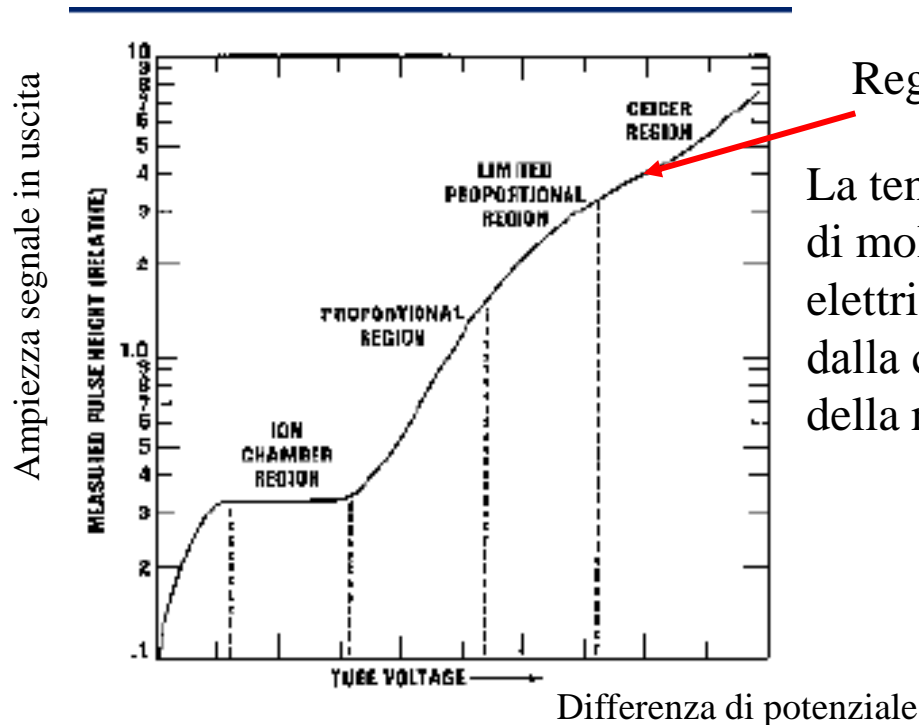
Al crescere della tensioni tra gli elettrodi il fattore di moltiplicazione M aumenta, ma non è più solo dipendente dalla tensione stessa

Si può ancora contare le particelle e determinare l'istante dell'interazione **ma si perde l'informazione sull'energia rilasciata e quindi sulla dose**

- Q: carica totale raccolta (segnale elettrico in uscita dal rivelatore)
- N: numero di coppie e⁻/ioni prodotti dalla radiazione
- e: carica elettrica elementare

RIVELATORI A GAS

A seconda della **differenza di potenziale** applicata tra gli elettrodi si hanno diverse caratteristiche del rivelatore, e quindi un diverso utilizzo. L'ampiezza del segnale elettrico in uscita in funzione della tensione applicata agli elettrodi ha un tipico andamento:



Regione di **Geiger-Muller: $Q = \text{costante}$**

La tensione è così elevata che dominano gli effetti di moltiplicazione. La carica raccolta (segnale elettrico) è sempre lo stesso indipendentemente dalla carica inizialmente liberata dall'interazione della radiazione con il gas.

Si può ancora contare le particelle e determinare l'istante dell'interazione **ma si perde l'informazione sull'energia rilasciata e quindi sulla dose**

- Q : carica totale raccolta (segnale elettrico in uscita dal rivelatore)
- N : numero di coppie e^- /ioni prodotti dalla radiazione
- e : carica elettrica elementare

RIVELATORI A GAS: CAMERA A IONIZZAZIONE

Nella **camera a ionizzazione** lo scopo è quello di raccogliere **tutta (e sola)** la carica prodotta a seguito della radiazione con il gas.

Il numero N di coppie e^- /ione prodotte per effetto della deposizione di una energia E nella camera da parte di una radiazione è:

$$N = \frac{E}{w}$$

Dove w è l'**energia media necessaria per produrre una coppia e^- /ione**

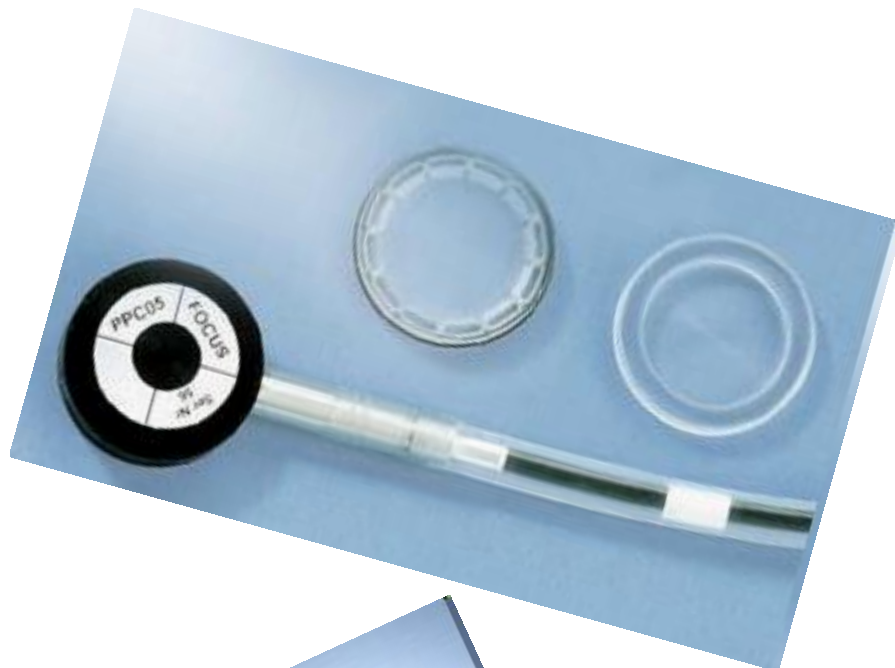
Tale energia w è maggiore della energia di ionizzazione, esistono infatti altri meccanismi in cui la radiazione incidente perde energia senza creare coppie di ioni (tipicamente nelle eccitazioni – collisioni distanti)

In linea di principio w è funzione del tipo di gas e di radiazione. Tuttavia si osserva che w non dipende fortemente da queste variabili e si può considerare **costante** per diversi tipi di gas e radiazione. Vale:

$$w = 30 - 35 \text{ eV}$$

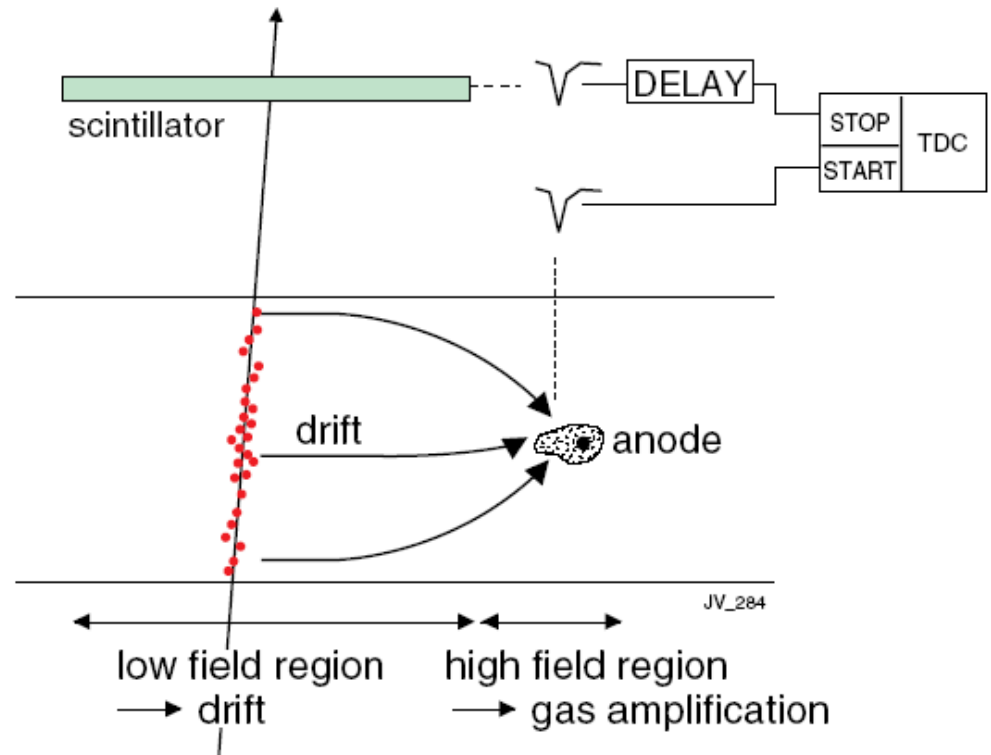
Tale parametro è importante ai fini della **risoluzione energetica di un rivelatore**.

RIVELATORI A GAS



Drift Chambers

Versione delle MWPC con lettura del tempo di drift in ogni filo.
Consente risoluzioni migliori, ma richiede un'elettronica più complessa.





G. Charpak, F. Sauli and J.C. Santiard

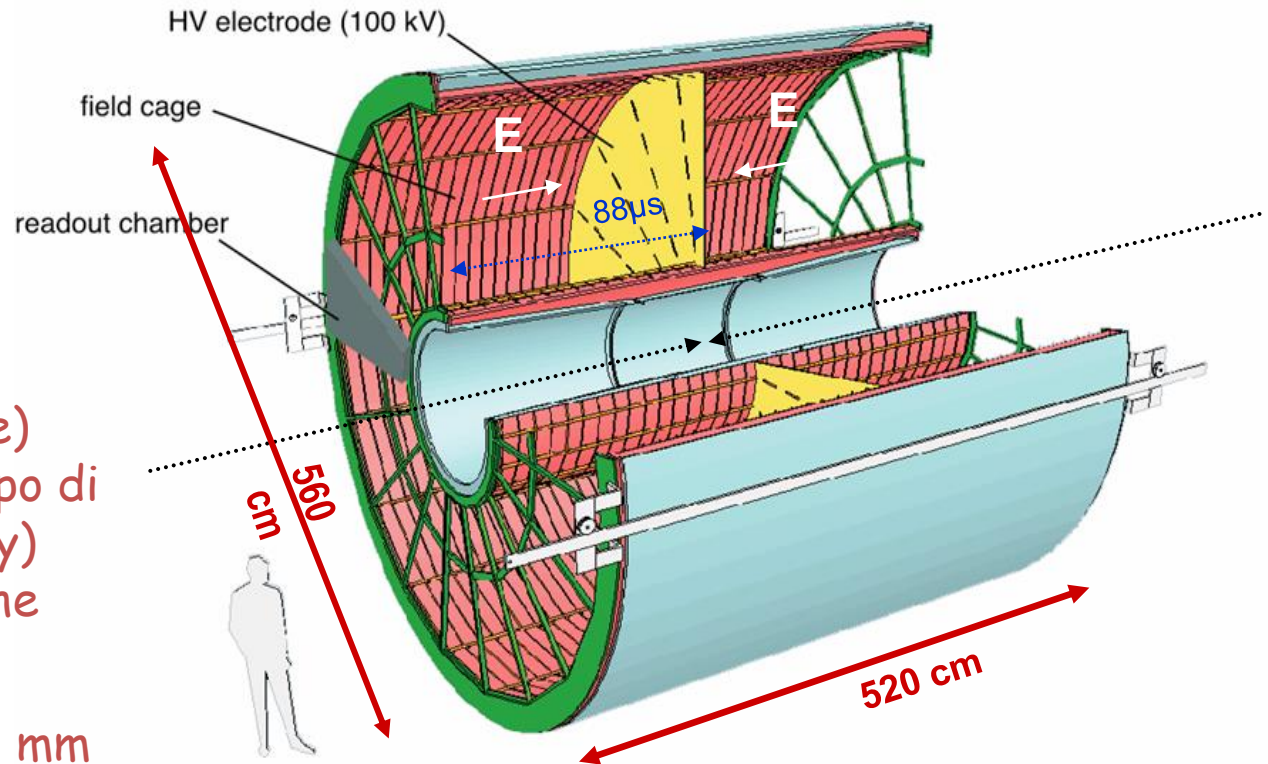


Premio Nobel 1992 per invenzione camera proporzionale multifilo (MWPC)

TPC: Time Projection Chambers

Rivelatore 3D capace di ricostruire la traccia e di fornire anche il segnale dE/dx per la identificazione.

