

Ionizzazione nei gas

Andrea Fontana

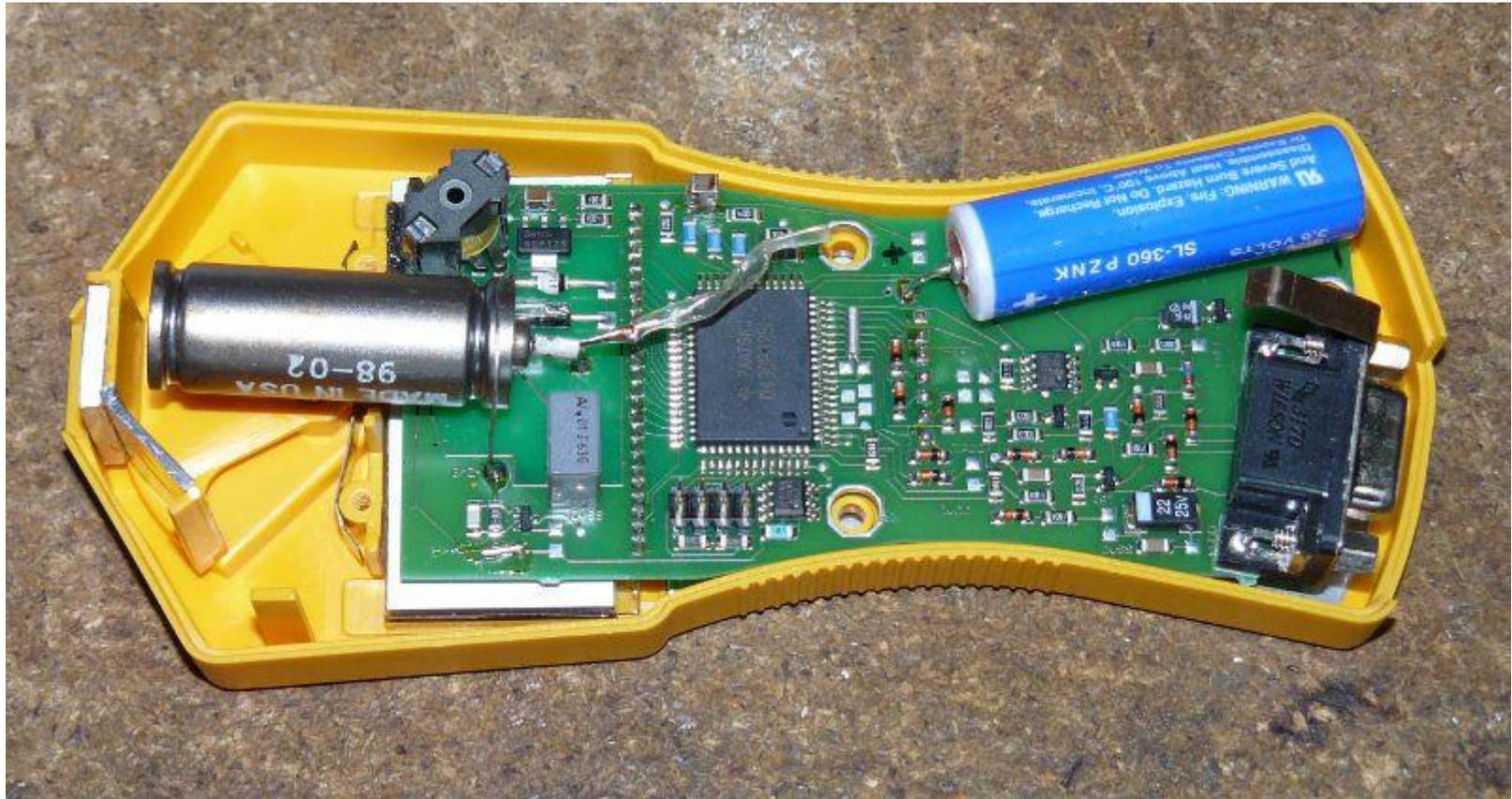
INFN Pavia

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

Come funziona un contatore Geiger?



Come funziona un contatore Geiger?



L'aria e' un isolante o un conduttore?

L'aria e' un isolante o un conduttore?

- isolante

perche' a circuito aperto una batteria non si scarica?



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?



Rivelazione delle radiazioni ionizzanti

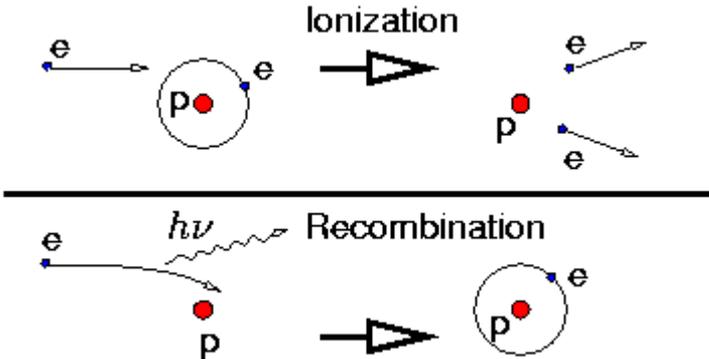
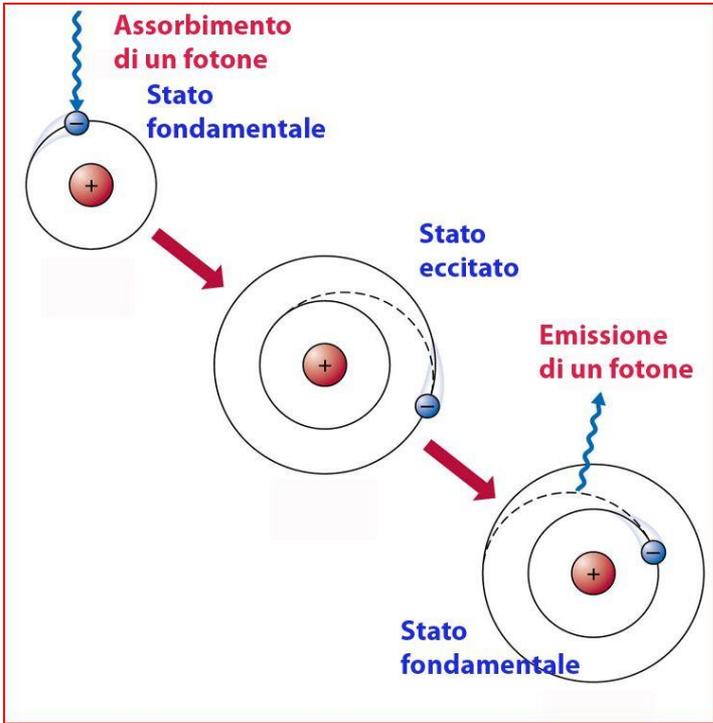
Nelle tecniche di rivelazione delle **radiazioni ionizzanti** le grandezze da rivelare possono essere diverse:

- 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**)

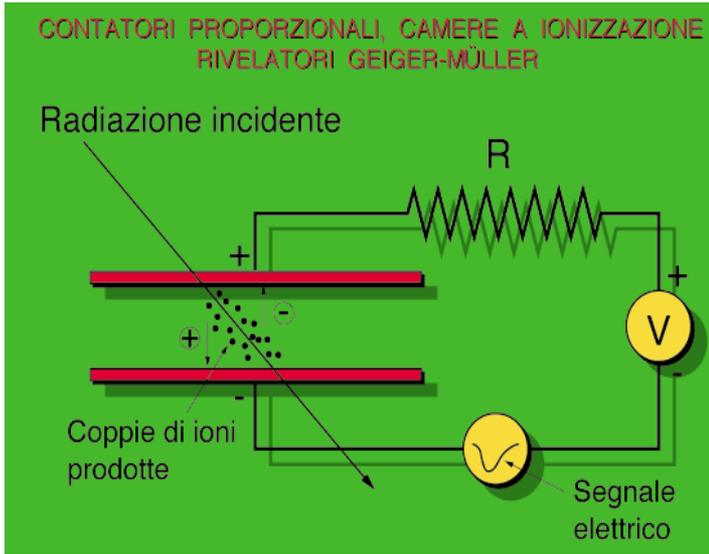
Queste varie informazioni sono ottenibili sfruttando i due processi che avvengono a seguito dell'interazione della radiazione con la materia (rivelatore):

- **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.

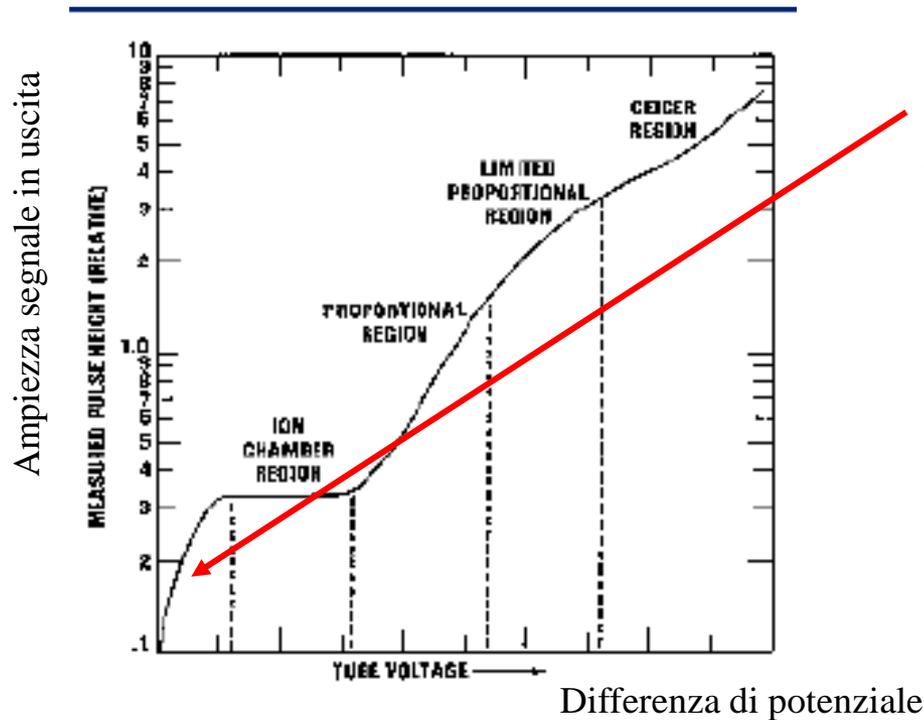
In presenza di un campo elettrico gli elettroni e gli ioni liberati dalla radiazione sono accelerati lungo le linee del campo verso l'anodo e il catodo rispettivamente. Questa accelerazione è interrotta dalle collisioni con le molecole del gas che limita la velocità massima raggiunta ottenuta lungo la 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**: $Q < N \cdot e$

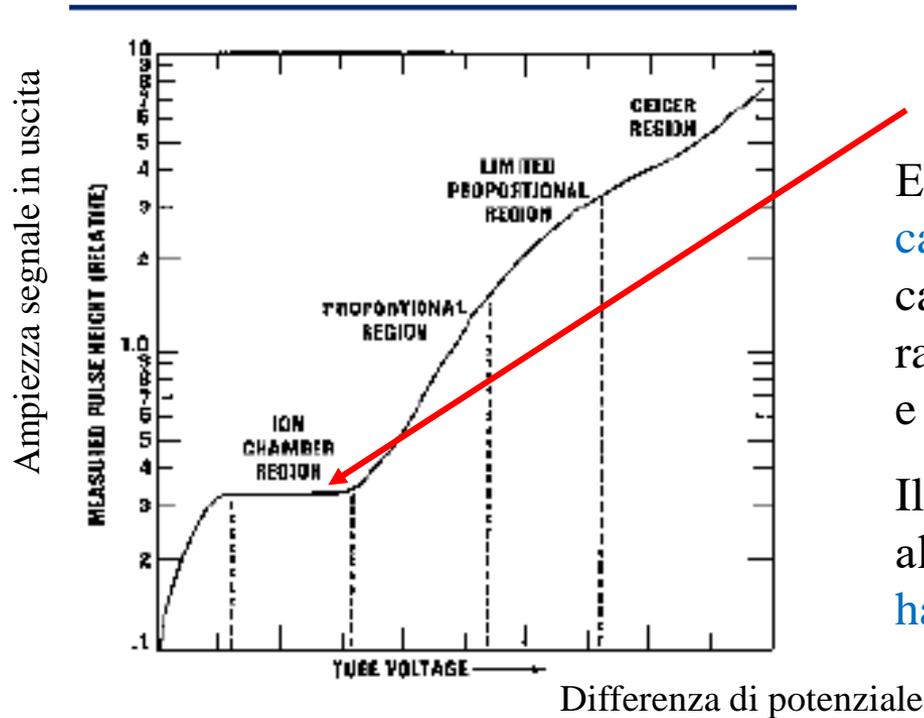
Il campo elettrico applicato non è sufficiente a separare tutti gli ioni prodotti dalla radiazione, che quindi in parte si ricombinano

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**: $Q=N \cdot e$

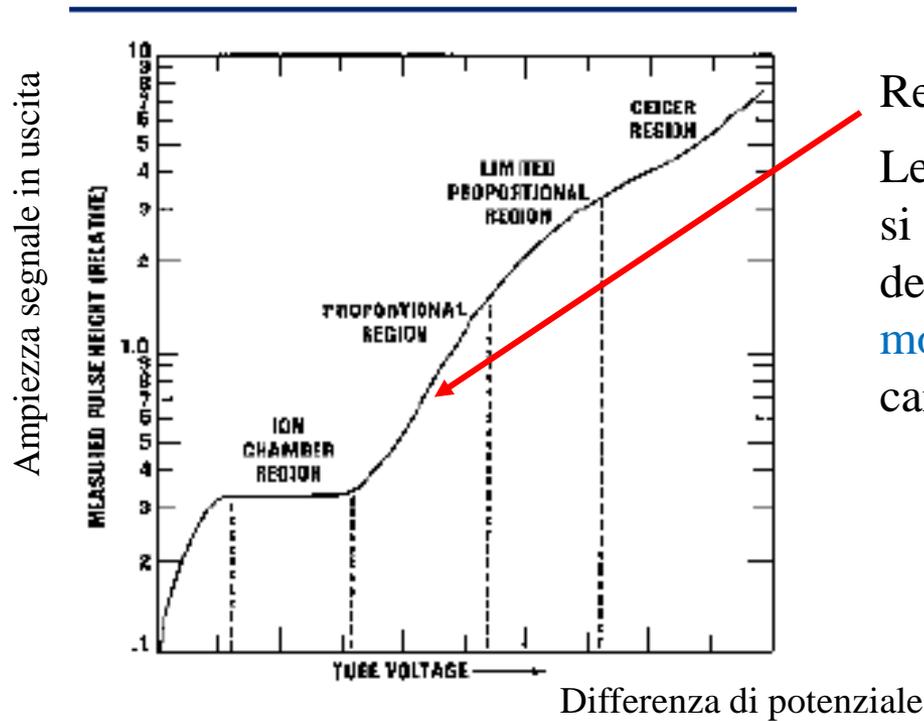
E' l'intervallo di tensione in cui opera la **camera a ionizzazione**. Tutte e sole le cariche liberate dal passaggio della radiazione vengono raccolte agli elettrodi e contribuiscono al segnale elettrico

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: $Q = M(\Delta V) \cdot N \cdot e$

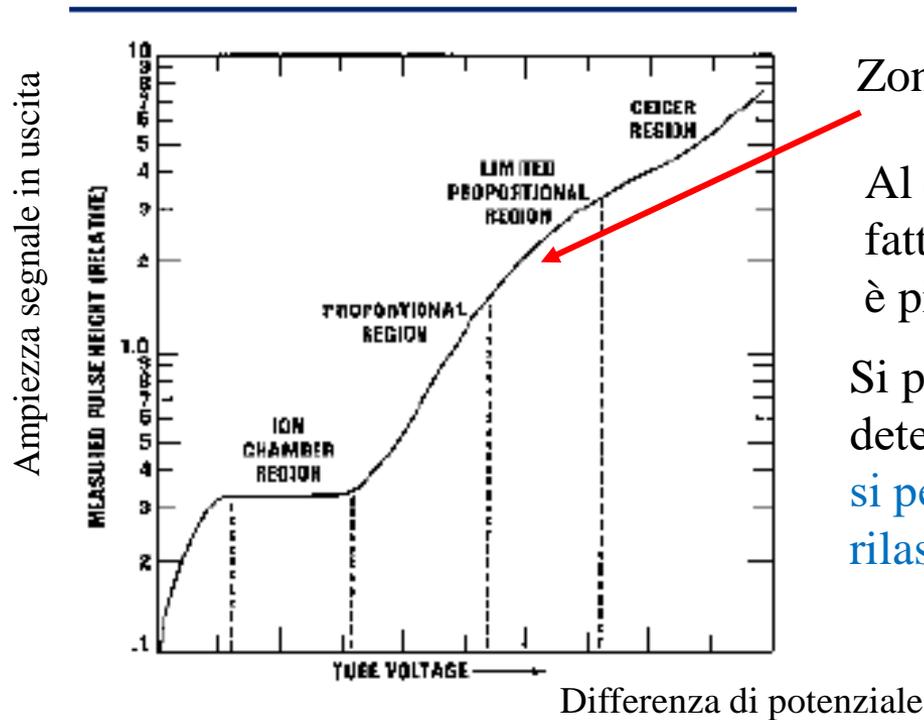
Le tensioni sono sufficientemente alte da far sì che la carica liberata dalla interazione della radiazione con il gas venga **moltiplicata** per effetto degli urti delle cariche stesse con le molecole neutre del gas

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**: $Q = M^* \cdot N \cdot e$

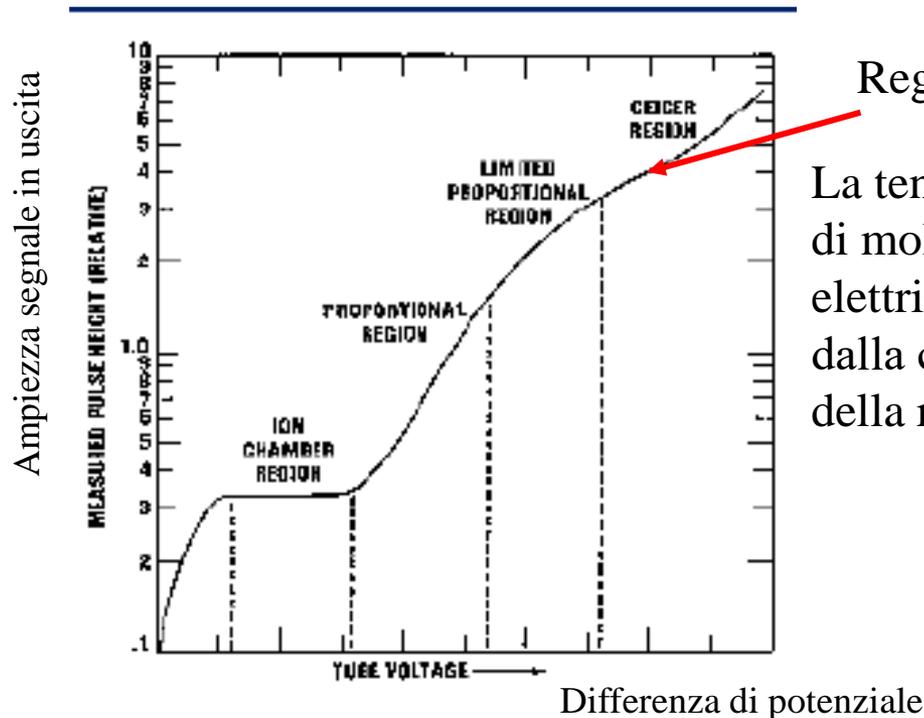
Al crescere della tensioni tra gli elettrodi il fattore di moltiplicazione M aumenta, ma non è più solo dipendente dalla tensione stessa

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:

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

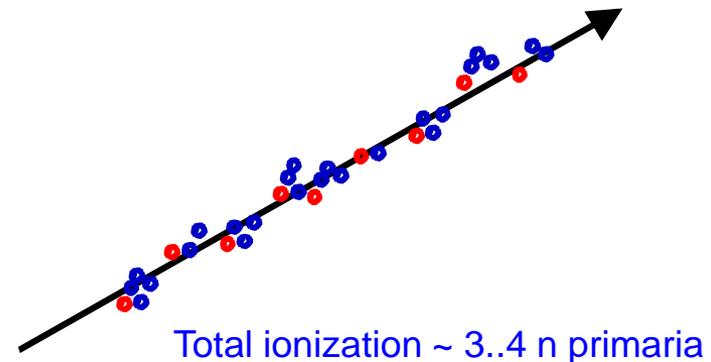
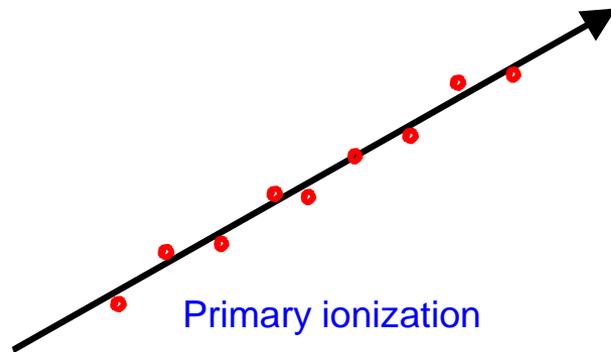
Tale parametro è importante ai fini della **risoluzione energetica di un rivelatore**.

In un **rivelatore a semiconduttore**:

$$w = 3.5 \text{ eV}$$

Ionizzazione dei gas

Pittoricamente una particella carica che attraversa un gas produce una traccia di ionizzazione:



Il numero totale di coppie ioni-elettroni prodotti in Δx sarà:

$$n_{totale} = \frac{\Delta E}{w_i}$$

dove ΔE non è altro che la perdita di energia (Bethe-Block) nel tratto Δx e w_i è la perdita di energia media per coppia ione-elettrone.

Rivelatori a gas



Contatori Geiger-Müller

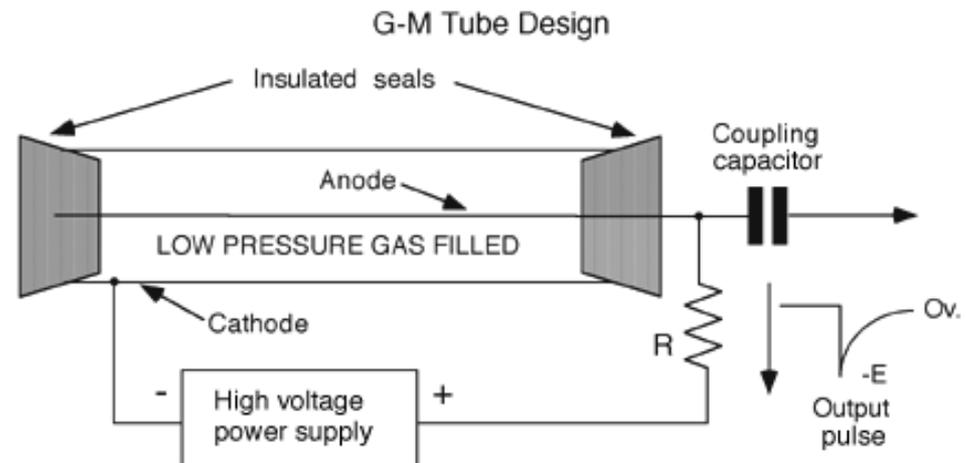
Operano nella regione E della curva segnale d'uscita-potenziale in un rivelatore a gas.

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.***

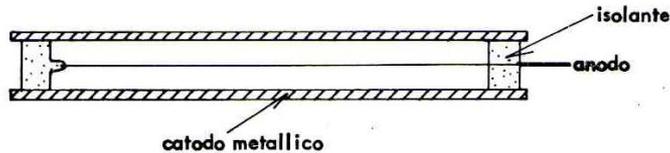
Infatti oltre alla ionizzazione si hanno fenomeni quali l'eccitazione seguita da emissione di luce visibile e ultravioletta. Una piccola parte di tali fotoni dà luogo ad emissione di fotoelettroni che generano nuova ionizzazione, tramite il processo della moltiplicazione a valanga.

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

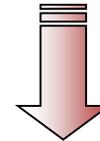


Caratteristiche

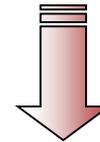
- Geometria cilindrica
- Gas a bassa affinità elettronica

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

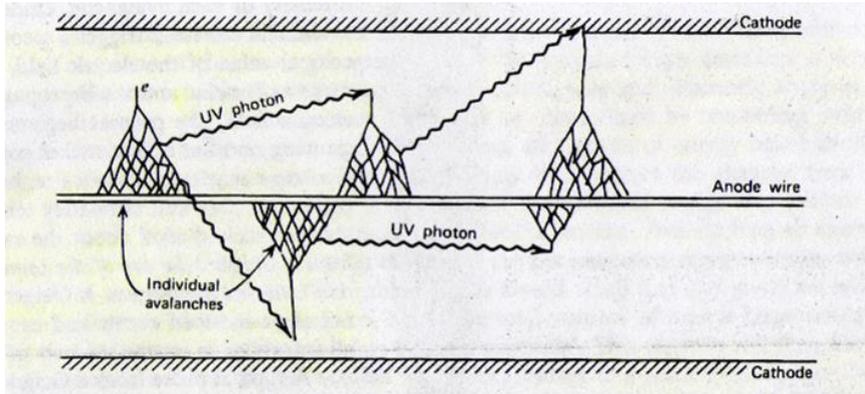
Termina quando si è creata la stessa carica



Tutti gli impulsi hanno la stessa ampiezza



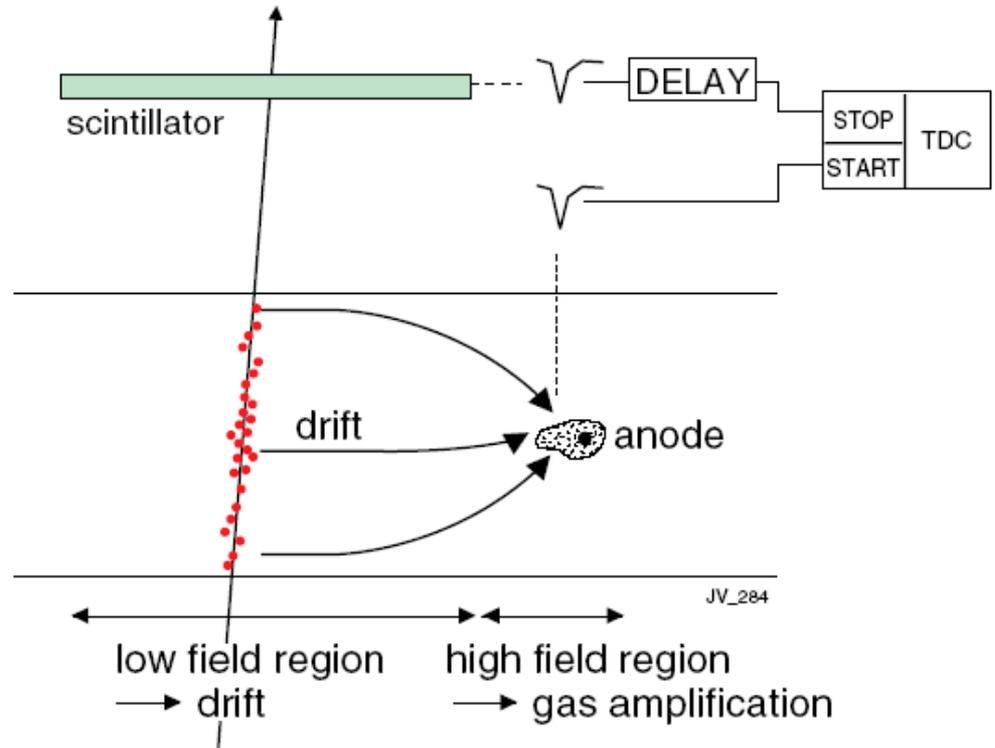
Contatore Geiger = Contatore di radiazione



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

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

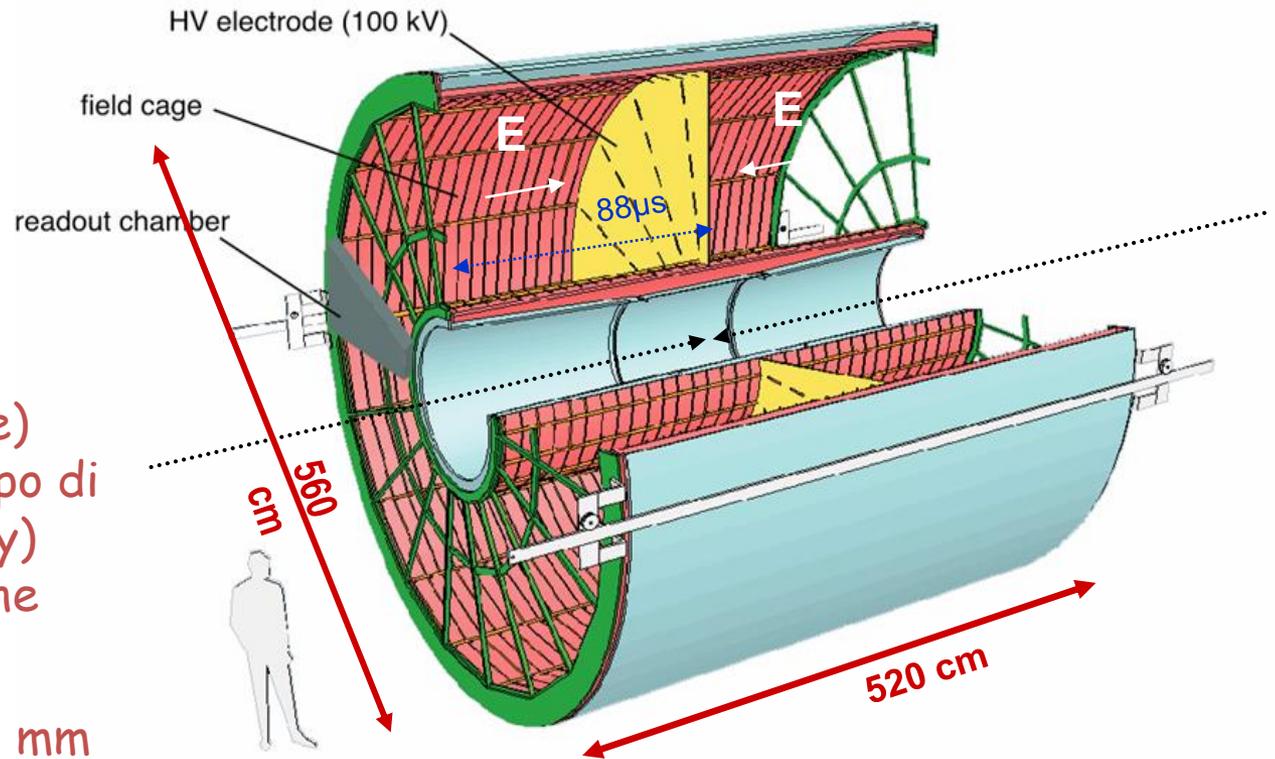


Premio Nobel 1992 per invenzione camera proporzionale multifilo (MWPC)

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.