La TPC dell'esperimento ALICE@LHC, la più grande mai costruita



La coordinata z (assiale) viene misurata dal tempo di drift, le coordinate (x,y) dalla particolare pad che raccoglie il segnale.

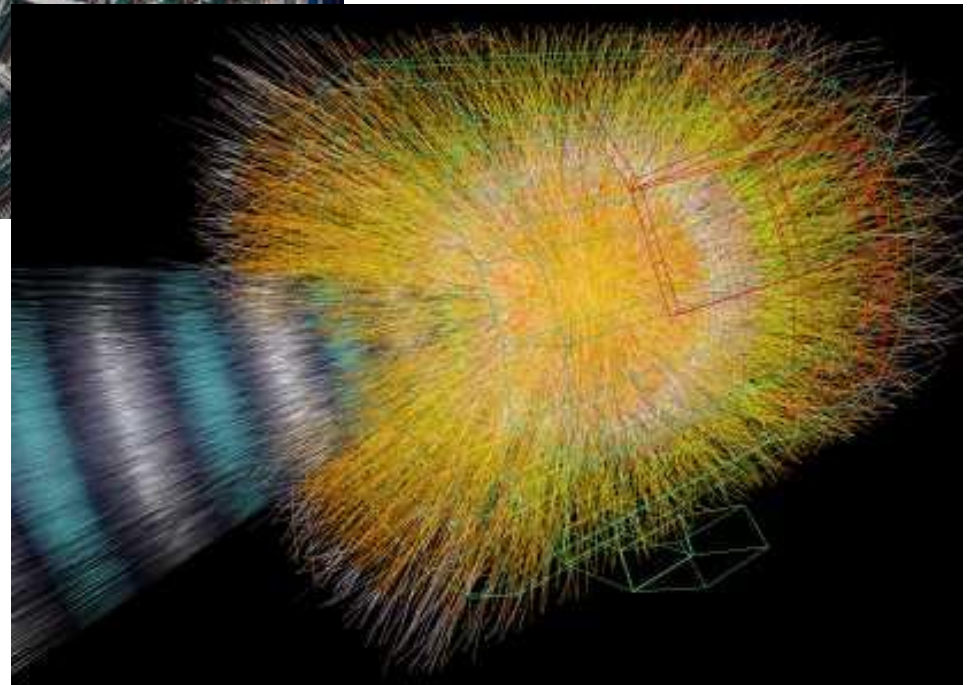
Risoluzione tipiche: 0.5 mm

TPC: Time Projection Chambers



La TPC di Alice.

Ricostruzione di tracce:
collisione Pb-Pb, fino a 20000
particelle secondarie per evento!



Contatori Geiger-Müller

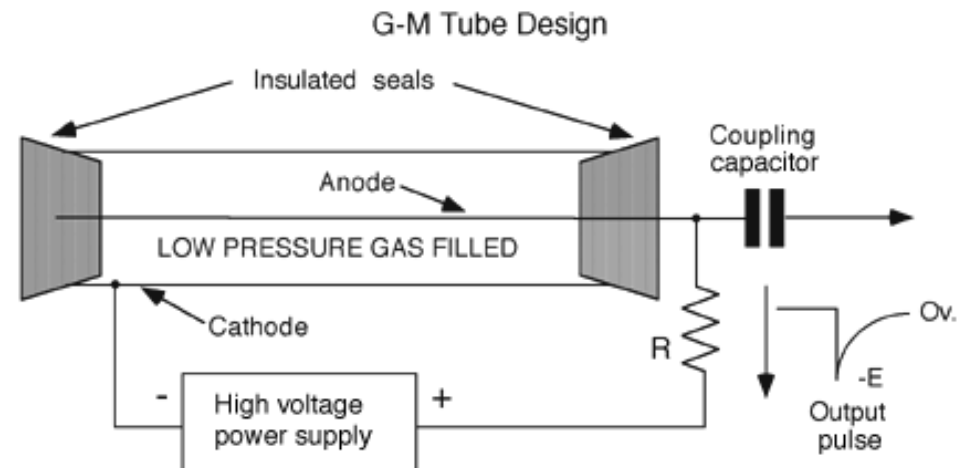
Operano nella regione E della curva segnale d'uscita-potenziale in un rivelatore a gas.

Al crescere della tensione anodo-catodo la moltiplicazione a valanga diviene generalizzata e non dipende più dall'energia del fotone assorbito.

Basta una sola coppia primaria per dar luogo ad una scarica a valanga completa e quindi l'ampiezza dell'impulso in uscita non è più una misura della ionizzazione primaria: ***in questi dispositivi la carica raccolta è indipendente dalla ionizzazione primaria.***

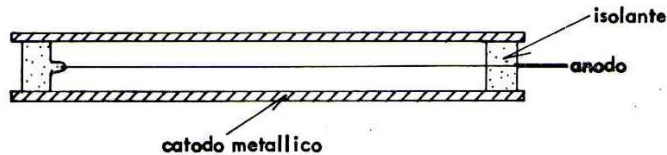
Infatti oltre alla ionizzazione si hanno fenomeni quali l'eccitazione seguita da emissione di luce visibile e ultravioletta. Una piccola parte di tali fotoni dà luogo ad emissione di fotoelettroni che generano nuova ionizzazione, tramite il processo della moltiplicazione a valanga.

Un contatore Geiger può essere utilizzato come contatore di radiazione e non in esperimenti di spettroscopia.



Contatori Geiger - Muller

Sono utilizzati come contatori di radiazione e non in esperimenti di spettroscopia



Caratteristiche

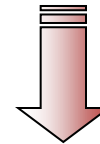
- Geometria cilindrica
- Gas a bassa affinità elettronica

Processo di scarica ($\approx \mu s$)

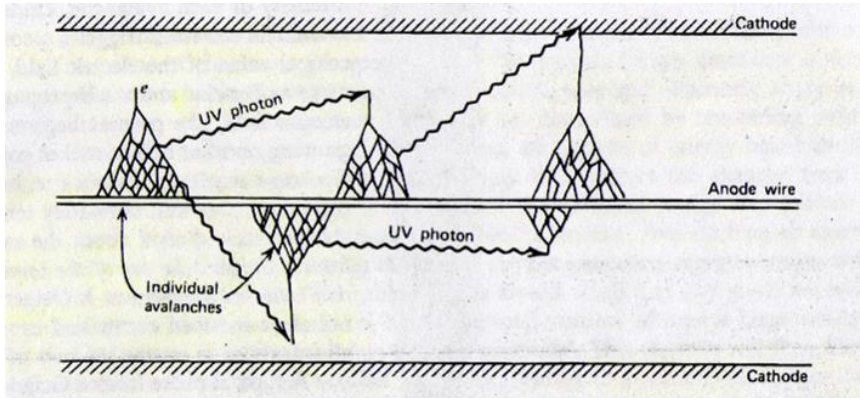
Termina quando si è creata la stessa carica



Tutti gli impulsi hanno la stessa ampiezza



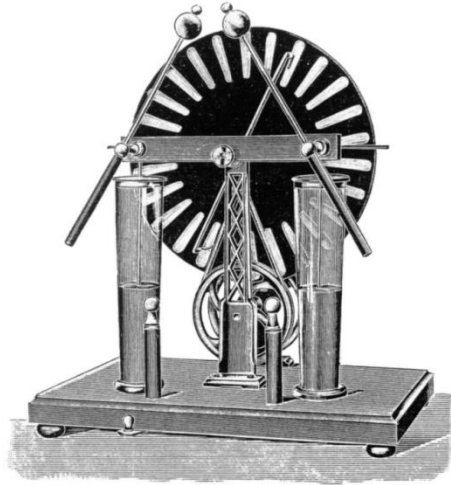
Contatore Geiger = Contatore di radiazione



$$M \sim 10^6 \div 10^8$$

Ma facciamo un passo indietro...

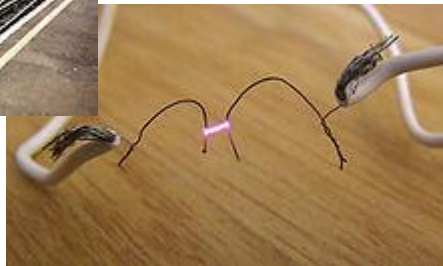
Fenomeni di scariche elettriche in gas sono noti all' uomo da molto tempo...



...ma solo dalla seconda meta' dell' 800
i fisici ne hanno compreso la natura
e oggi noi vi conviviamo senza problemi...

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

- la tecnologia del **vuoto**
- la tecnologia dell' **elettricita'**



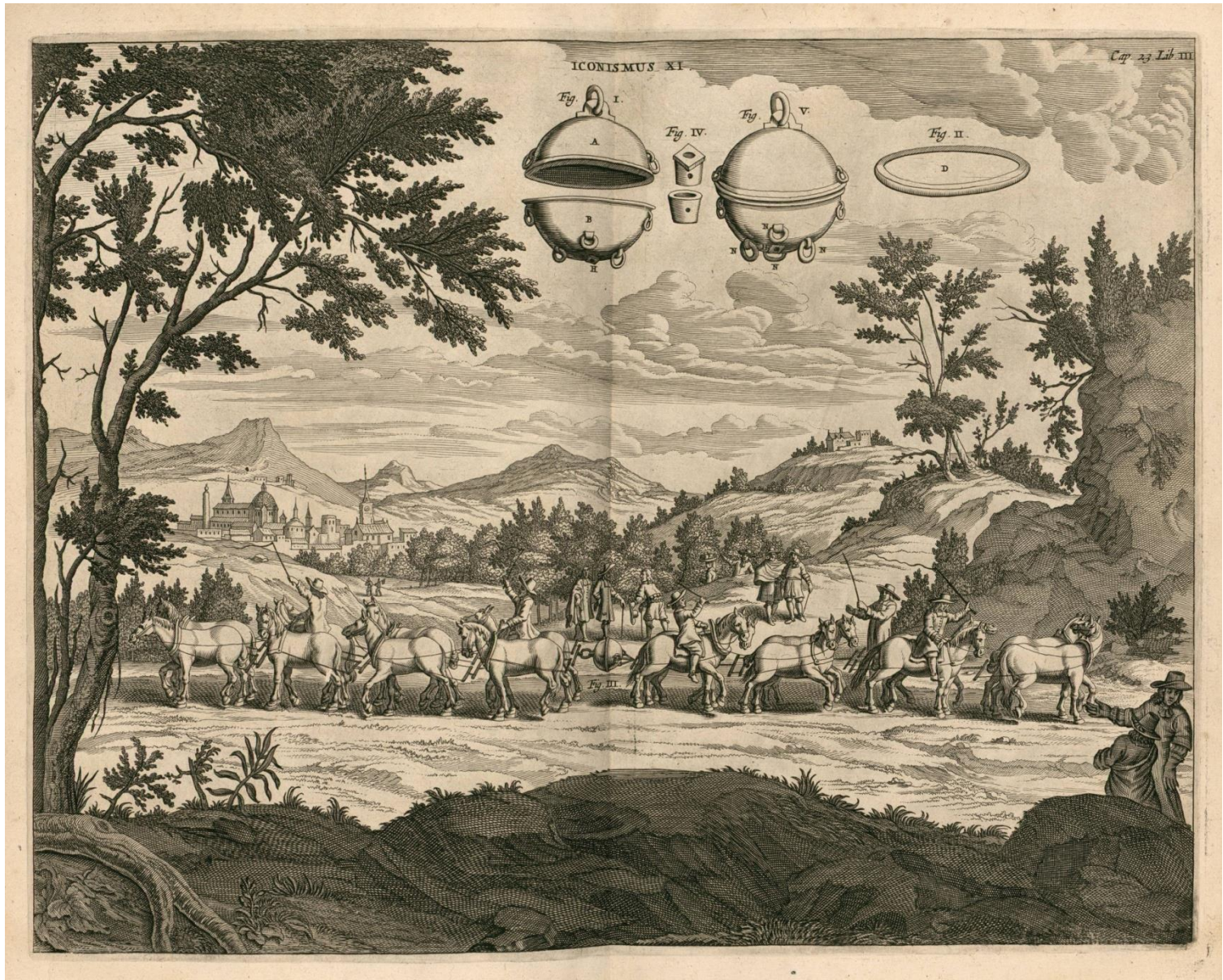
Il Vuoto: Magdeburgo

[Otto von Guericke](#) mise a punto, intorno al 1655, una pompa che poteva estrarre l'aria da recipienti a tenuta. Grazie a questo nuovo strumento, von Guericke poté allestire a Magdeburgo, nel 1657, una spettacolare esperienza alla quale assisté un enorme numero di concittadini.