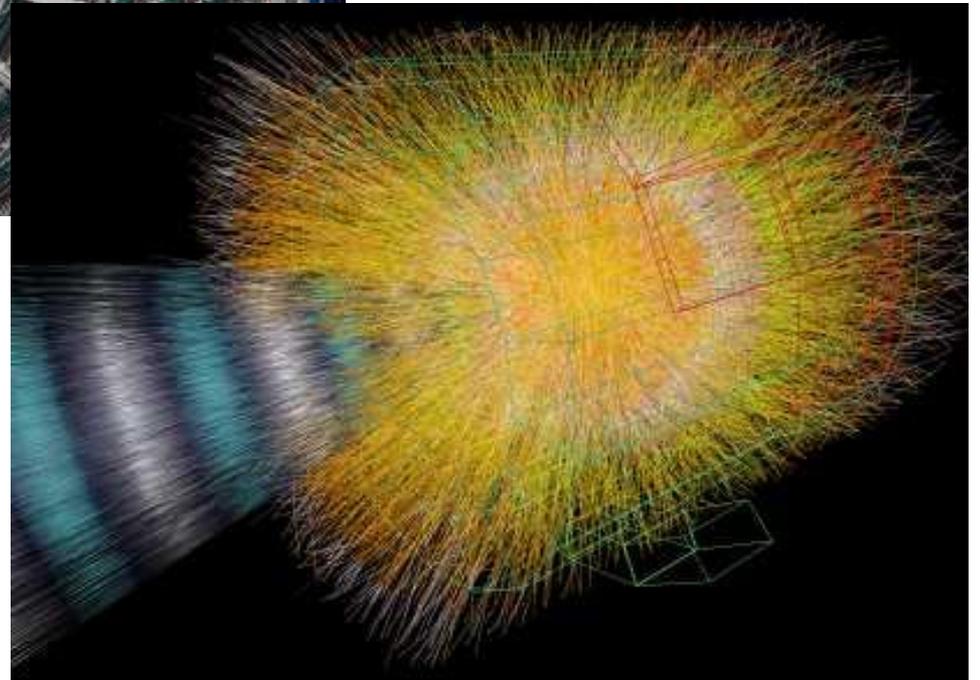
Risoluzione tipiche: 0.5 mm

TPC: Time Projection Chambers



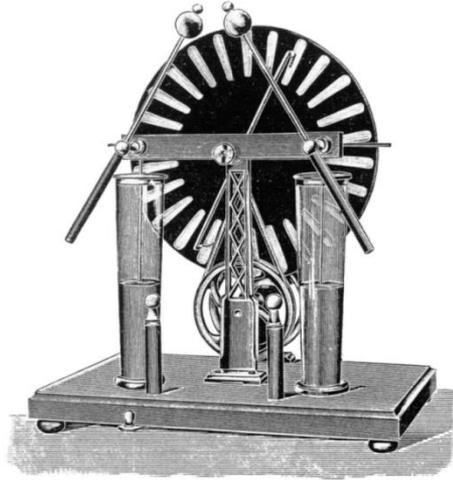
La TPC di Alice.

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



Ma facciamo un passo indietro...

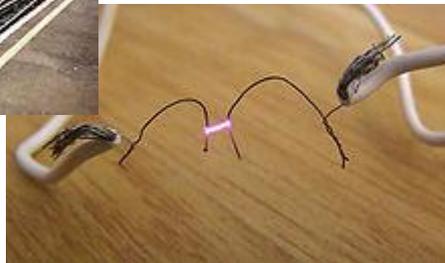
Fenomeni di scariche elettriche in gas sono noti all' uomo da molto tempo...



...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 occorrevano 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).

Bagliori nel vuoto

1676

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

1700

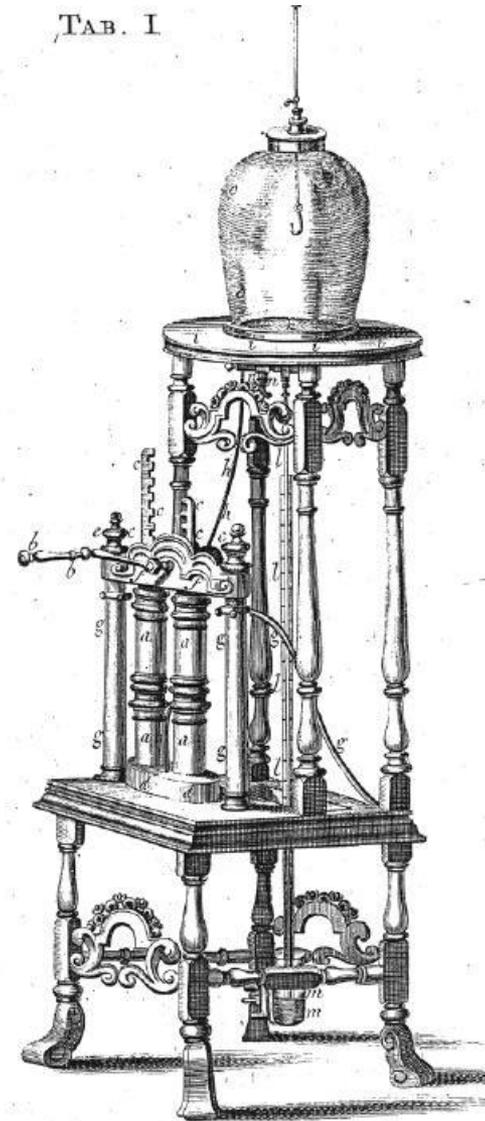
Johann Bernoulli s'interessa al fenomeno e mostra che la luminescenza è legata al moto del mercurio e al grado di rarefazione.

1705-1709

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

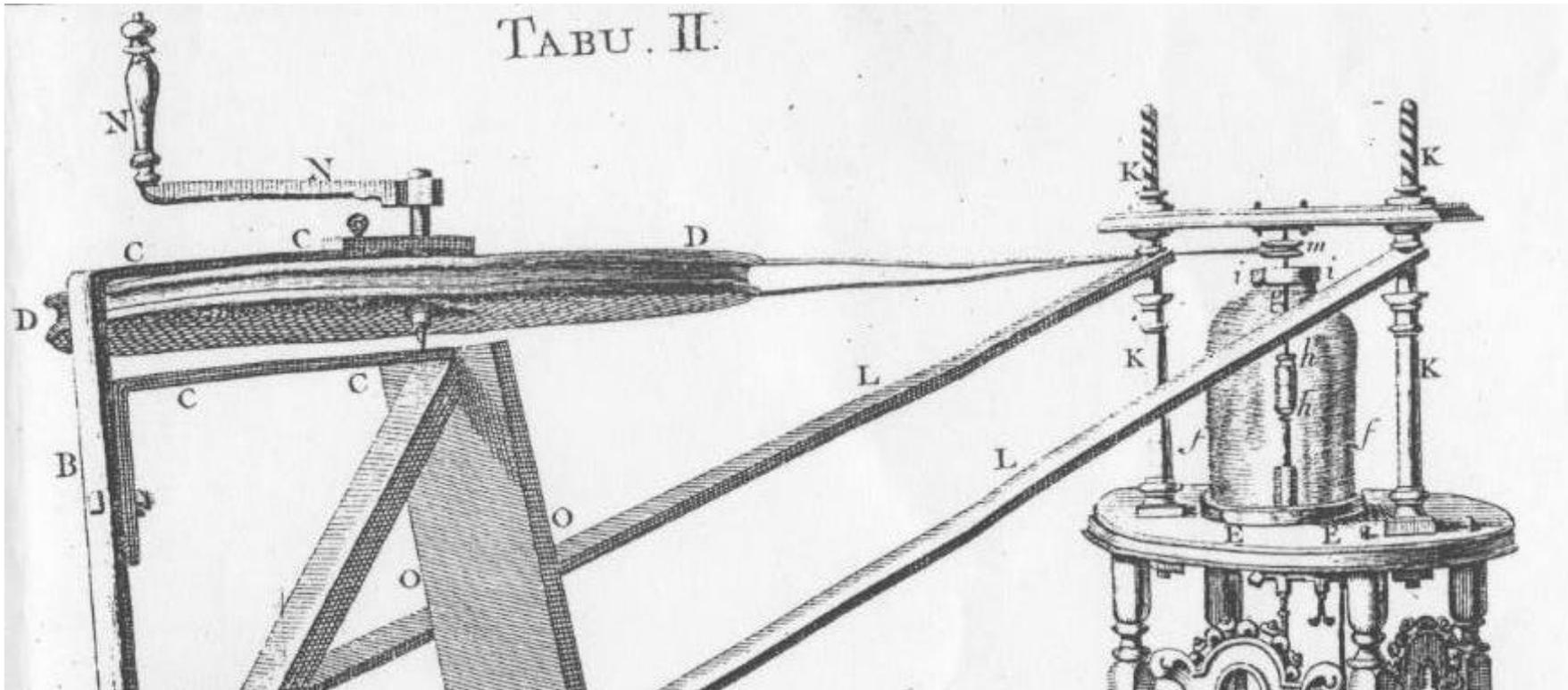
Bagliori nel vuoto

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



Bagliori nel vuoto

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.



Bagliori nel vuoto

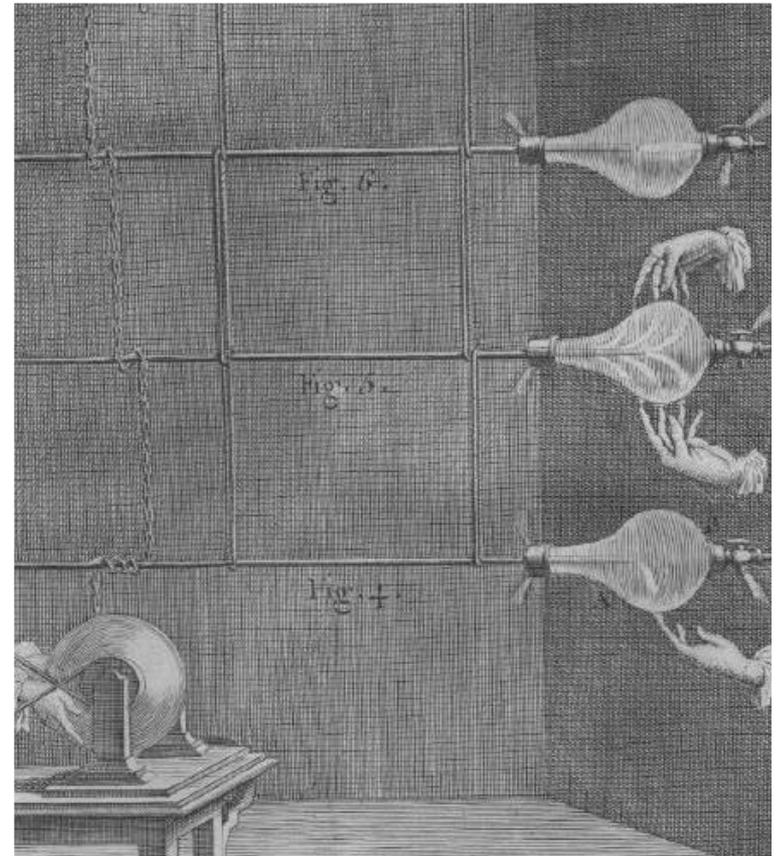
Da notare che:

- 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.

Bagliori nel vuoto

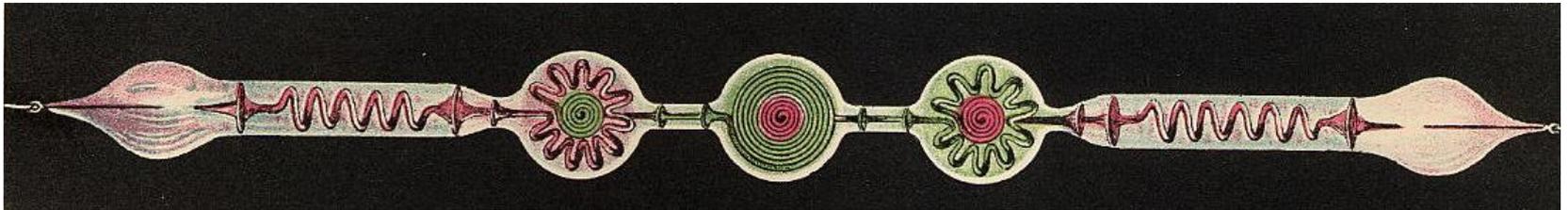
1745 Diversi esperimenti convincono la comunità scientifica che i “bagliori” sono di natura elettrica, ossia *scariche elettriche in aria rarefatta*.

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



Bagliori nel vuoto

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.

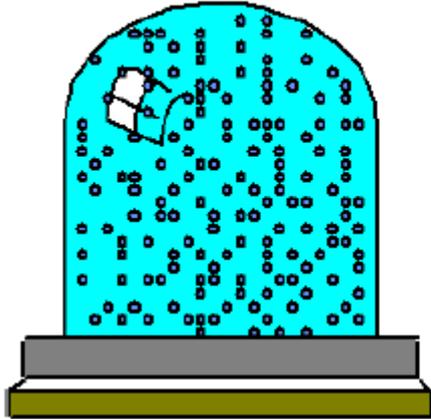
Bagliori nel vuoto

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

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

1879 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*.

Tipi di vuoto

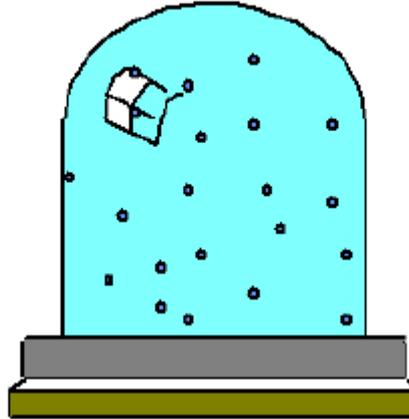


Basso vuoto

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

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

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

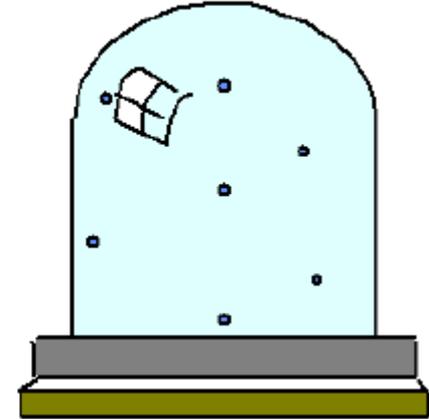


Alto vuoto

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

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

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



Ultra alto vuoto

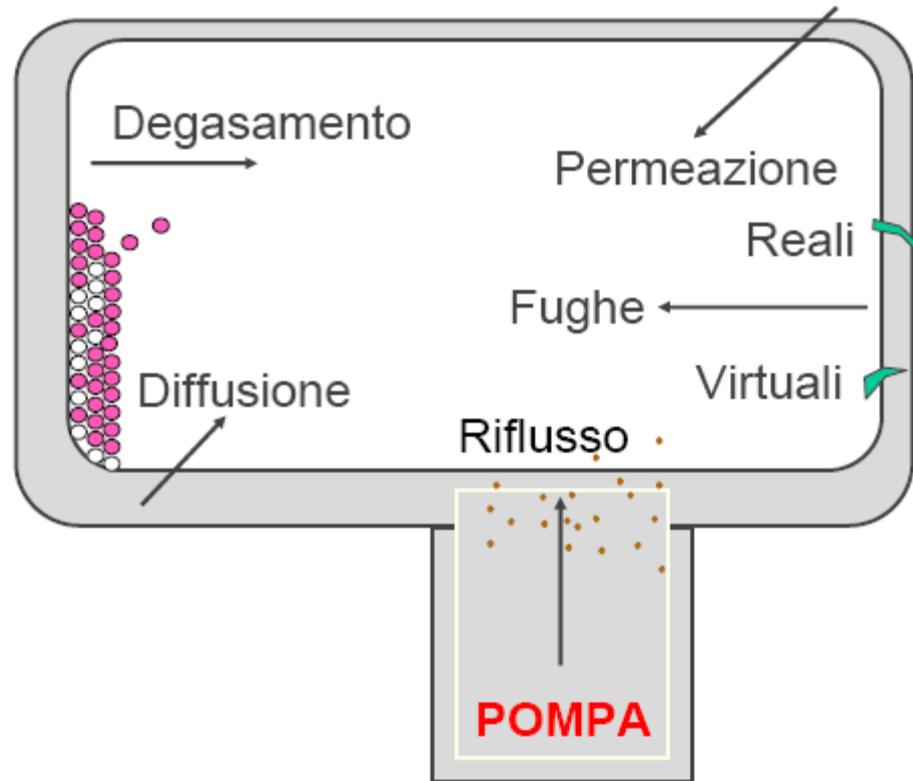
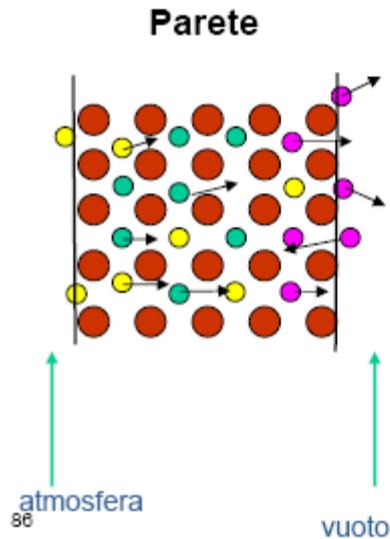
$1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-12}$ torr

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

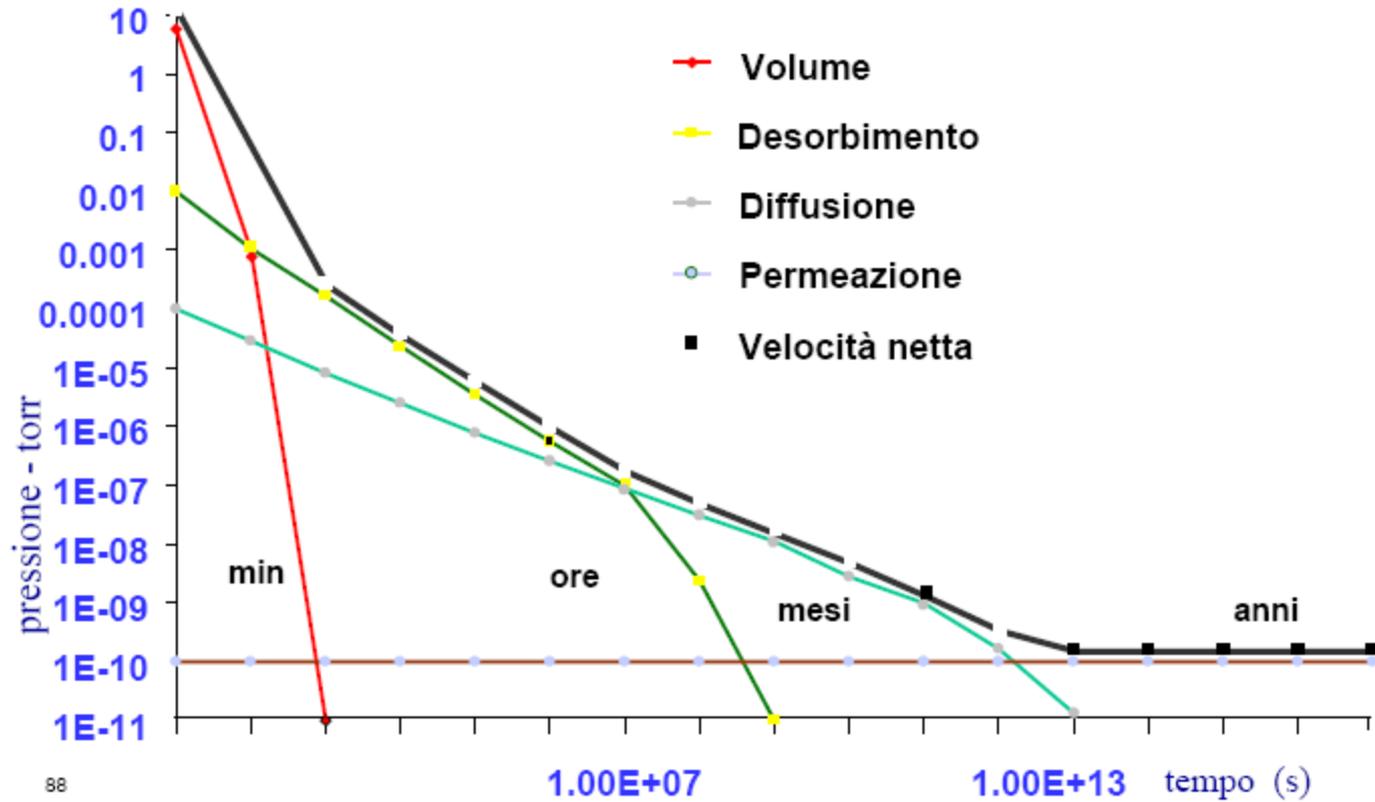
$1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-10}$ Pa

Mantenere il vuoto

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



Mantenere il vuoto



Conduzione elettrica nei gas

L'aria ed i gas sono generalmente **isolanti**, ma in alcuni casi possono diventare **conduttori**. Un gas, in condizioni normali, cioè in assenza di particolari agenti esterni, è costituito da molecole allo stato neutro e quindi non può condurre elettricità, comportandosi così da isolante perfetto.

Quando, però, particolari agenti esterni, investendo le molecole neutre dell'aria o di qualunque altro gas, strappano uno o più elettroni tra quelli più esterni, le molecole neutre, avendo perduto cariche negative, assumono una carica positiva trasformandosi in ioni positivi. Gli elettroni perduti possono anche essere catturati da molecole neutre che si trasformano così in ioni negativi.

Per la presenza dell'agente ionizzante 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.

- 1) **Ionizzazione per urto**: *Se le molecole nel loro movimento hanno sufficiente velocità e quindi sufficiente energia cinetica, possono urtare con altre perdendo o acquistando elettroni e formando altrettanti ioni positivi e negativi.*
- 2) **Ionizzazione termica**: *Una sorgente calda è costituita da molecole dotate di elevata mobilità. Tali molecole, urtandosi, perdono uno o più elettroni e diventano ioni positivi, mentre gli elettroni si fissano sulle altre molecole che diventano così ioni negativi. Un gas portato ad altissima temperatura risulta conduttore.*
- 3) **Ionizzazione per elettroni liberi**: *Se al gas arriva uno sciame di elettroni liberi, come raggi β , o gli elettroni liberati dall'incandescenza di una sorgente, e detti termoelettroni, essi nel loro cammino urtano le molecole. In alcuni casi espellono altri elettroni creando ioni positivi, in altri si fissano a molecole neutre formando ioni negativi.*
- 4) **Ionizzazione per radiazione elettromagnetica**: *I raggi ultravioletti, i raggi X e γ , arrivando al gas, sono capaci di 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.*

Curva caratteristica della scarica nel gas

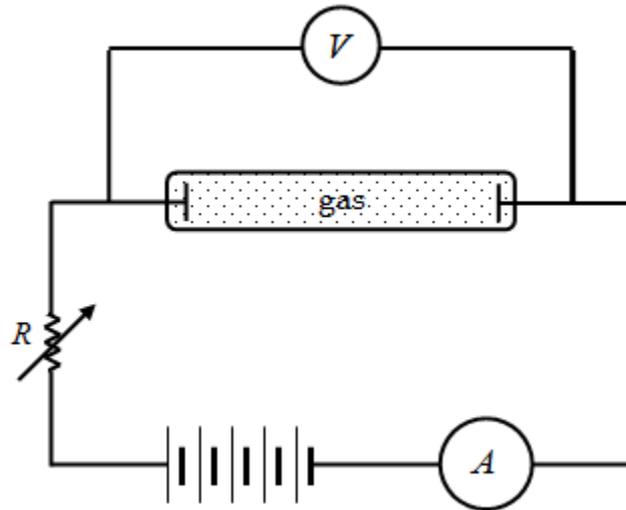
La produzione di ioni per urti determina una **corrente elettrica** tra i due elettrodi (**scarica**) rappresentabile come **funzione della differenza di potenziale ΔV** :

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

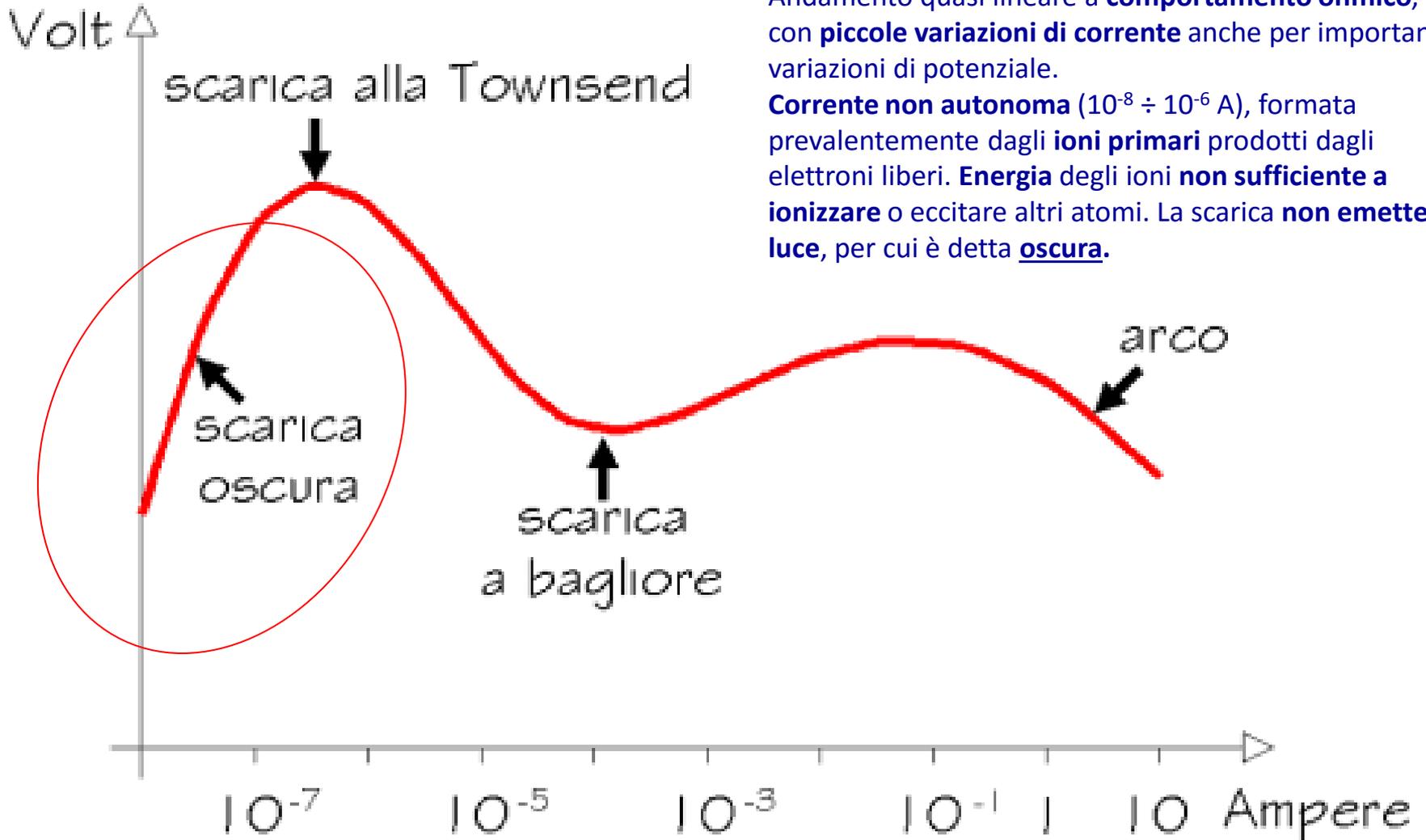
detta **caratteristica del tubo a scarica**.