Egli dimostrò che il peso dell'aria spingeva l'una contro l'altra due calotte emisferiche perfettamente combacianti (entro le quali era stato fatto il vuoto con la pompa pneumatica), con tale forza che occorreavano due tiri contrapposti di 16 cavalli per separarle.

Von Guericke intuì che il peso dell'aria costituiva una forza utilizzabile per compiere lavoro, ad esempio per sollevare pesi, avviando così un filone di ricerche che porterà alla macchina a vapore di James Watt (1736-1819).

Il Vuoto: Magdeburgo



1676

Spostando un barometro, Jean Picard nota un curioso bagliore al di sopra della colonna di mercurio.

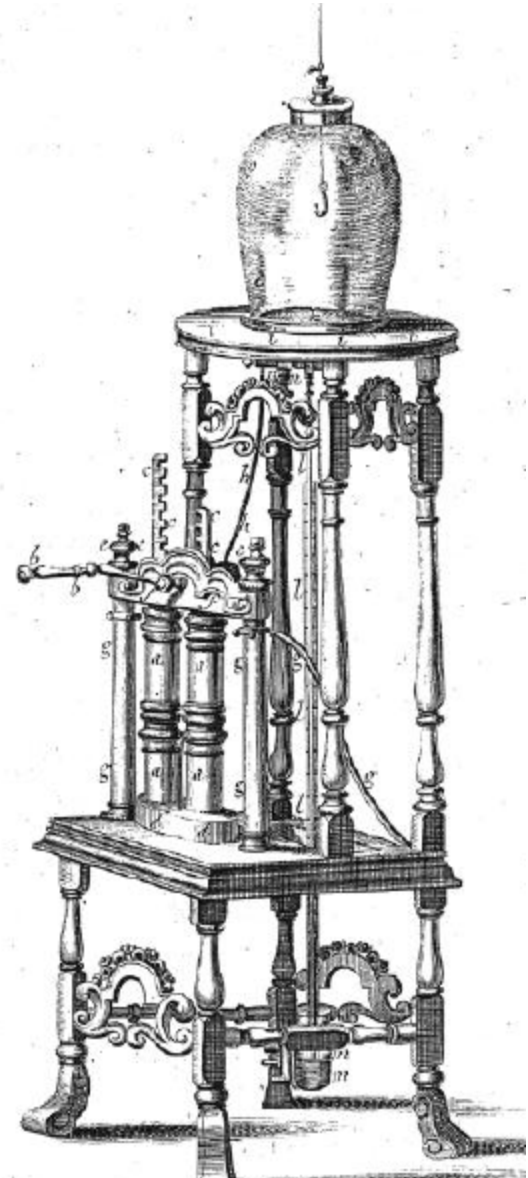
1700

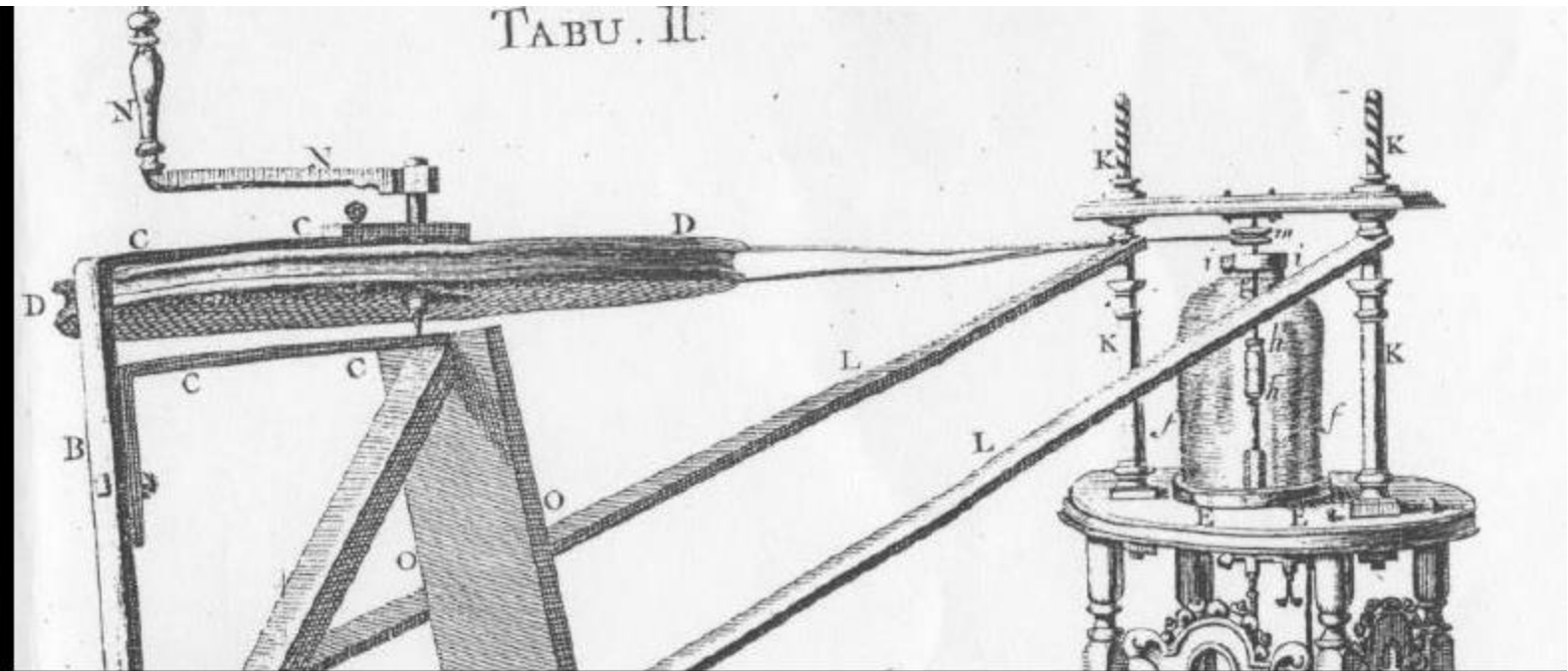
Johann Bernoulli s'interessa al fenomeno e mostra che la luminescenza è legata al moto del mercurio e al grado di rarefazione.

1705-1709

I misteriosi bagliori, che diventano noti con il nome di “fosforo mercuriale”, vengono studiati da Francis Hauksbee...

... grazie alla pompa
pneumatica a due cilindri da
lui inventata nel 1703.





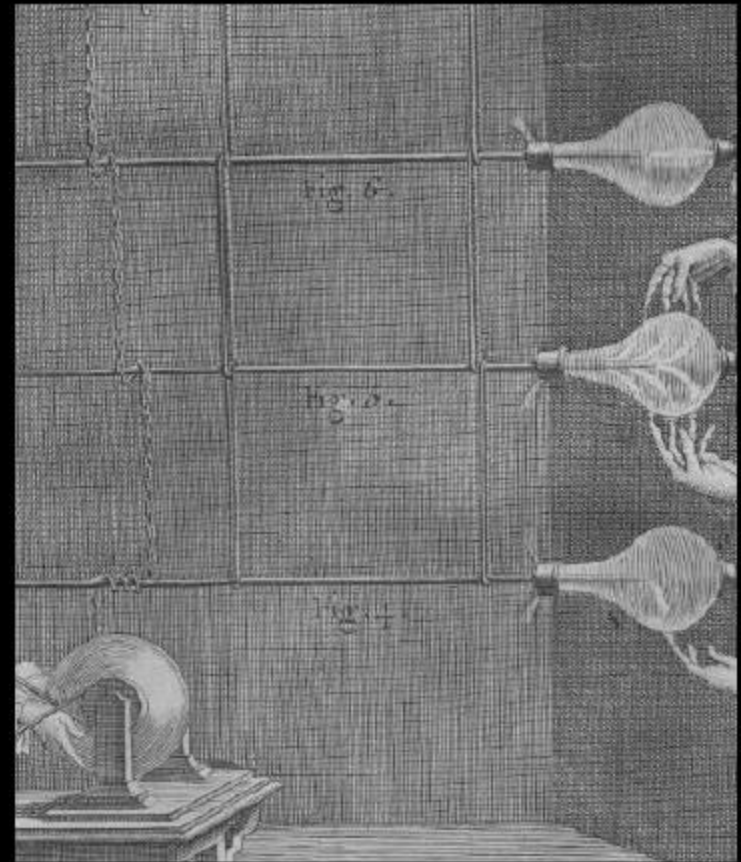
Hauksbee scopre che il mercurio non è affatto indispensabile per ottenere i bagliori: strofinando infatti in aria rarefatta corpi vari, come l'ambra o il vetro, con un panno di lana si ottengono gli stessi effetti luminosi.

Da notare che:

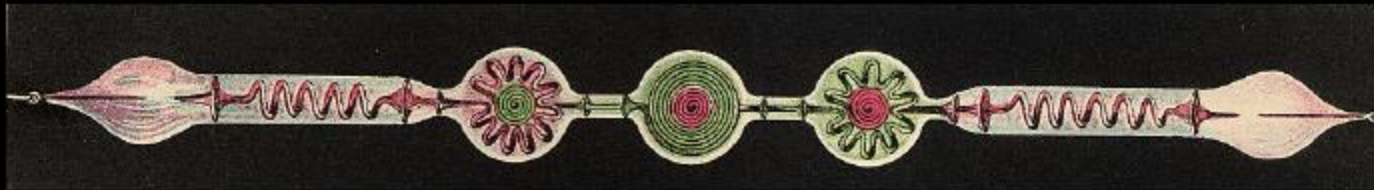
- è proprio sulla scia di questi esperimenti che Hauksbee si dedica alle successive ricerche sull'elettricità.
- Hauksbee considera come ben distinti l'elettricità e i "bagliori": entrambi si ottengono per strofinio ma si verificano secondo lui in condizioni diverse, l'uno nel vuoto (parziale) e l'altro in presenza di aria.

1745 Diversi esperimenti convincono la comunità scientifica che i “bagliori” sono di natura elettrica, ossia scariche elettriche in aria rarefatta.