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



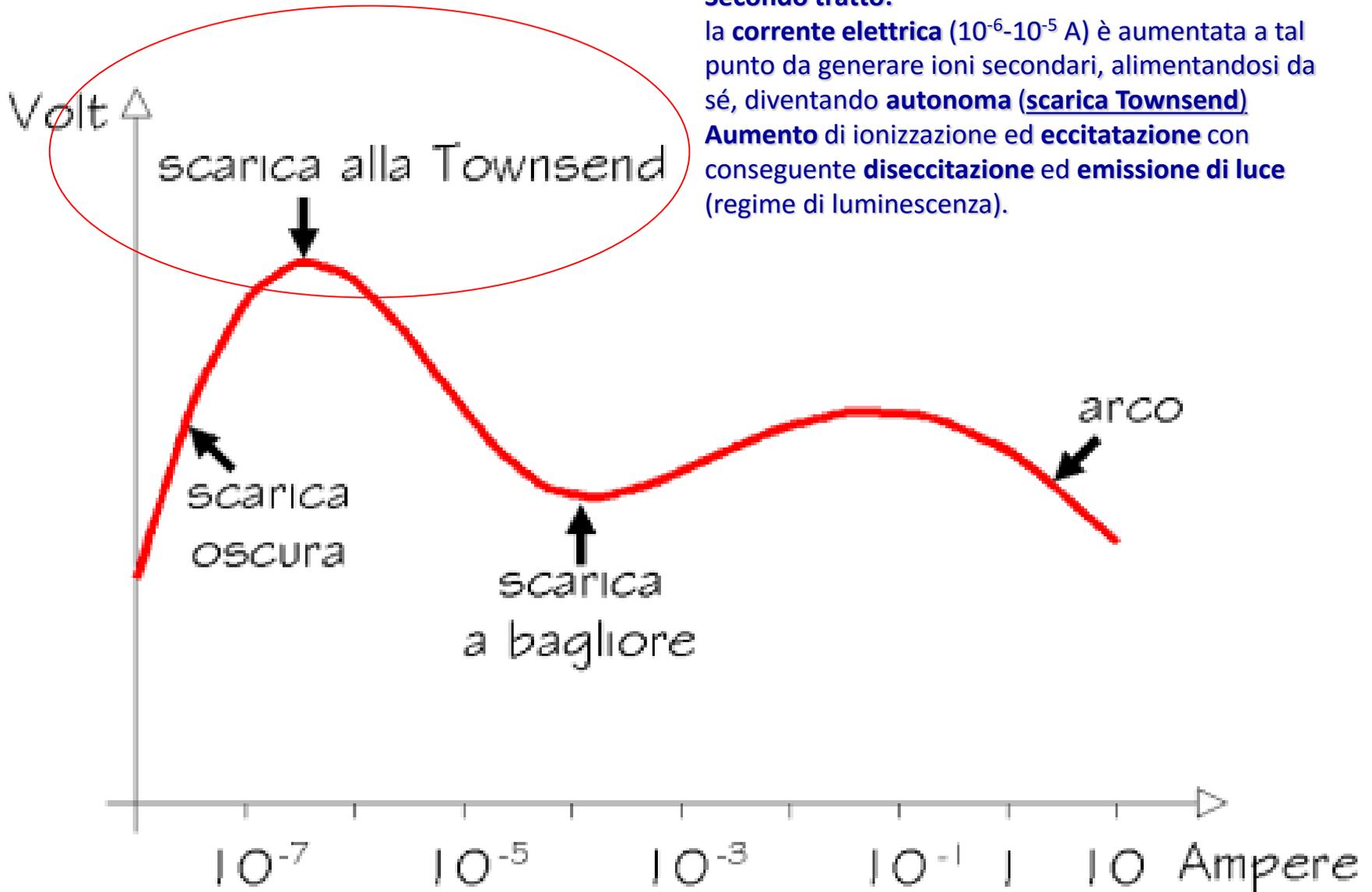
CURVA CARATTERISTICA DELLA SCARICA NEI GAS



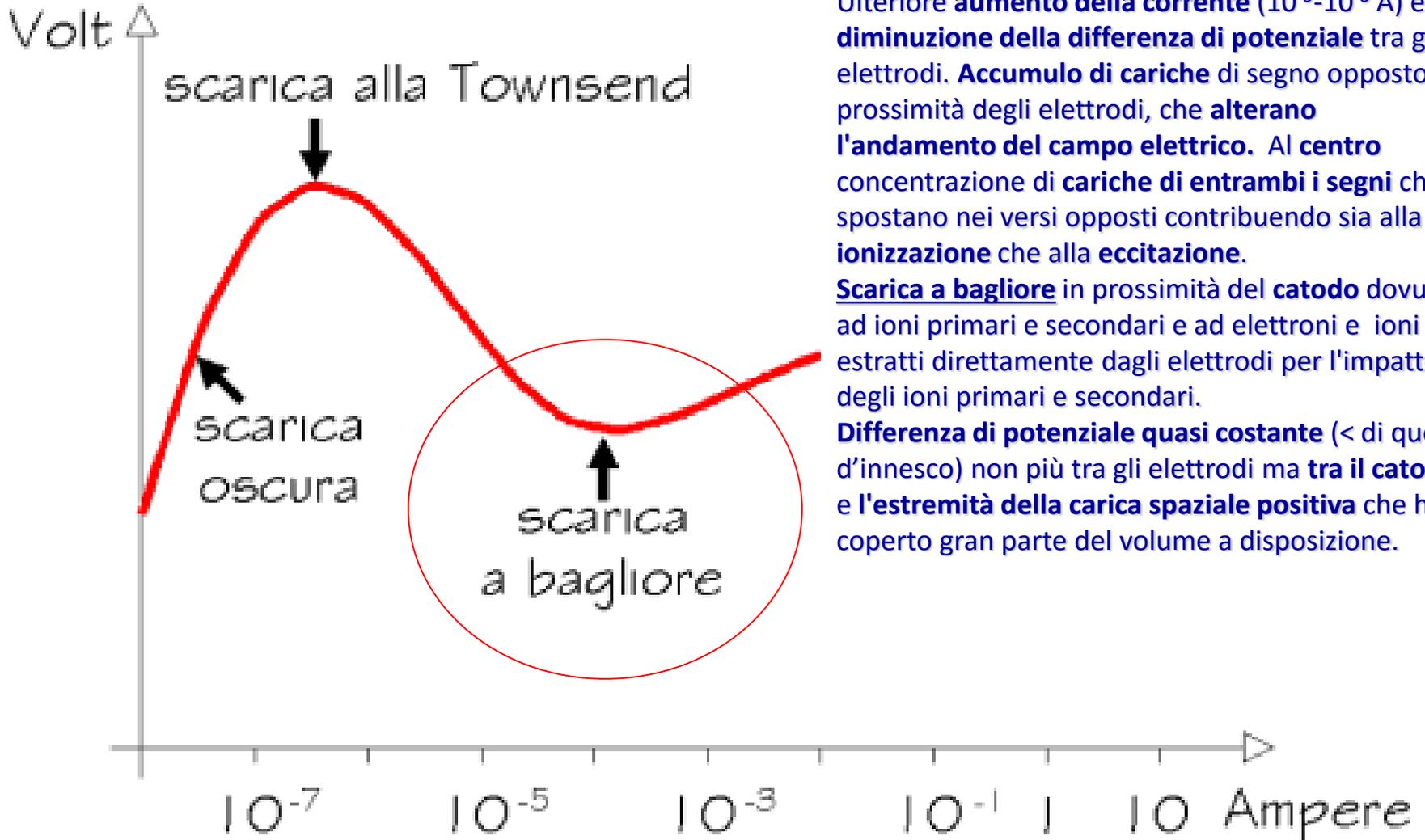
CURVA CARATTERISTICA DELLA SCARICA NEI GAS

Secondo tratto:

la **corrente elettrica** (10^{-6} - 10^{-5} A) è aumentata a tal punto da generare ioni secondari, alimentandosi da sé, diventando **autonoma** (scarica Townsend)
Aumento di ionizzazione ed **eccitazione** con conseguente **diseccitazione** ed **emissione di luce** (regime di luminescenza).



CURVA CARATTERISTICA DELLA SCARICA NEI GAS



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

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'innescò) 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.

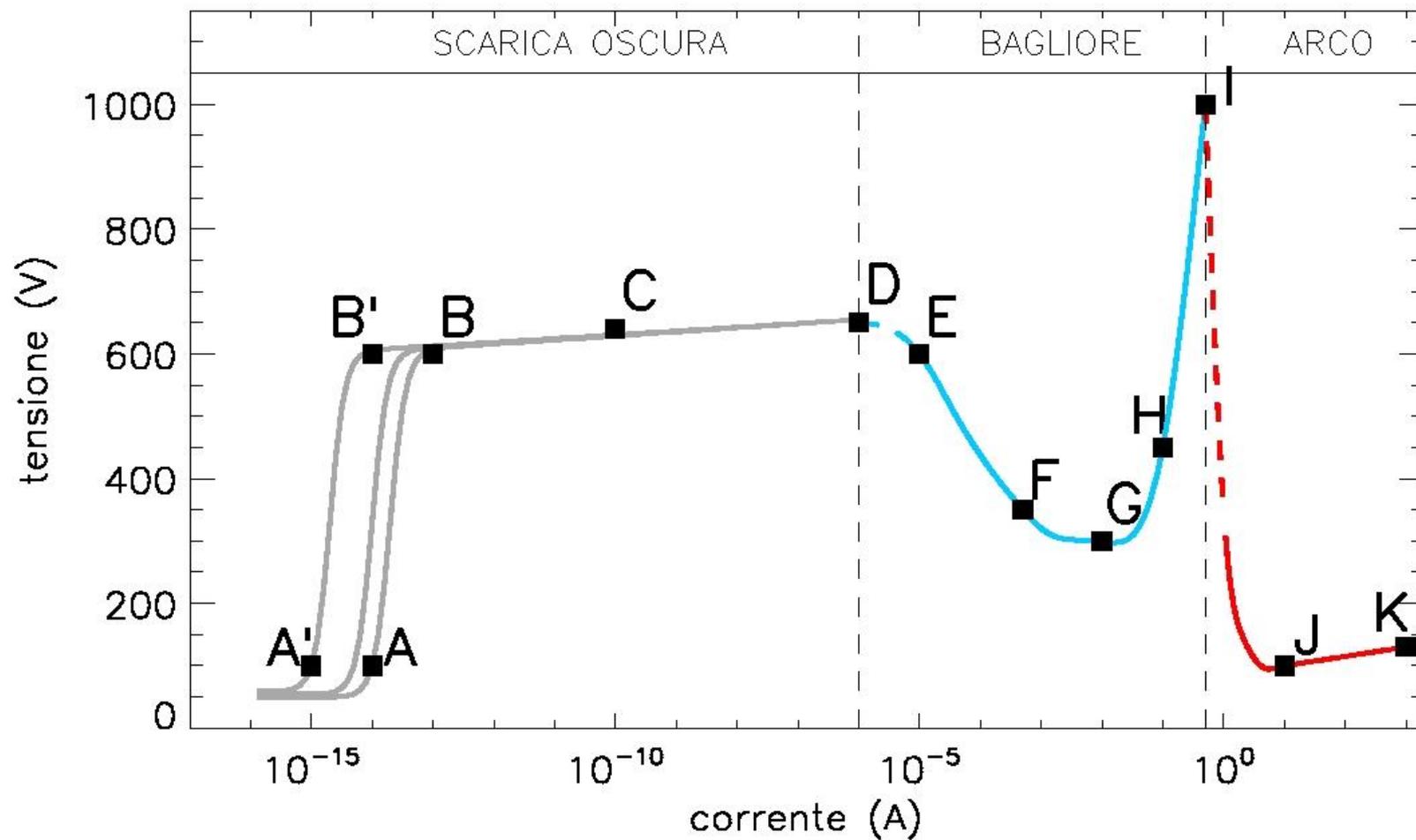
CURVA CARATTERISTICA DELLA SCARICA NEI GAS

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 °C per l'impatto con gli ioni positivi: **Diminuzione della tensione.**



Curva caratteristica in tubi di Crookes



- **La corrente di saturazione è direttamente proporzionale alla distanza d tra gli elettrodi.**

Il campo elettrico stesso diventa allora un agente ionizzante, in quanto gli ioni da esso accelerati producono con l'urto la ionizzazione di molecole neutre, creando altri ioni che a loro volta producono altre ionizzazioni. Si origina in tal modo un processo di produzione a *valanga* di ioni che provoca un notevole aumento di corrente.

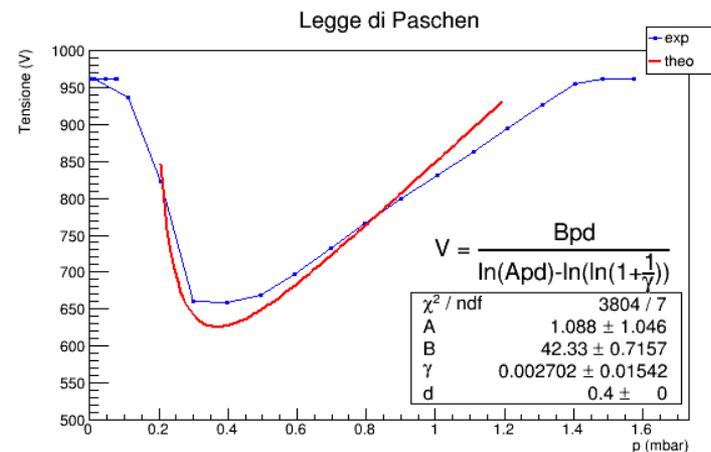
- **La tensione d'innesco V , è direttamente proporzionale alla pressione P del gas.**

Infatti col diminuire della pressione aumenta il percorso compiuto in media da una molecola tra un urto ed il successivo e quindi aumenta l'energia cinetica acquistata dagli ioni sotto l'azione di un determinato campo elettrico. Ne segue che, se la pressione diminuisce, è sufficiente un campo elettrico di minore intensità per accelerare gli ioni fino a portarli ad energie superiori a quelli di ionizzazione.

- **A parità di pressione si ha che la tensione d'innesco V è direttamente proporzionale alla distanza d tra gli elettrodi.**

Infatti, a parità di pressione, il valore di E non subisce alcuna variazione e dunque V è proporzionale a d .

Legge di Paschen



La scarica elettrica attraverso l'aria o un gas qualsiasi produce in determinate condizioni anche fenomeni luminosi. Ne sono un esempio tutti i **tubi di scarica** adoperati nelle insegne luminose.

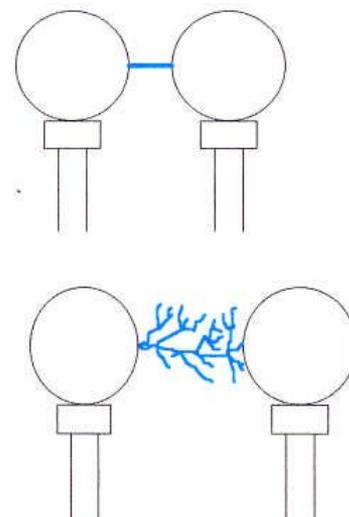
Osserviamo che gli ioni accelerati dal campo elettrico, nell'urto contro molecole neutre, possono produrre non solo la ionizzazione, ma anche la loro eccitazione.

In genere il passaggio della corrente elettrica in un tubo di scarica non produce fenomeni luminosi finché la tensione è inferiore al valore d'innesco V_i .

Quando la tensione supera il valore d'innesco V_i , si ha emissione di luce e la scarica elettrica prende il nome di **scarica a scintilla** o semplicemente scintilla e si manifesta come un tratto molto luminoso di colore biancoazzurrognolo che unisce i due elettrodi.