1746 Nuovi strumenti per studiare i “bagliori”: recipienti di vetro in cui si rarefa l’aria e che vengono collegati alla macchina elettrostatica.

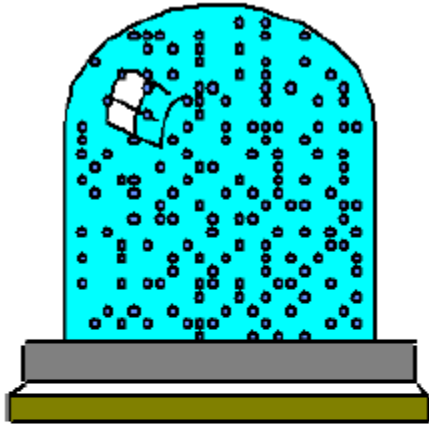


1857 Geissler, utilizzando la sua nuova pompa da vuoto a mercurio, riesce a costruire i cosiddetti *tubi di Geissler*, piccoli tubi di vetro contenenti gas molto rarefatti per l'epoca all'interno dei quali penetrano due elettrodi.



→ *i Bagliori nel vuoto* diventano uno dei settori di punta della fisica e le scoperte si moltiplicano.

Tipi di vuoto

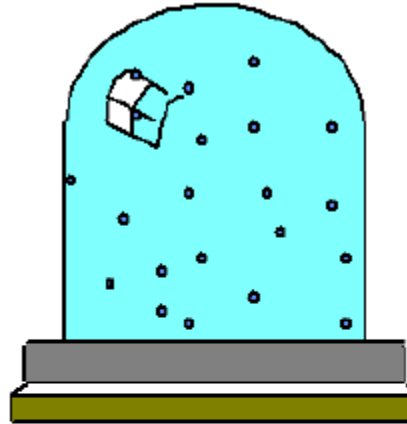


Basso vuoto

$759 - 1 \times 10^{-3}$ torr

$1012 - 1 \times 10^{-3}$ mbar

$1 \times 10^5 - 1 \times 10^{-1}$ Pa

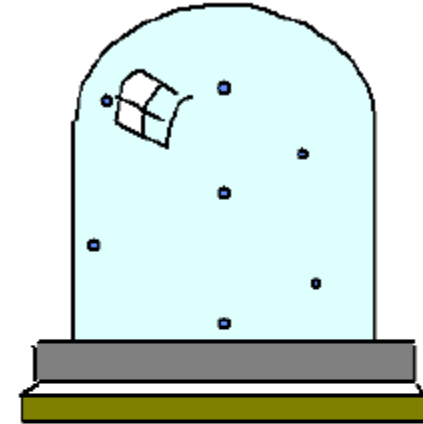


Alto vuoto

$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-8}$ torr

$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-8}$ mbar

$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-6}$ Pa



Ultra alto vuoto

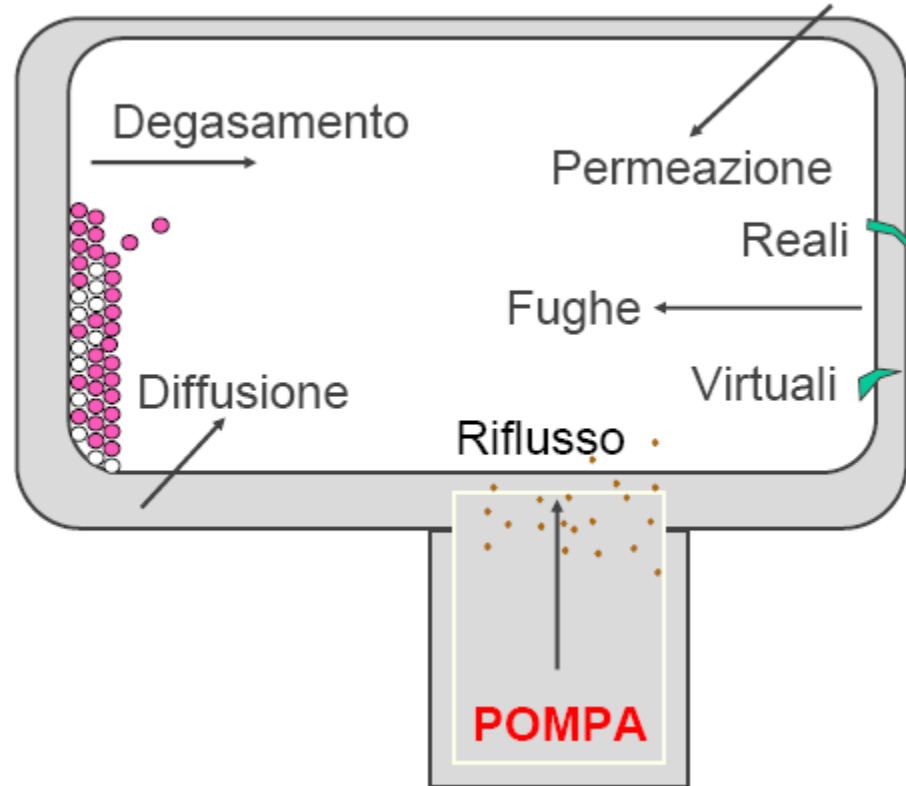
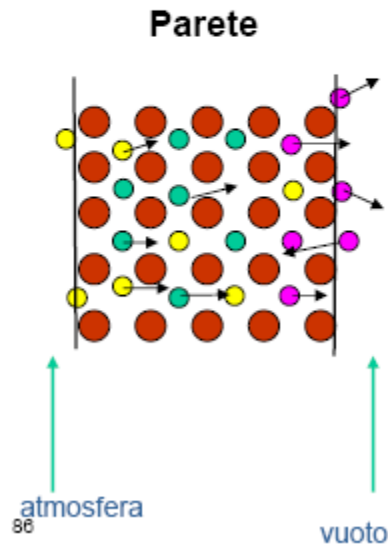
$1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-12}$ torr

$1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-12}$ mbar

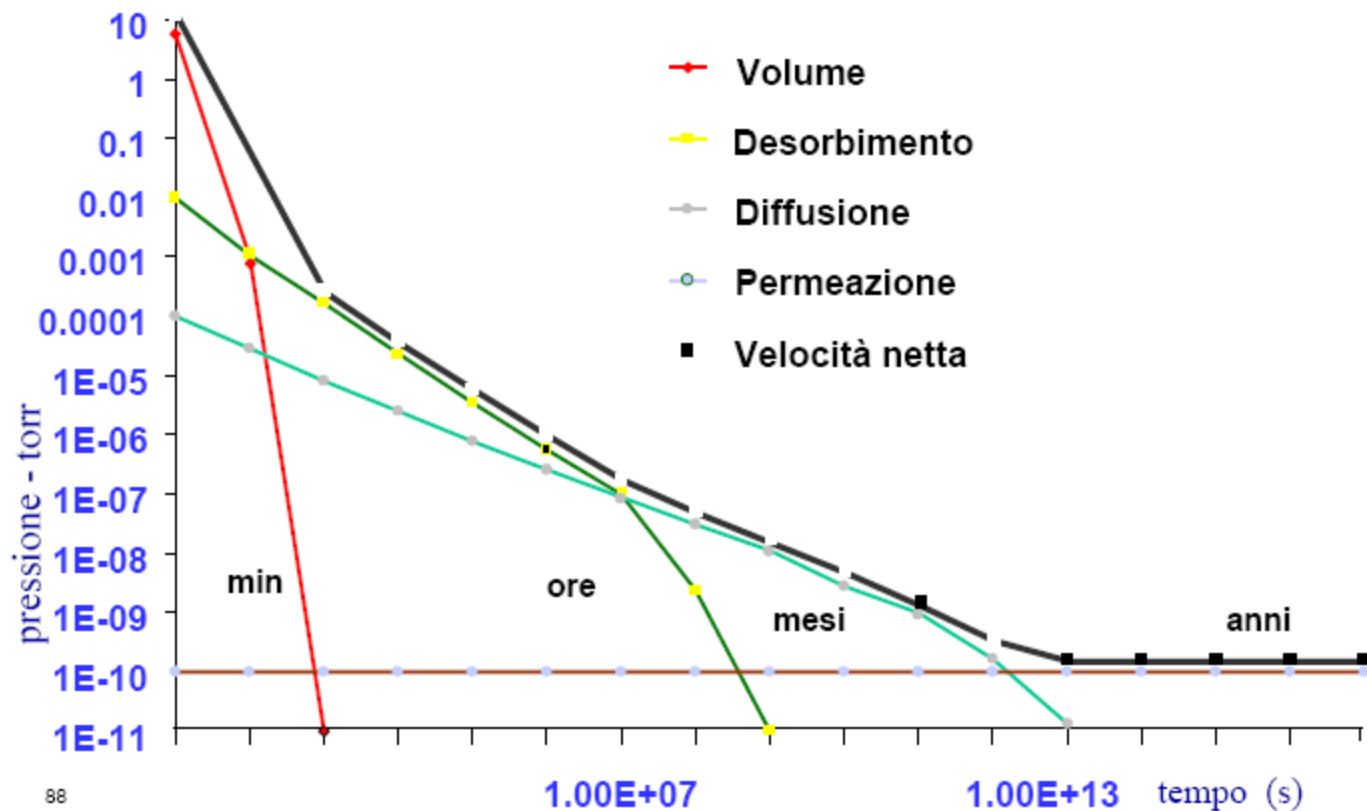
$1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-10}$ Pa

Mantenere il vuoto

- Atomi materiale della parete
- diffusione
- Permeazione
- Assorbimento/desorbimento

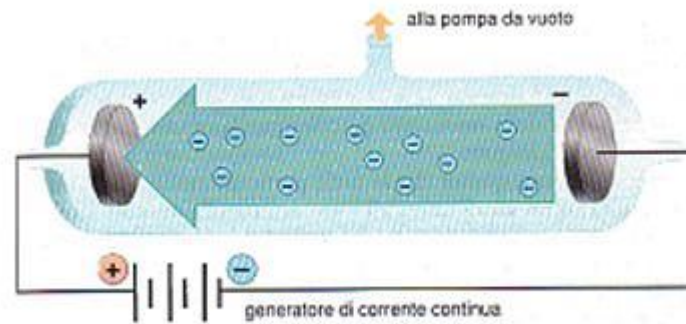


Mantenere il vuoto



LA SCARICA ELETTRICA NEI GAS RAREFATTI

Lo studio del passaggio dell'elettricità in gas rarefatti iniziò verso la metà dell'800. Le osservazioni vennero effettuate in tubi di vetro pieni d'aria o di altri gas, con due piastre metalliche (elettrodi) fissate all'interno e collegate ad un generatore di corrente.



Quando il tubo è pieno d'aria, anche applicando agli elettrodi una differenza di potenziale molto elevata non si osserva alcun fenomeno in quanto **l'aria** (e più in generale i gas) a pressione normale, **non conduce l'elettricità**.

Il fisico inglese **William Crookes**, riuscì a fissare, saldando, vetro con metallo costruendo un recipiente detto appunto “**tubo di Crookes**” in cui era possibile applicare una differenza di potenziale e fare il vuoto con una pompa aspirante.



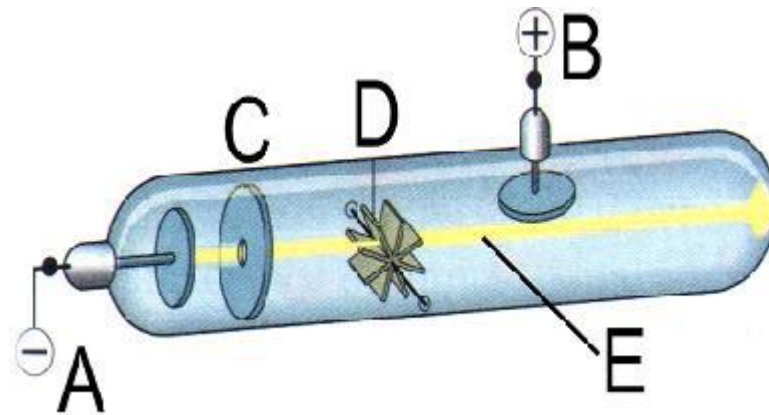
Molti scienziati studiarono, utilizzando tale tubo, il comportamento di gas ionizzati rarefatti, tra questi il fisico inglese Thomson a cui si deve la scoperta dell' elettrone. Estrahendo l'aria dal tubo, per mezzo di una pompa aspirante, fino a ridurre la pressione a pochi millimetri di mercurio, si nota il passaggio della corrente elettrica, prima sotto forma di una **scintilla** che procede a zigzag, poi sotto forma di una **luminosità diffusa** che riempie il tubo fino a fargli assumere l'aspetto familiare di quelli al neon.

Il **colore della luce** dipende dal gas con il quale è stato riempito il tubo: rosso per il neon, blu per l'azoto, rosa per l'idrogeno, e così via. Sottraendo ancora aria dall'interno del tubo, fino a raggiungere pressioni dell'ordine del decimo di millimetro di mercurio, la luminosità scompare del tutto, mentre diventa fluorescente la parete di vetro dirimpetto al catodo.

Se ora si volesse dare un'interpretazione a questo fenomeno, è evidente che debba trattarsi di qualcosa (raggi, onde, materia, energia?) che si sprigiona dal catodo eccitando prima la materia che si trova nel tubo e poi, quando questa è stata praticamente eliminata, la zona del tubo posta di fronte ad esso.

Già nel 1876, il fisico tedesco Eugen Goldstein, nella convinzione di avere a che fare con una qualche forma di energia, dette, alla radiazione che partiva dal catodo, il nome di "raggi catodici".

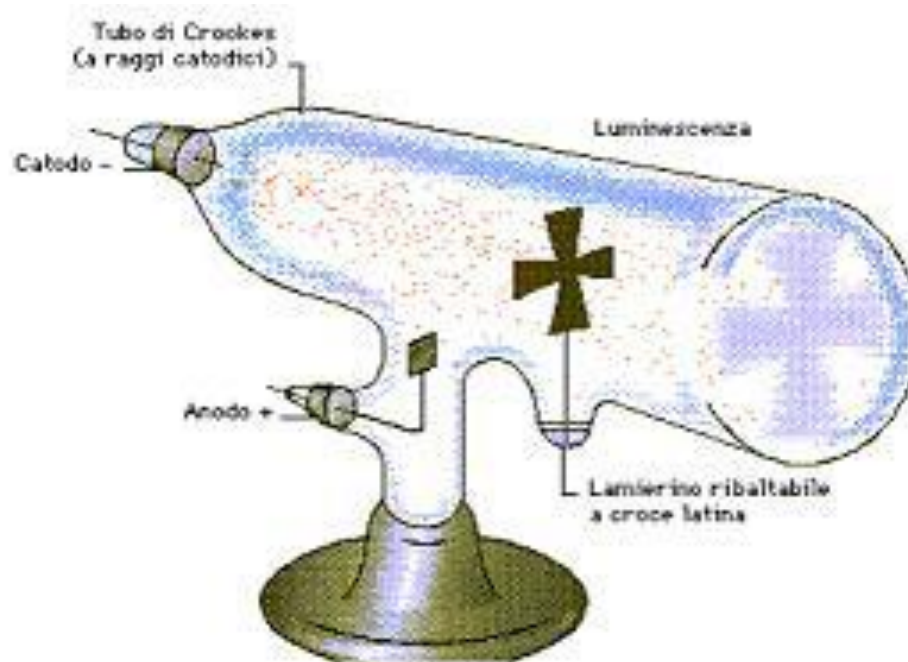
Alcuni anni più tardi, il fisico inglese William Crookes, per indagare sulla natura della radiazione catodica, apportò alcune modifiche ai tubi di scarica.



Spostando lateralmente l'anodo, egli osservò che la radiazione continuava a procedere in linea retta dal catodo verso la parete di fronte (anticatodo):

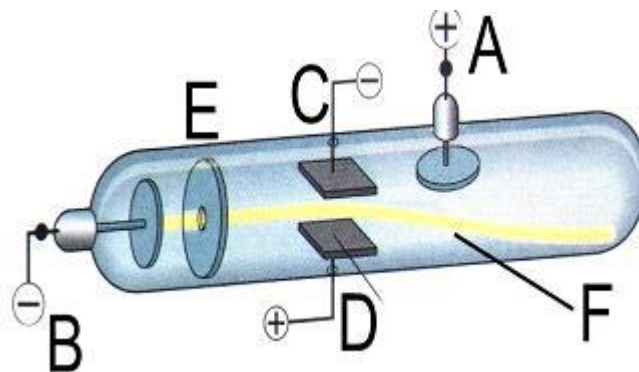
i raggi si propagavano in linea retta.

Se nel tubo veniva introdotto un leggerissimo mulinello, scorrevole su un binario, si osservava che esso, sotto l'effetto della radiazione, rotolava, dalla zona del catodo, verso quella opposta. Inoltre, interrompendo la radiazione catodica con un ostacolo, si poteva osservare, sulla parete di vetro posta di fronte, il formarsi di un'ombra netta, priva di aloni: **i raggi erano anche dei corpuscoli dotati di una propria massa.**



Gli esperimenti mettevano in evidenza che la radiazione che usciva dal catodo non poteva essere della stessa natura della luce, perché una forma di energia immateriale non sarebbe stata in grado di spingere un mulinello a pale; essa inoltre, incontrando un ostacolo, avrebbe dovuto generare, oltre all'ombra, un alone di penombra molto ben visibile. Le evidenze sperimentali suggerivano che doveva trattarsi di uno **sciame di corpuscoli**.

In seguito si dimostrò che i raggi catodici venivano **deviati da un campo magnetico** e si orientavano verso la polarità positiva del campo magnetico; pertanto non solo questi raggi erano delle particelle ma dovevano possedere anche una carica elettrica, la quale, tenuto conto del senso della deviazione, doveva essere di segno negativo. Fu infine deciso di riservare a queste particelle, e non alle cariche elettriche, come si era fatto in precedenza, il nome di **elettroni**.

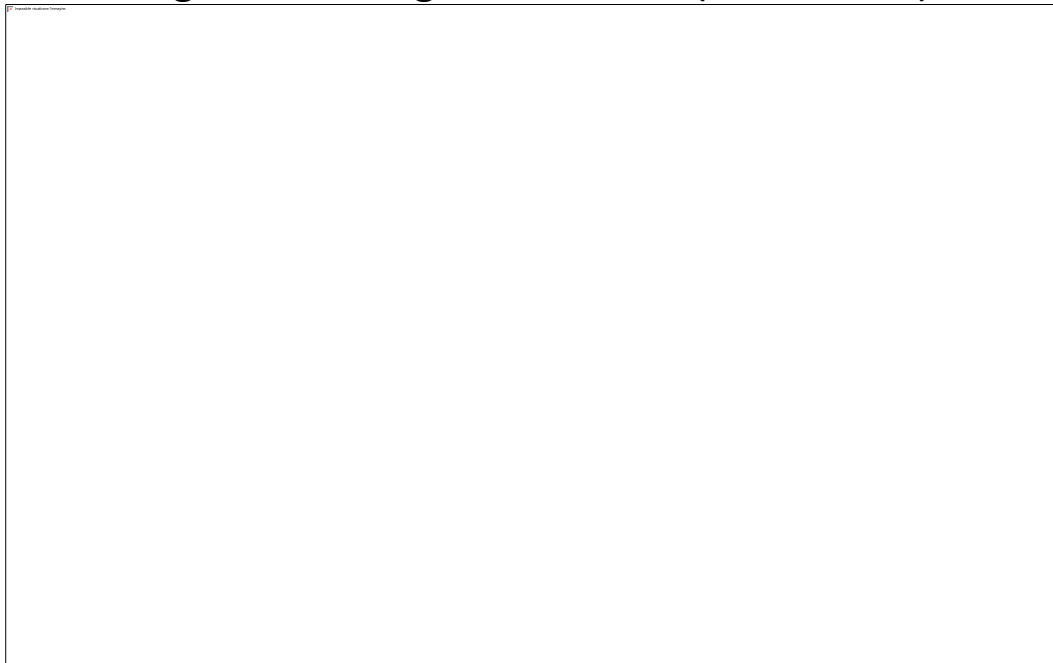


Si scoprì successivamente il valore della carica e della massa dell'elettrone che diventava così la più piccola particella di materia mai conosciuta. Esso pesa 1836 volte di meno del peso dell'atomo di idrogeno, il più leggero che esista in natura.

I "RAGGI CANALE" E I "RAGGI X"

La materia, in condizioni normali, si presenta elettricamente **neutra**. Era quindi logico pensare che se da essa si era riusciti ad estrarre corpuscoli carichi di elettricità negativa, gli elettroni appunto, dovessero essere presenti **residui carichi positivamente**. Era altrettanto naturale attendersi che tali frammenti di materia avrebbero dovuto seguire, nell'interno del tubo di scarica, un percorso in senso contrario a quello degli elettroni.

Venne pertanto praticato un foro nel catodo in modo che le particelle, provenienti dalla zona anodica, potessero attraversarlo. Fu così possibile rendere evidente una radiazione, a cui fu assegnato, da Eugen Goldstein (1850-1930), il nome provvisorio di **"raggi canale"**.