Si tratta di una corrente molto intensa e di brevissima durata, accompagnata da un rumore caratteristico.

Se gli elettrodi sono sufficientemente vicini, la scintilla ha una forma quasi rettilinea, mentre per distanze maggiori diventa a zig-zag per poi ramificarsi per distanze maggiori.

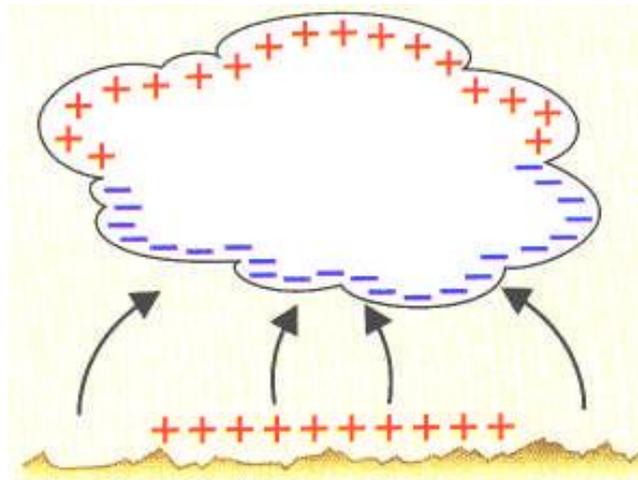


Se uno degli elettrodi ha la forma di una punta, la scarica elettrica diventa persistente e prende il nome di *effluvio*. Il campo elettrico molto intenso in prossimità della punta agevola la ionizzazione per urto producendo la scarica.

Un particolare tipo di scintilla è la scarica che avviene tra due nubi temporalesche oppure tra una nube temporalesca e la Terra. Essa prende il nome di *lampo* nel primo caso e di *fulmine* nel secondo caso.

Durante l'attività temporalesca le nuvole si caricano negativamente nella parte inferiore più vicina alla Terra; la carica negativa della nuvola è così intensa che la superficie della Terra posta di fronte ad essa si carica positivamente per induzione. Tra la nuvola e la Terra si produce una d.d.p di alcune centinaia di milioni di volt, sufficiente perchè avvenga la scarica a scintilla, cioè il fulmine.

Durante il processo di scarica, inoltre, si produce un riscaldamento così intenso che l'aria, espandendosi, produce un'onda sonora. Il meccanismo di produzione dei lampi è lo stesso, con l'unica differenza che ora la scarica avviene tra due nubitemporalesche.



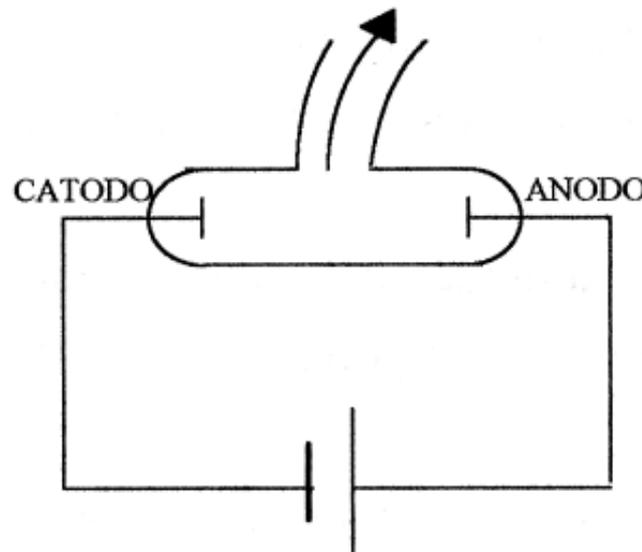
Si consideri un tubo con 2 elettrodi collegato ad una pompa pneumatica che permette di ridurre progressivamente la pressione del gas in esso contenuto.

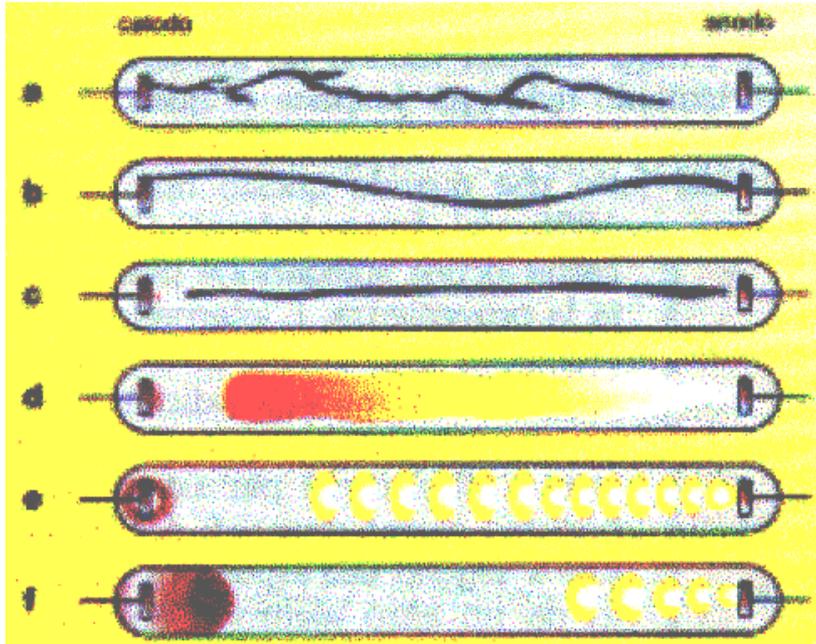
L'elettrodo collegato al polo positivo prende il nome di *anodo*, mentre quello collegato al polo negativo prende il nome di *catodo*.

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 frenati. 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 ormai diventata 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.

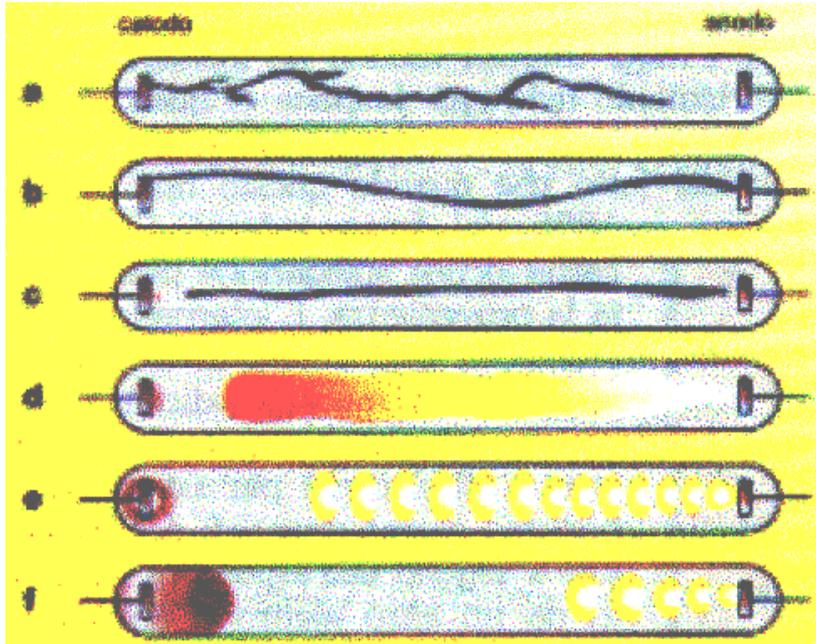




L'aspetto della scarica nel gas rarefatto varia con la pressione del gas.

- A pressione uguale a quella esterna (76 cm di mercurio) la scarica assume carattere esplosivo ed un andamento ramificato;
- Se la pressione è compresa tra 30 ed 1 cm di mercurio, la scarica diventa meno rumorosa e la scintilla si riduce ad un nastro luminoso;
- Se la pressione è compresa tra 1 cm e 2 mm di mercurio, la scarica diventa silenziosa, di colore rosa intenso e si diffonde in tutto il tubo, denotando uno spazio oscuro verso il catodo che risulta circondato da una luminosità violacea detta luce negativa. La luce è meglio diffusa e si fa più intensa quando la pressione raggiunge i 2 mm di mercurio;
- Tra 2 mm di mercurio e 0,1 mm di mercurio di pressione, compaiono nella luce delle stratificazioni, mentre lo spazio oscuro si sposta verso l'anodo e la luce negativa si stacca dal catodo individuando un secondo spazio oscuro e compare una nuova leggera luminosità sul catodo detta guaina catodica. In queste condizioni la conducibilità del gas aumenta sempre e risulta massima alla pressione di qualche decimo di mm di mercurio.

A questo punto ogni ulteriore rarefazione invece di portare una diminuzione di resistenza ne porta un aumento, perché ormai il gas è così rarefatto che l'urto di uno ione con una molecola diventa poco probabile e quindi il numero di ioni non aumenta sensibilmente.



Questi fenomeni ed aspetti della scarica sono comuni a tutti i gas, con la sola differenza che la colorazione varia con la loro natura. La luce del neon è, ad esempio, di colore rosso arancio.

- Quando la pressione scende al di sotto di 0,1 mm di mercurio, la luminosità diffusa va scomparendo definitivamente, mentre compare una fluorescenza di color verde-giallo del vetro che in pari tempo si riscalda notevolmente.

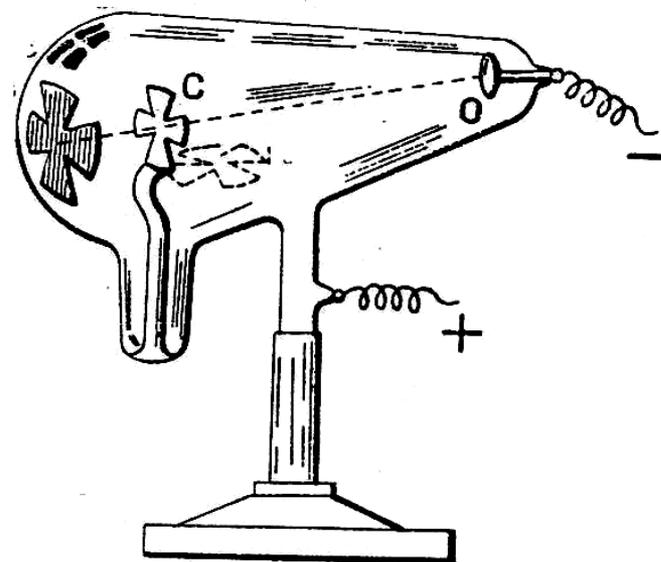
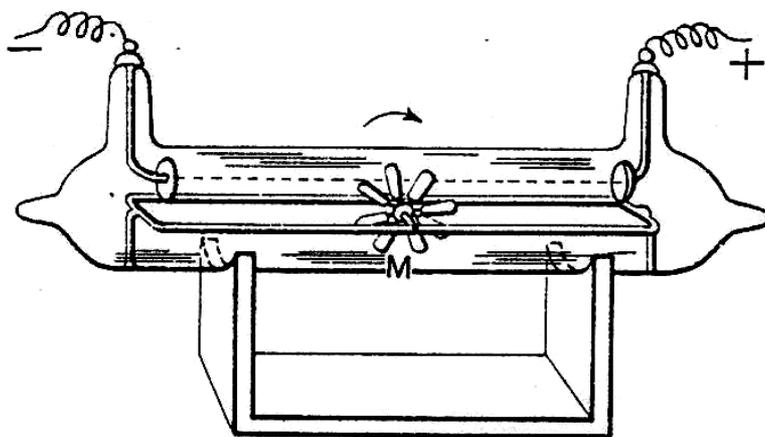
Per quanto non sia possibile raggiungere il vuoto assoluto, la tecnica moderna è giunta a gradi di vuoto molto spinto. In fisica prende il nome di tubo a vuoto spinto un'ampolla o tubo in cui la pressione del gas sia inferiore a 0,01 mm di mercurio.

- Per valori di pressione prossimi a 0,01 mm di mercurio, ogni luminosità interna è scomparsa: la mancanza di ioni ha aumentato la resistenza del tubo e si dice che il tubo diventa duro. A queste pressioni e a quelle inferiori, la corrente si ottiene solo applicando tra gli elettrodi d.d.p. molto elevate (oltre i 30.000 V), mentre compaiono tre specie di raggi chiamati rispettivamente : *raggi catodici, anodici e raggi X.*

I RAGGI CATODICI

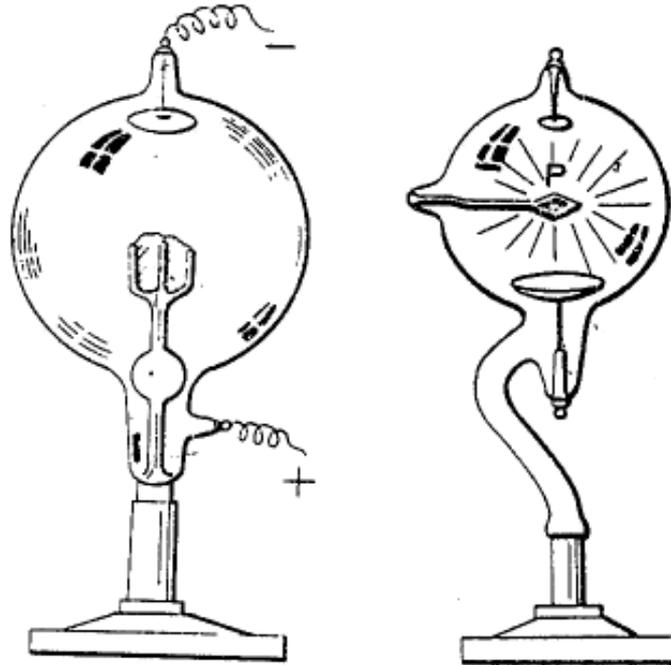
Dal catodo del tubo partono dei raggi, detti raggi catodici. Le principali proprietà di questi raggi sono:

I raggi catodici partono dal catodo ed hanno effetto meccanico.