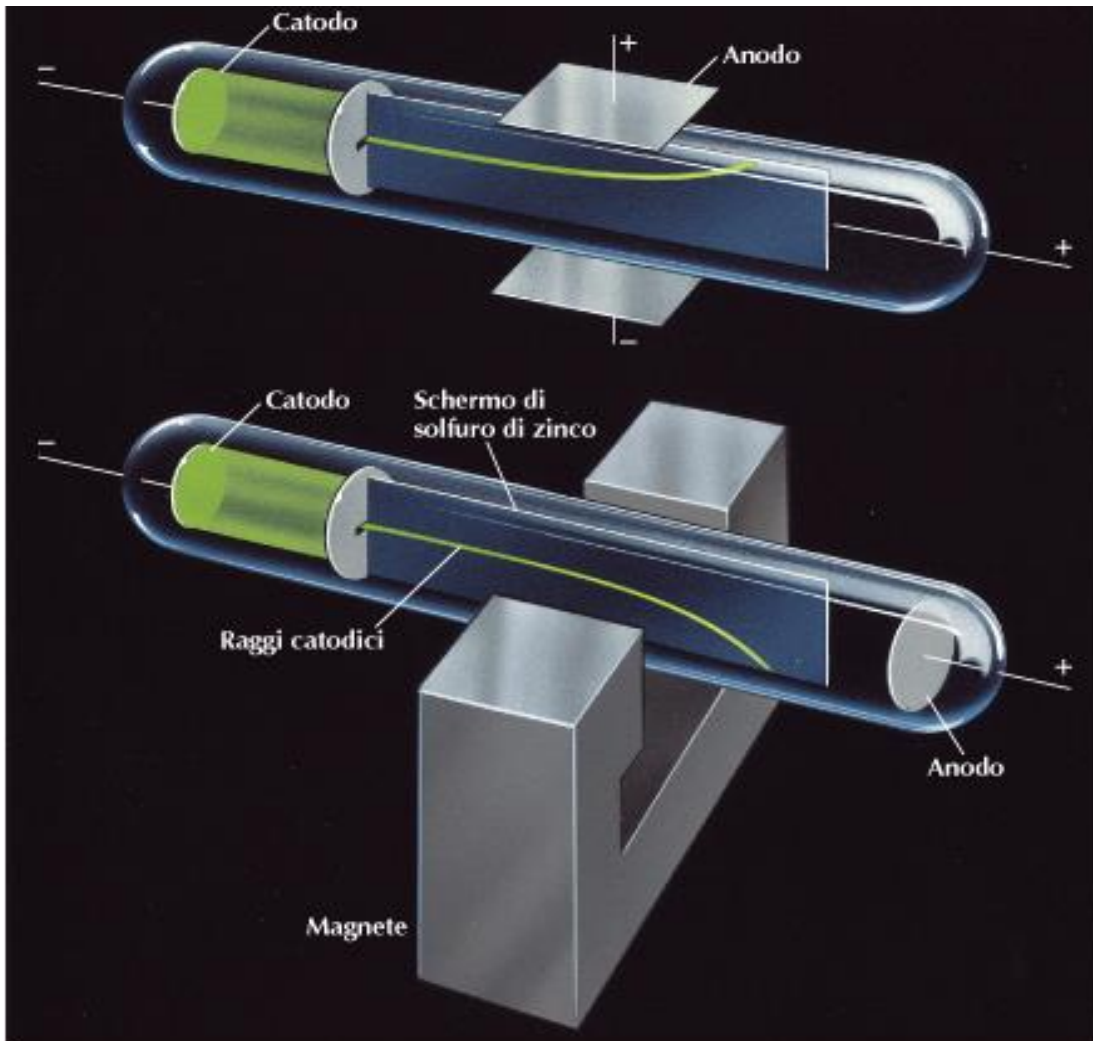
Anche questa radiazione, sottoposta all'azione del campo magnetico, deviava dalla sua traiettoria, ma in direzione opposta a quella dei raggi catodici. Si trattava perciò di particelle cariche di elettricità positiva, per le quali fu possibile determinare il valore del rapporto carica/massa, utilizzando tecniche analoghe a quelle adottate per l'elettrone.

Quando fu possibile misurare la carica elettrica di questi nuovi corpuscoli, e risultò essere dello stesso valore di quella trovata per l'elettrone (anche se di segno opposto), fu possibile conoscere la massa di tali particelle: essa risultava praticamente identica a quella degli atomi o delle molecole che riempivano il tubo di scarica.

Si pensò che i raggi canale, quindi, fossero **ioni positivi**.

In effetti, essi sono i nuclei dei gas a cui i raggi catodici hanno sottratto gli elettroni.

Esperimento di Thomson

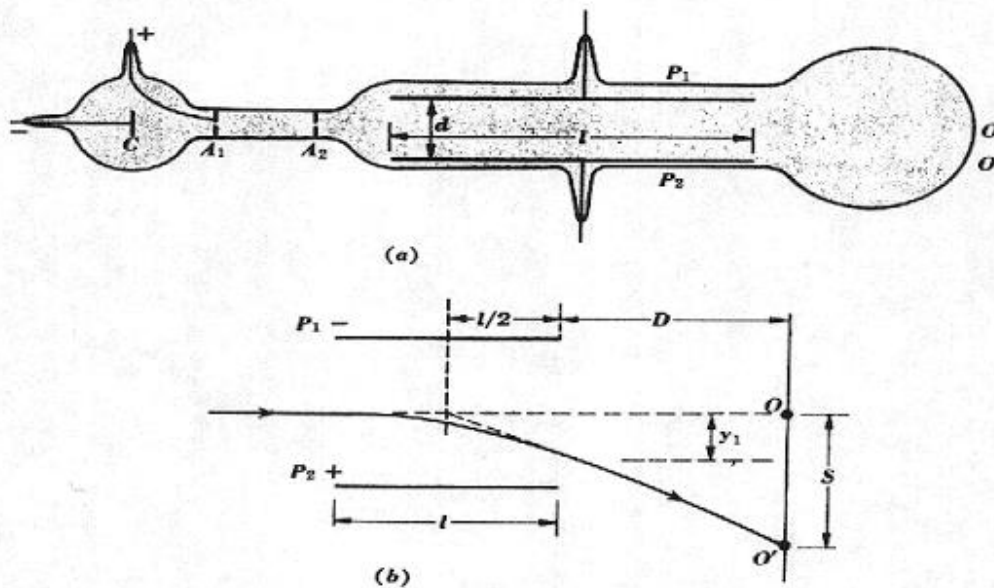


La deviazione di un raggio catodico da parte di un campo elettrico.

La deviazione di un raggio catodico da parte di un campo magnetico.

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



$$\frac{e}{m} = 1.76 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

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

Curva caratteristica della scarica nel gas

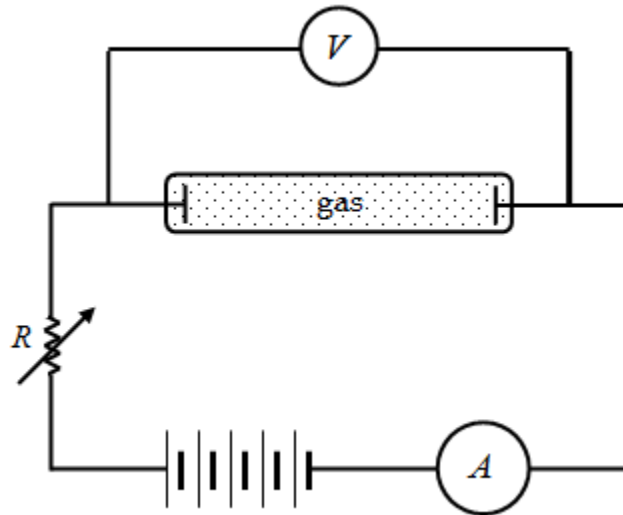
La produzione di ioni per urti determina una **corrente elettrica** tra i due elettrodi (**scarica**) rappresentabile come **funzione della differenza di potenziale ΔV** :

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

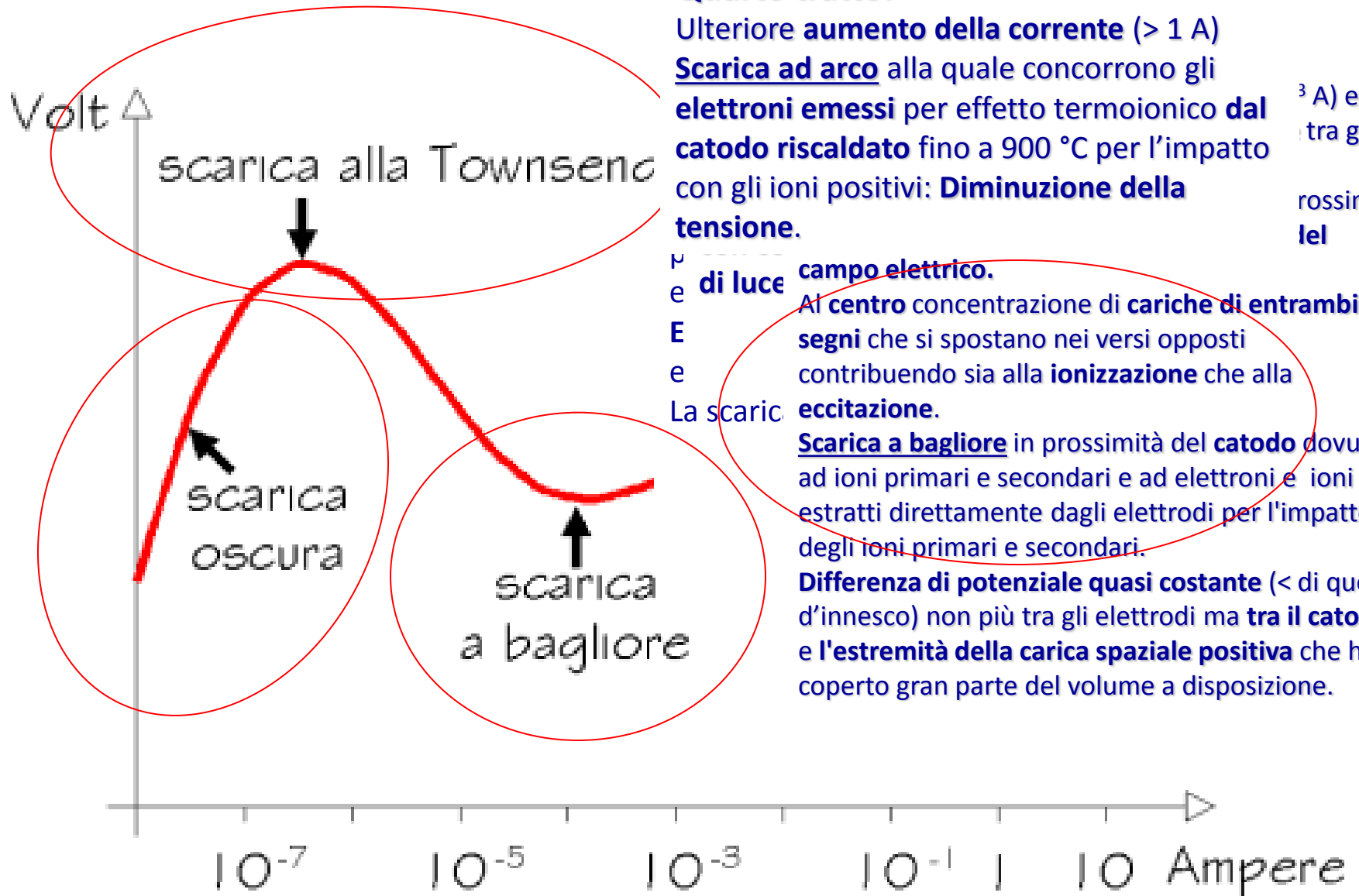
detta **caratteristica del tubo a scarica**.

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

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



CURVA CARATTERISTICA DELLA SCARICA NEI GAS



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 $900\text{ }^\circ\text{C}$ per l'impatto con gli ioni positivi: **Diminuzione della tensione.**