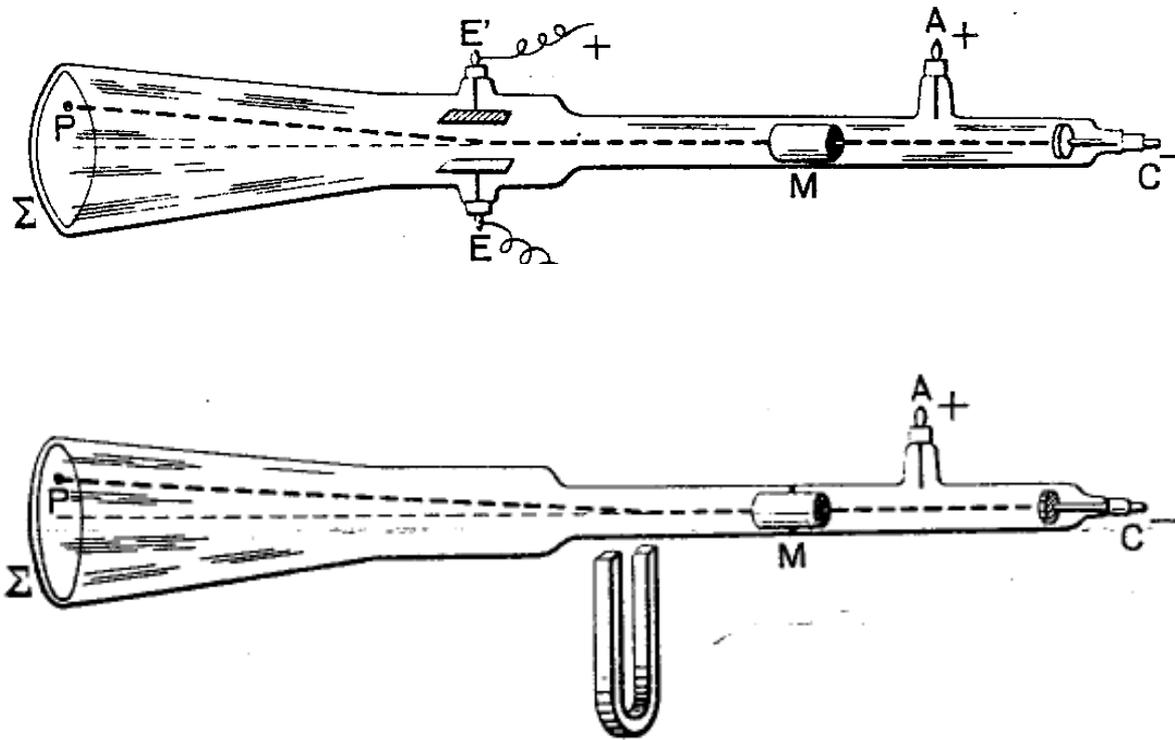
I raggi catodici si propagano in linea retta e sono arrestati da ostacoli.

I raggi catodici producono in determinate sostanze emissione di luce, detta fluorescenza se cessa al cessare della causa eccitante, fosforescenza se permane ancora per qualche tempo.



I raggi catodici hanno effetto termico

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



Le precedenti esperienze trovano una spiegazione se si ammette l'esistenza di corpuscoli proiettati dal catodo che si comportano in modo simile a proiettili lanciati che portano una carica negativa. Sviluppando questa ipotesi, si è giunti alla conclusione che i raggi catodici consistono in un fascio di corpuscoli uguali con carica negativa, detti **elettroni**.

I RAGGI ANODICI O RAGGI CANALE

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.

A è l'anodo, C è il catodo sul quale sono praticati dei piccoli fori. Quando il tubo è in funzione, dietro al catodo compaiono dei pennelli luminosi in corrispondenza dei fori. Questi pennelli,

però, vanno rapidamente sfumando e in apparenza sembrano provenire dal catodo, ma un ostacolo posto in P, davanti al catodo, li intercetta, il che prova che i raggi sono emessi dall'anodo.

Per determinare la natura di questi raggi furono ripetute esperienze analoghe a quelle eseguite per i raggi catodici. Dal calcolo risultò che essi sono dovuti a corpuscoli con carica positiva uguale o multipla dell'elettrone e vennero identificati come ioni positivi del poco gas ancora presente nel tubo dopo la rarefazione, cioè:

i raggi anodici sono corpuscoli positivi proiettati dall'anodo e formati da molecole di gas prive di uno o più elettroni.

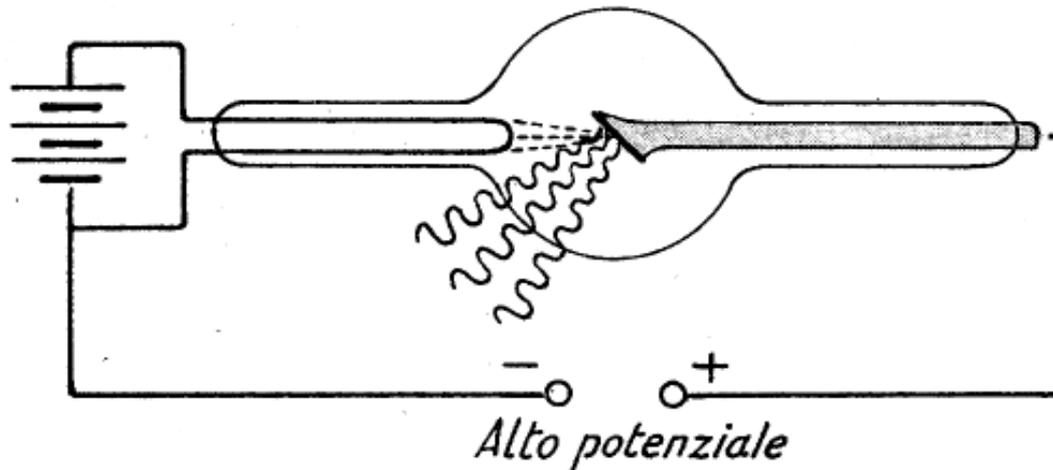


RAGGI X O RAGGI RÖNTGEN

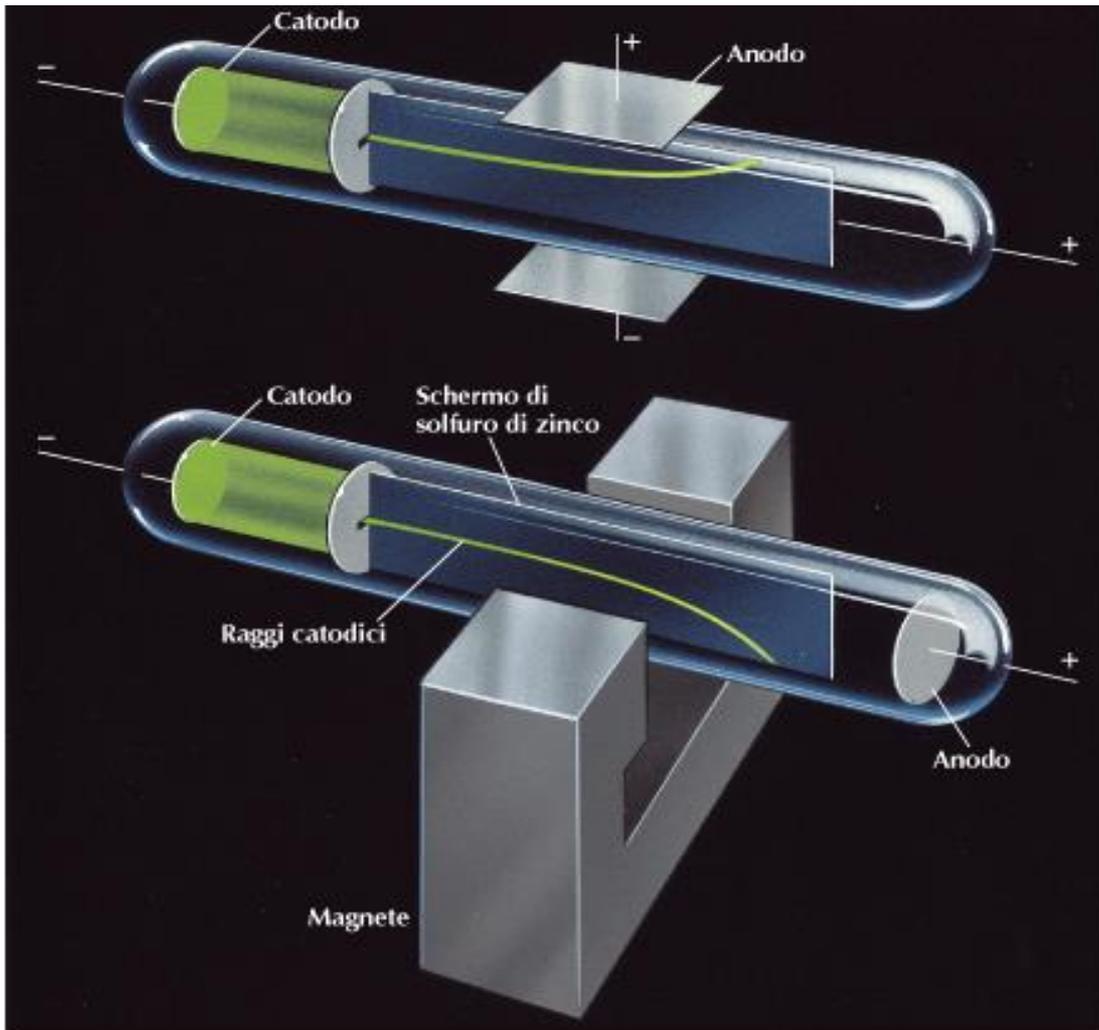
Gli elettroni che formano i raggi catodici, urtando un ostacolo, generano nello spazio delle radiazioni elettromagnetiche.

Si consideri il dispositivo in figura: in un tubo di vetro ad altissimo vuoto un fascio di raggi catodici, emessi per effetto termoelettronico, parte dal catodo concavo e va ad urtare contro una piastrina metallica di tungsteno (anticatodo) collegata con l'anodo: tra i due elettrodi deve essere mantenuta una elevata d.d.p. dell'ordine di qualche decina di migliaia di volt, onde fornire agli elettroni una grande energia cinetica. All'urto degli elettroni su P, si constata che 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: tale nome rimase, anche se ora si sa che essi sono simili alla luce, ma di lunghezza assai inferiore, compresa tra 10^{-2} Å e 10 Å.



Esperimento di Thomson

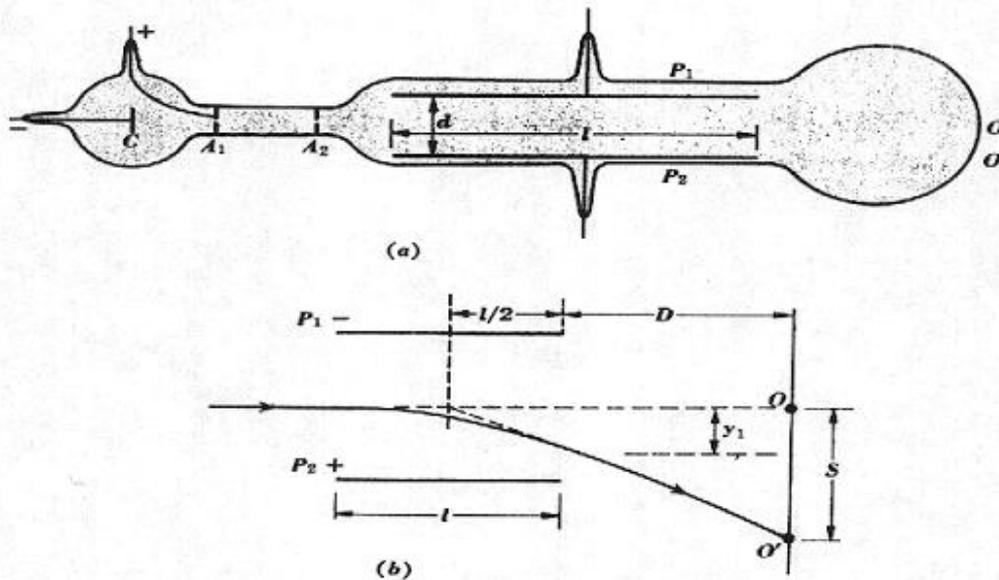


La deviazione di un raggio catodico da parte di un campo elettrico.

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

Esperimento di Thomson

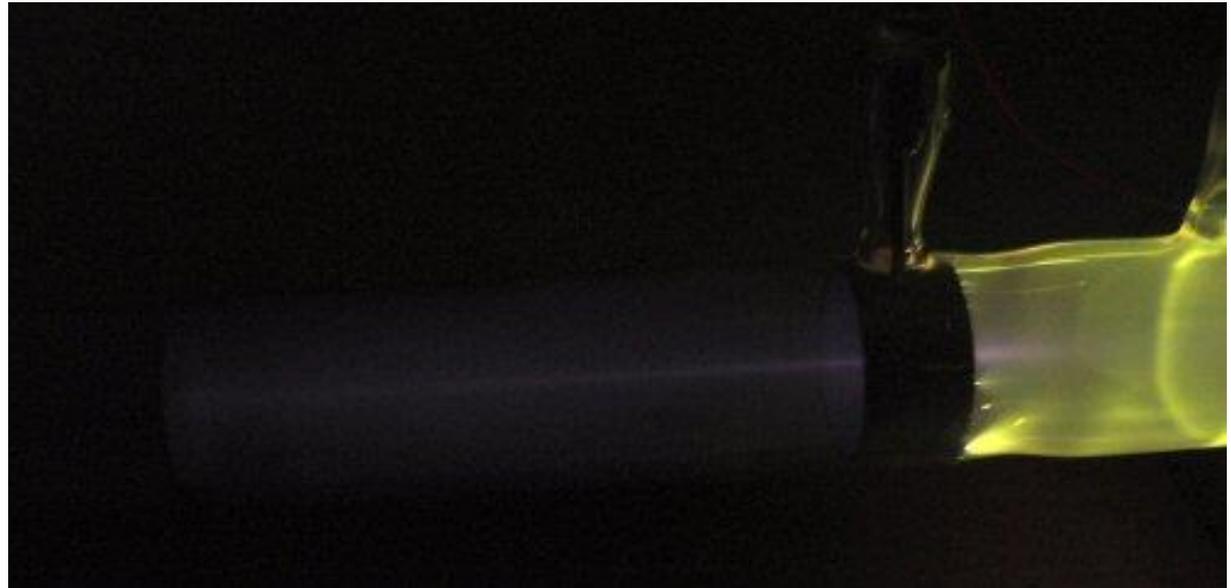
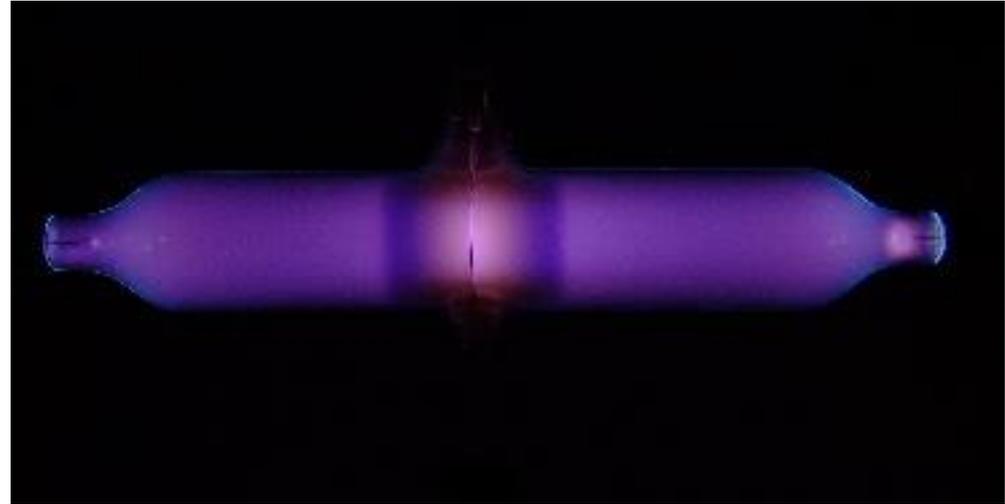
Thomson nel 1897, tramite un tubo catodico, in cui le particelle cariche (elettroni) possono essere accelerate, si propose di misurare il rapporto tra la carica (e) e la sua massa (m), cioè: e/m



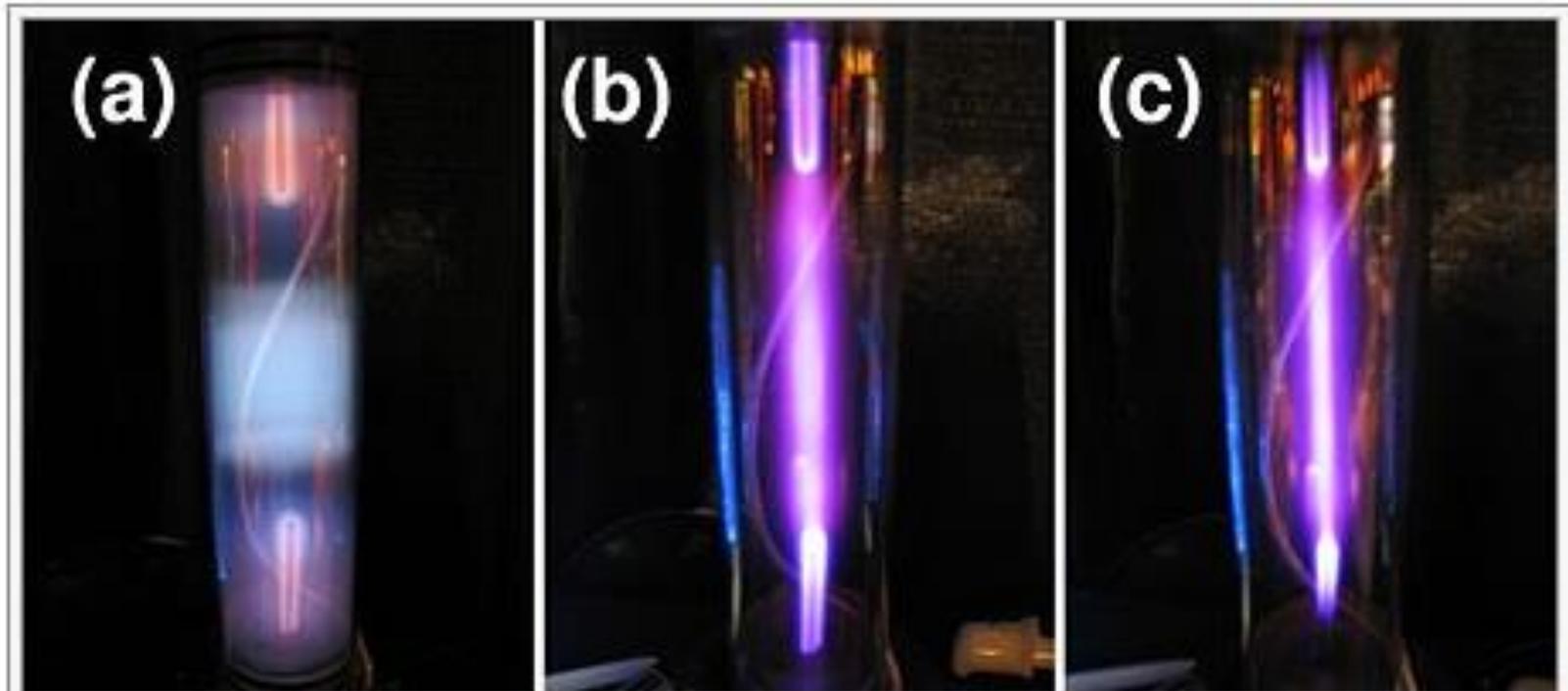
$$\frac{e}{m} = 1.76 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

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

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)

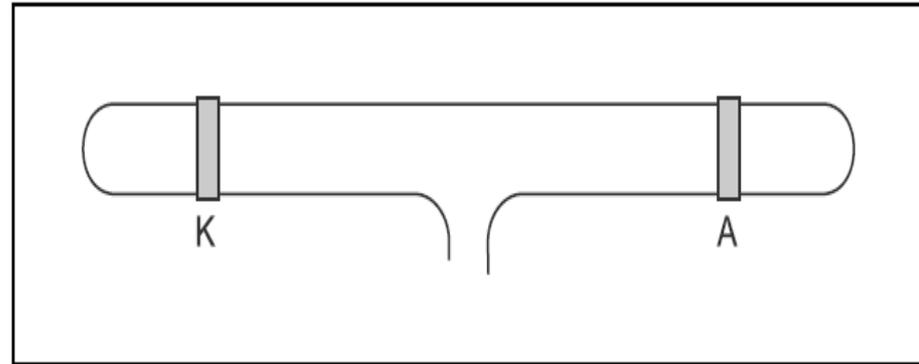


Fig. 3b $p = 40$ mbar: small luminous cone in front of the cathode
(blue-red streamer from the cathode to the anode,
 $U = 2.6$ kV)

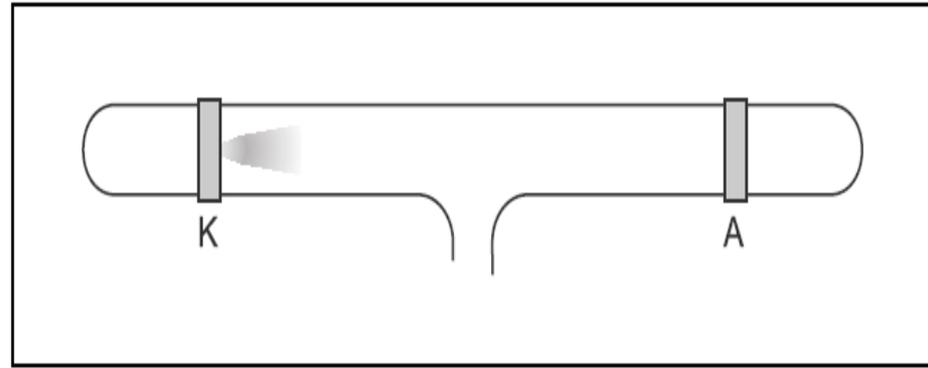


Fig. 3c $p = 7$ mbar: the streamer becomes thicker (positive column), small luminous spot at the cathode, small dark space in front of the cathode ($U = 1.1$ kV)

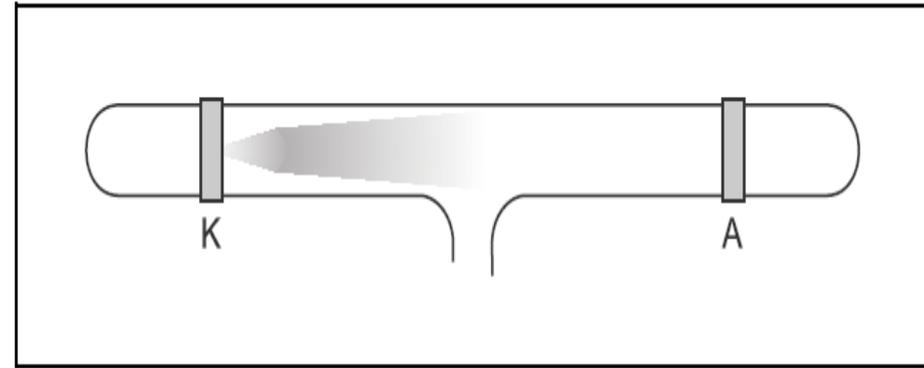


Fig. 3d $p = 0.8$ mbar: the whole cathode is covered with a luminous layer; dark space between cathode and the positive column widens ($U = 0.8$ kV)

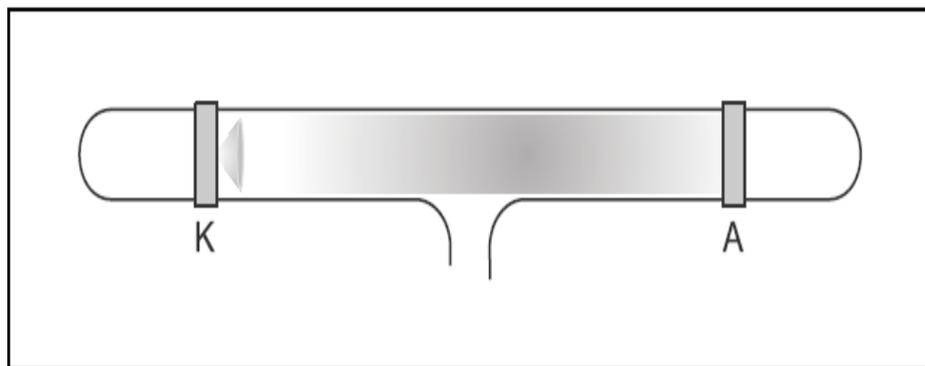


Fig. 3e $p = 0.35$ mbar: positive column loses colour, and bright and dark zones emerge ($U = 0.6$ kV)

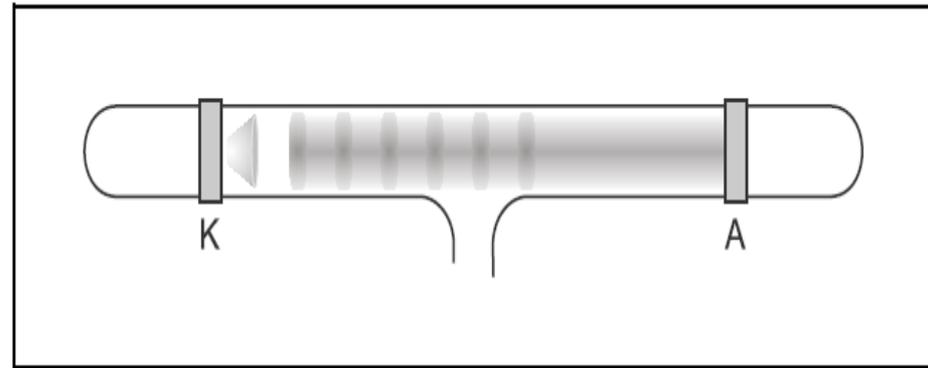


Fig. 3f $p = 0.2$ mbar: diffuse light at the cathode, large dark space, positive column: distance between layers increases ($U = 0.7$ kV)

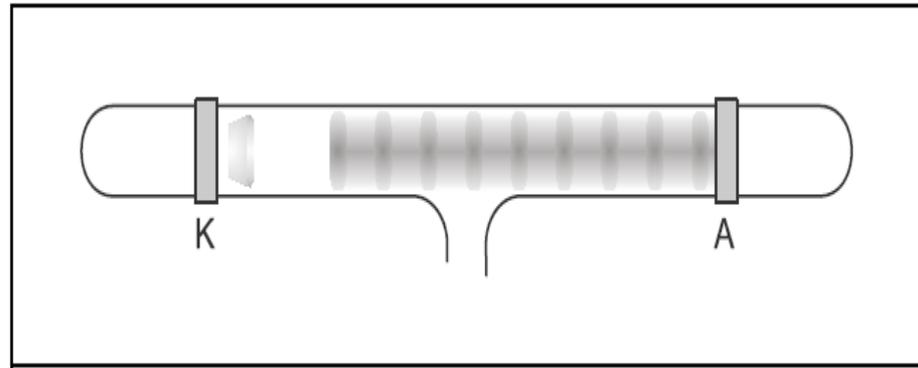


Fig. 3g $p = 0.1$ mbar: dark space widens; layers in the positive column become mushroom shaped ($U = 0.8$ kV)

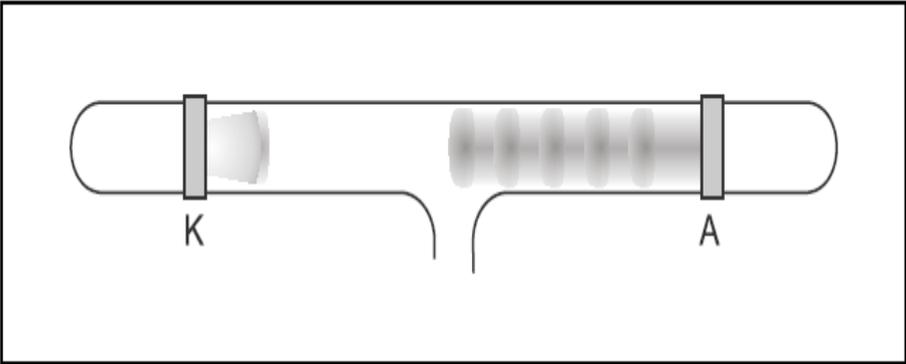


Fig. 3h $p = 0.06$ mbar: glow light in front of the cathode expands, and the positive column disappears ($U = 1.8$ kV)

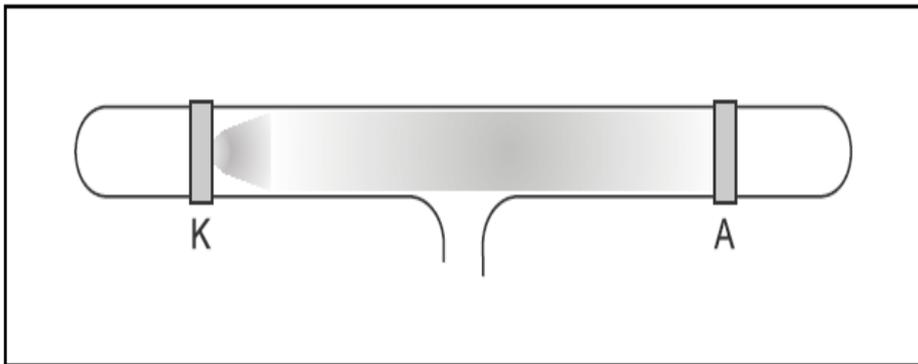
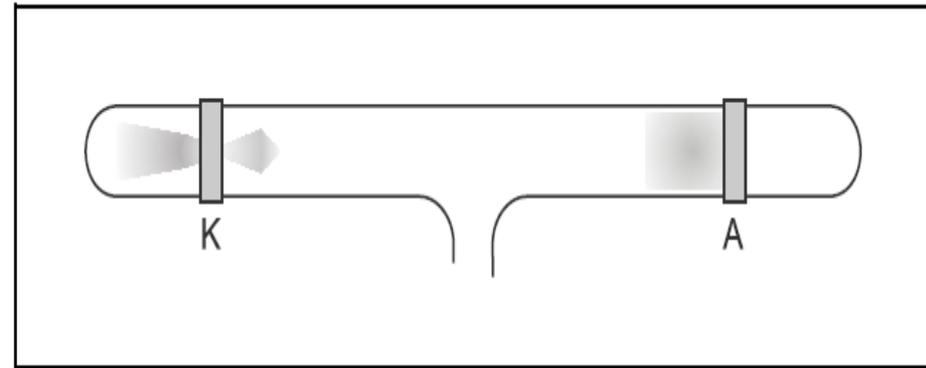


Fig. 3i $p = 0.035$ mbar: glow light in front of the cathode disappears; in front of the anode fluorescence arises, and behind the cathode there is a luminous effect ($U = 5.0$ kV)



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>

Grazie per l' attenzione!

Contatto

www.pv.infn.it/~fontana

andrea.fontana@pv.infn.it