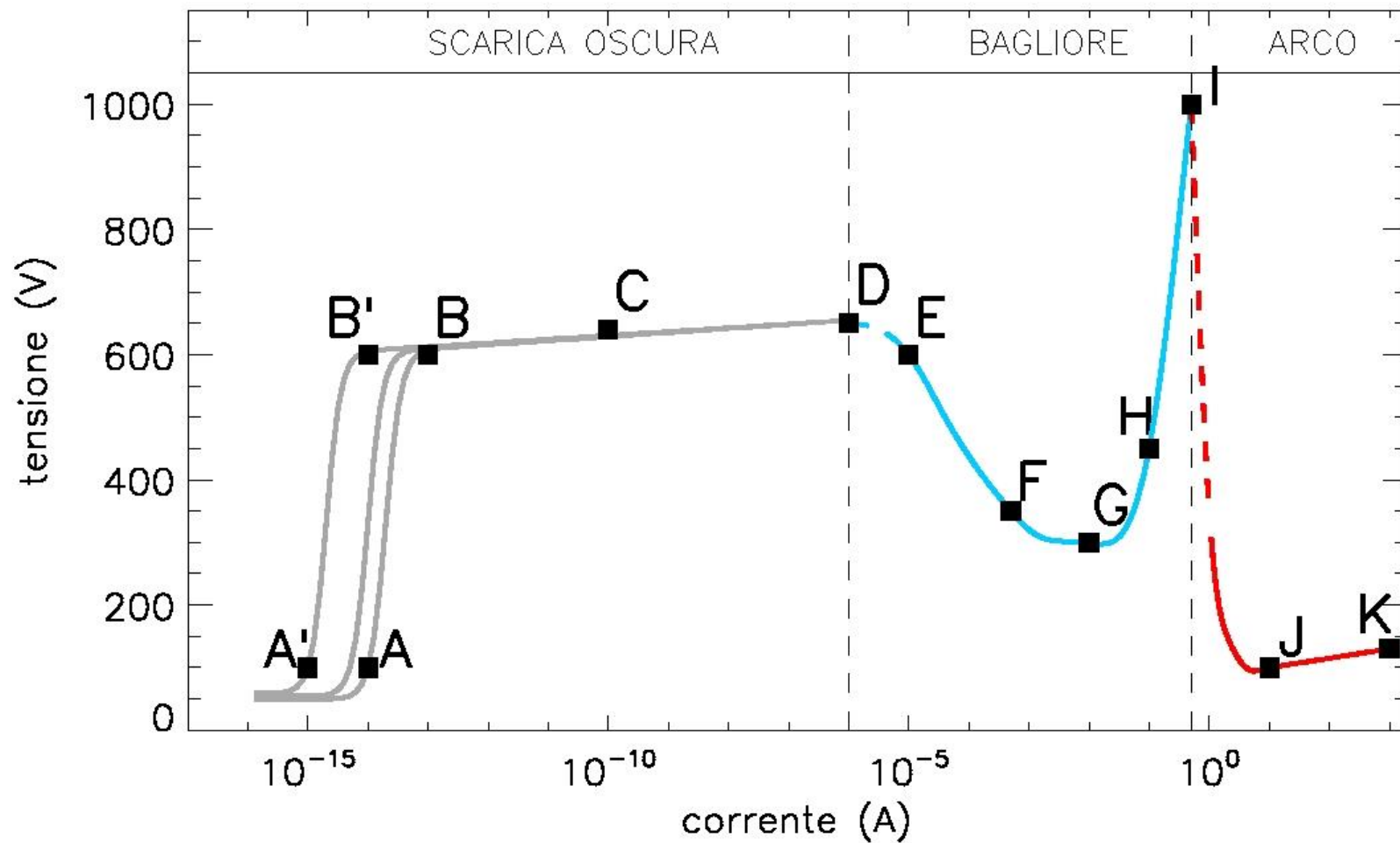
di luce campo elettrico.

Al centro concentrazione di **cariche di entrambi i segni** che si spostano nei versi opposti contribuendo sia alla **ionizzazione** che alla **eccitazione.**

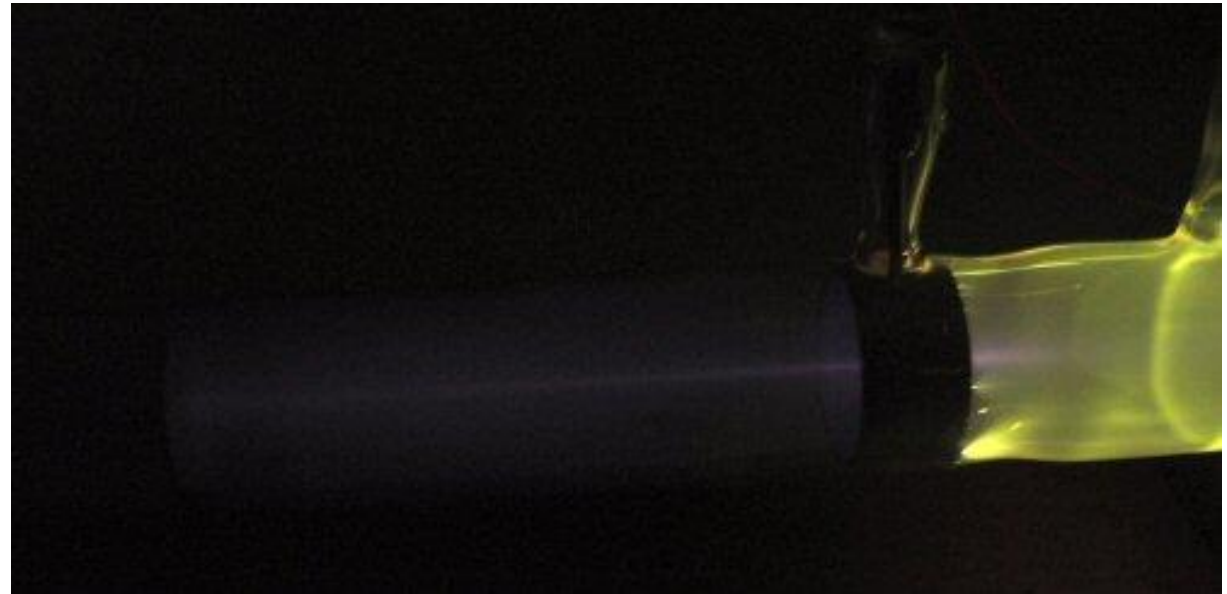
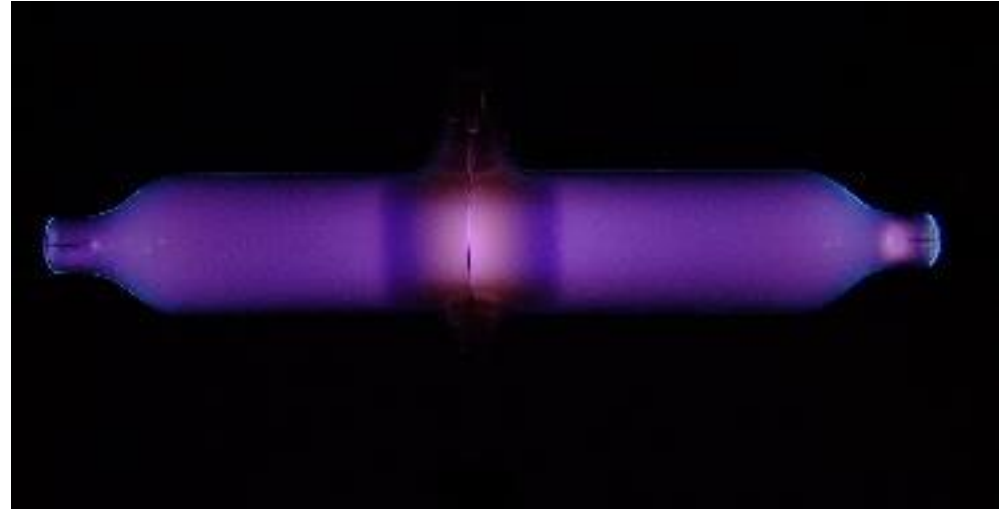
La scarica **Scarica a bagliore** in prossimità del **catodo** dovuta ad ioni primari e secondari e ad elettroni e ioni estratti direttamente dagli elettrodi per l'impatto degli ioni primari e secondari.

Differenza di potenziale quasi costante ($<$ di quella d'innesco) non più tra gli elettrodi ma **tra il catodo e l'estremità della carica spaziale positiva** che ha coperto gran parte del volume a disposizione.

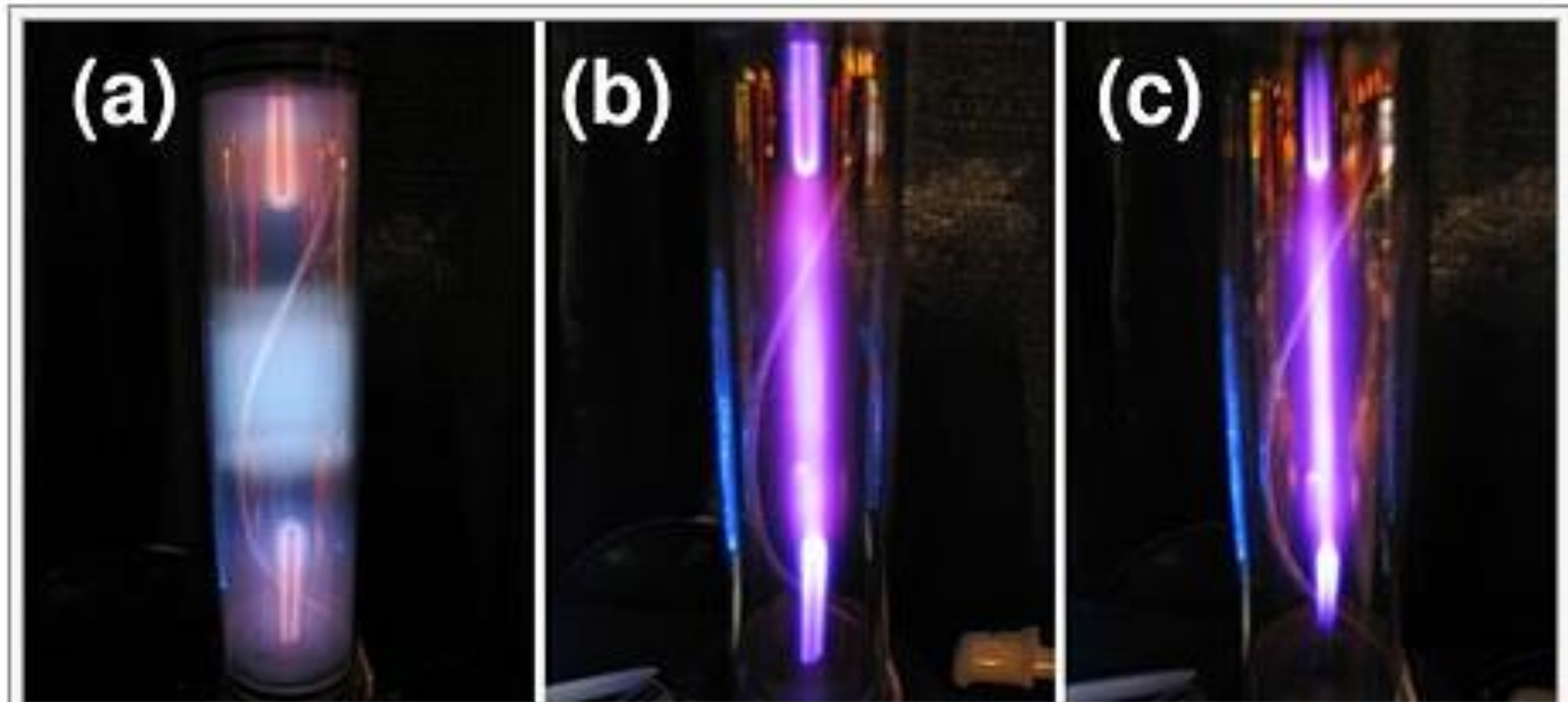
Curva caratteristica in tubi di Crookes



Tubi di crookes



Effetti luminosi in tubi di Crookes



La transizione dalla scarica a bagliore all'arco si può ottenere semplicemente aumentando la **pressione del gas** di riempimento, come nell'esempio qui mostrato: da (a) a (c) la scarica passa dalla glow, dove il bagliore occupa tutto il tubo da vuoto, all'arco, dove la scarica invece assume gradualmente la forma di una scintilla, e occupa solo la parte centrale del tubo. Gas:argon.

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.



Fig. 3a $p = 1013$ mbar: no discharge occurs ($U = 5.0$ kV)

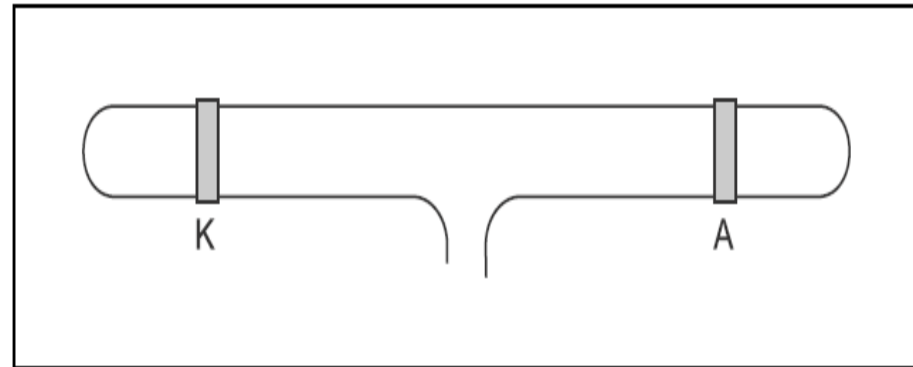


Fig. 3b $p = 40$ mbar: small luminous cone in front of the cathode
(blue-red streamer from the cathode to the anode,
 $U = 2.6$ kV)

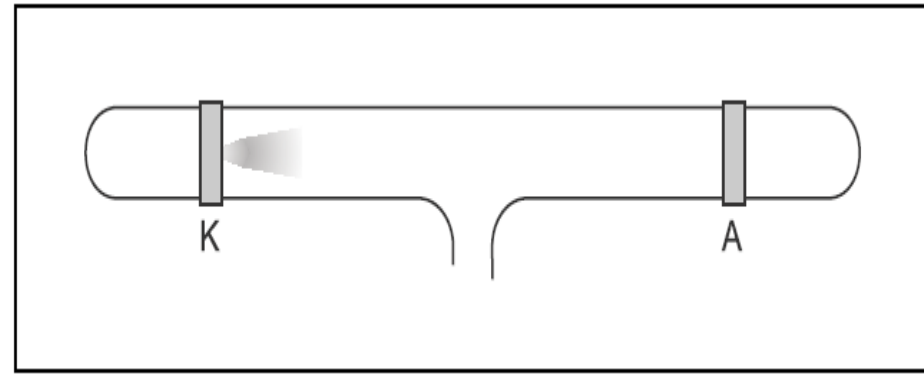


Fig. 3c $p = 7$ mbar: the streamer becomes thicker (positive column), small luminous spot at the cathode, small dark space in front of the cathode ($U = 1.1$ kV)

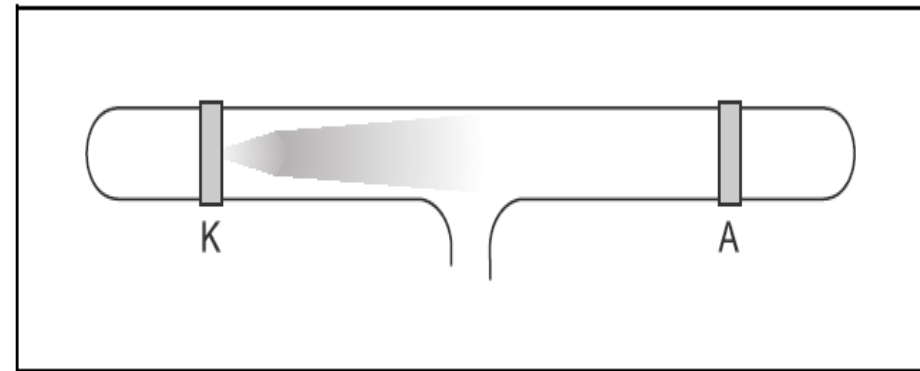


Fig. 3d $p = 0.8$ mbar: the whole cathode is covered with a luminous layer; dark space between cathode and the positive column widens ($U = 0.8$ kV)

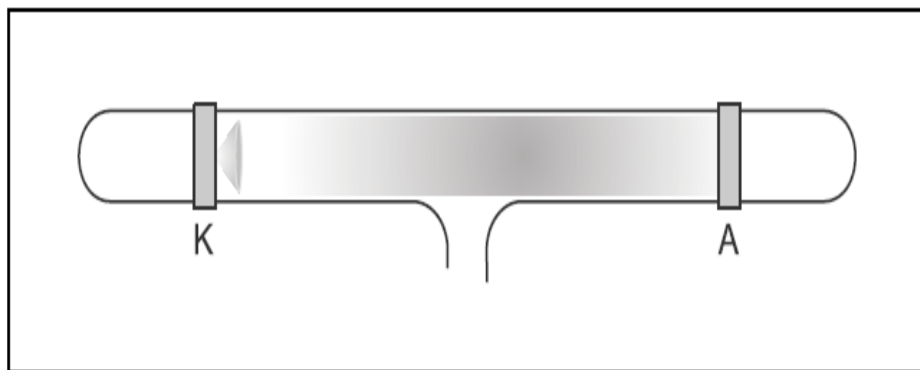


Fig. 3e $p = 0.35$ mbar: positive column loses colour, and bright and dark zones emerge ($U = 0.6$ kV)

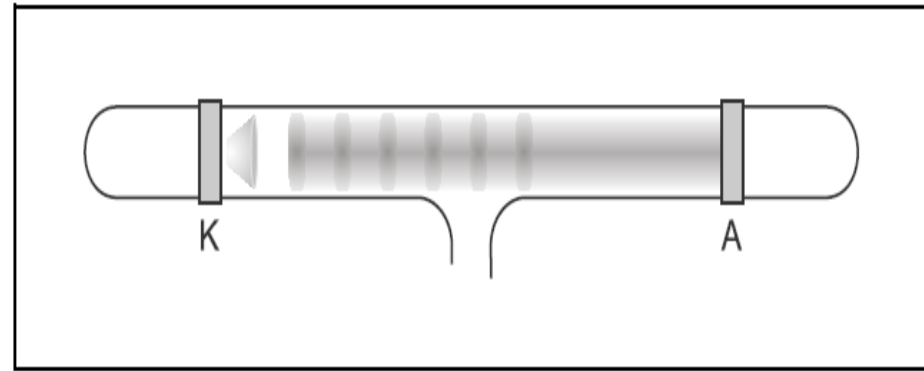


Fig. 3f $p = 0.2$ mbar: diffuse light at the cathode, large dark space, positive column: distance between layers increases ($U = 0.7$ kV)

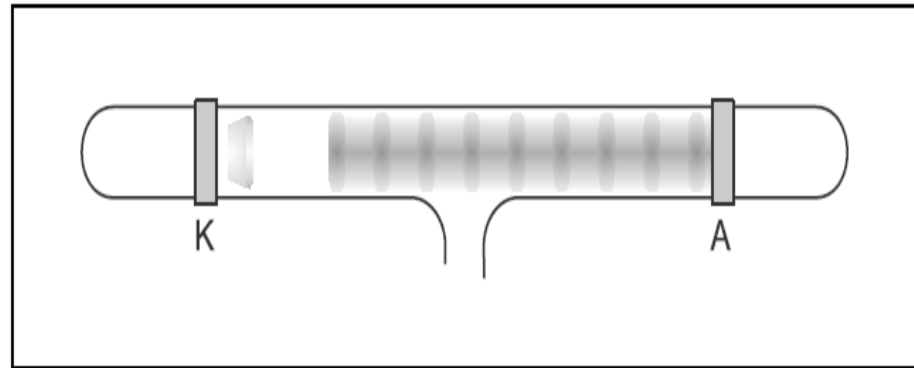


Fig. 3g $p = 0.1$ mbar: dark space widens; layers in the positive column become mushroom shaped ($U = 0.8$ kV)

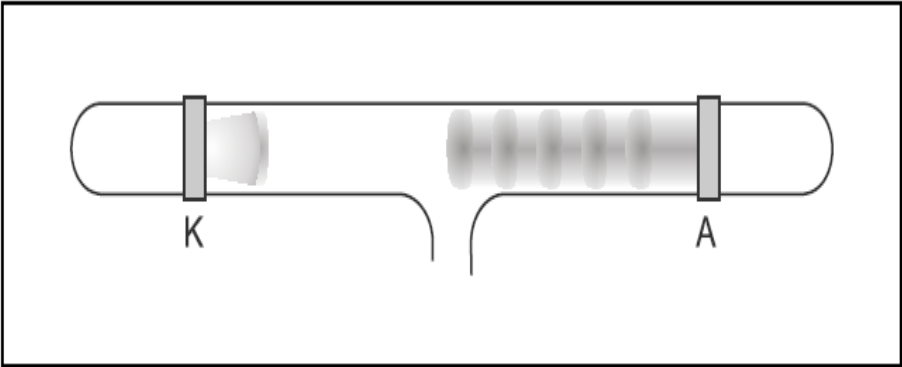


Fig. 3h $p = 0.06$ mbar: glow light in front of the cathode expands, and the positive column disappears ($U = 1.8$ kV)

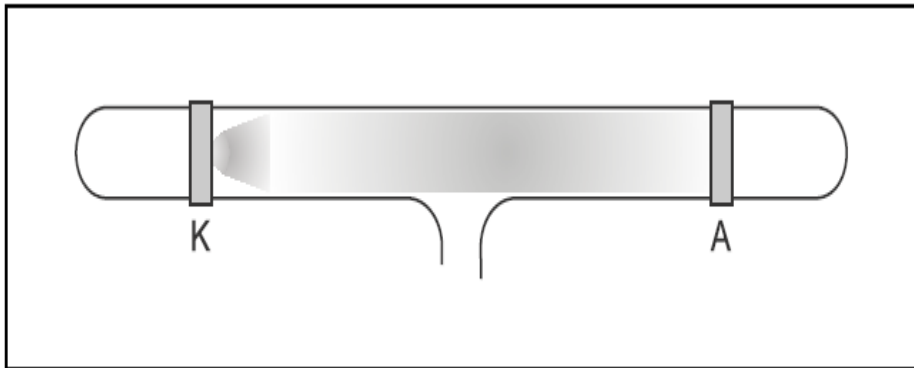
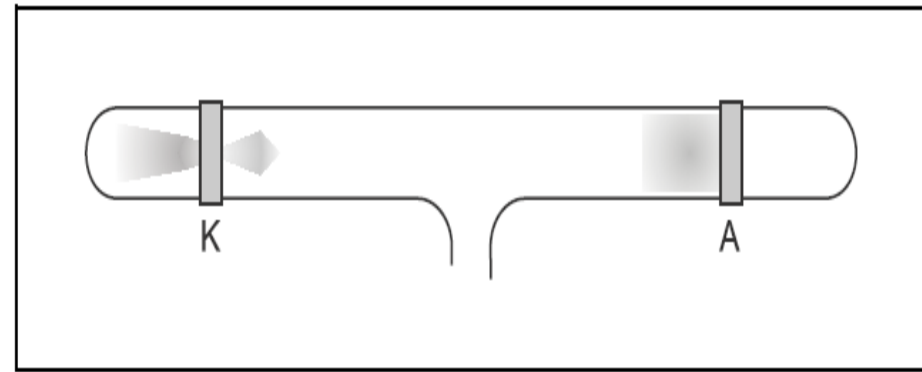


Fig. 3i $p = 0.035$ mbar: glow light in front of the cathode disappears; in front of the anode fluorescence arises, and behind the cathode there is a luminous effect ($U = 5.0$ kV)



Bibliografia

Libri:

- Y.P. Raizer, *Gas Discharge Physics*
- B.M. Smirnov, *Physics of ionized gases*
- M.A. Liberman, A.J. Lichtenberg, *Principles of plasma discharges and materials processing*

Articoli:

- R.A. Truemann et al., *PHYSICS OF ELECTRIC DISCHARGES IN ATMOSPHERIC GASES: AN INFORMAL INTRODUCTION*, arXiv:0711.1672v2
- N. Braithwaite, *Introduction to gas discharges*, *Plasma Sources Sci. Technol.* **9** (2000) 517–527

Links:

- https://it.wikipedia.org/wiki/Ionizzazione_dei_gas
- <http://bagliorinelvuoto.scienze.unipd.it/bagliori/bagliori.html>