

Ionizzazione nei gas

con dimostrazione sperimentale

Andrea Fontana
Alessia Embriaco

INFN Sezione di Pavia
Dipartimento di Fisica
Università di Pavia



Stage 2017 (Martedì, 13 Giugno 2017)

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

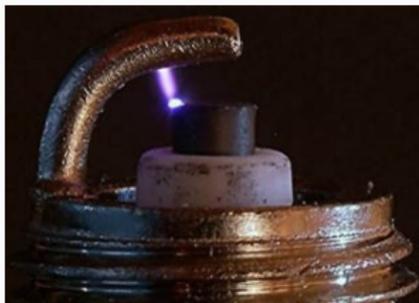
- **II parte** (sperimentale)
 - Tubo a scarica: **fenomenologia**
 - Tubo a scarica: **esperienza**

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.

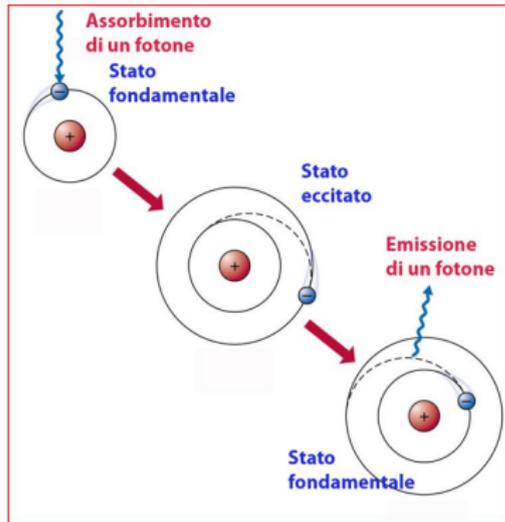
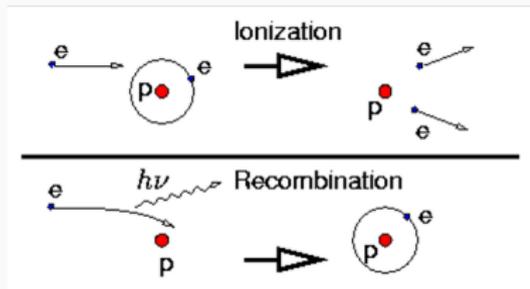
Un gas, in condizioni normali, è costituito da molecole allo **stato neutro** e quindi non può condurre elettricità, comportandosi così da isolante perfetto.

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

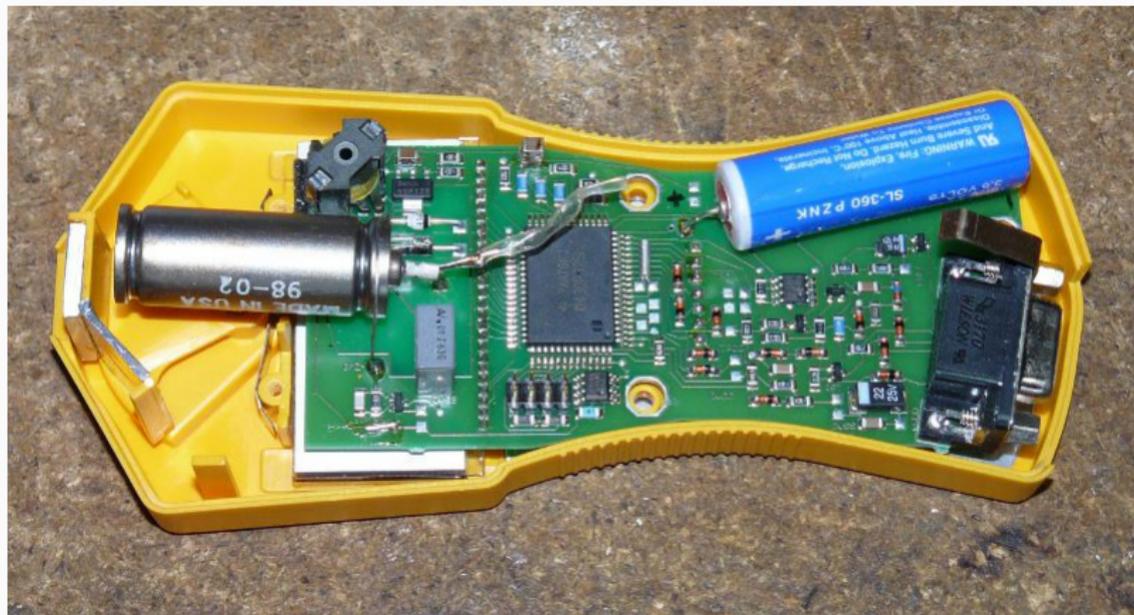


Come funziona un contatore Geiger?

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



Come funziona un contatore Geiger?



Principi base sui rivelatori di radiazione

Due processi fisici importanti:

- **raccolta di carica elettrica**: rivelatori a **ionizzazione**
 - rivelatori a gas: contatore Geiger, camere a deriva, RPC, TPC
 - rivelatori a stato solido basati su semiconduttore: silici, germani
- **emissione luminosa**: rivelatori a **scintillazione** o **Cerenkov**
 - scintillatori: cristalli NaI, CsI, liquidi Ar criogenico
 - Cerenkov: acqua, acqua pesante

Questi processi, in un vero rivelatore, non sono visibili e i fisici li sfruttano per rivelare radiazioni e particelle.

Vantaggi del tubo a scarica in aria: grazie alla **trasparenza** dell'aria e del vetro possiamo:

- osservare che cosa succede all'interno
- vedere i processi di ionizzazione e di emissione luminosa associati ad una corrente di elettroni.

Curva caratteristica della scarica nel gas

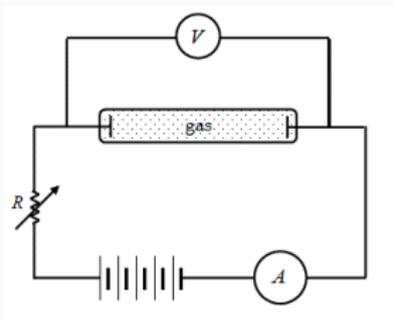
La produzione di ioni per urti determina una **corrente elettrica** tra i due elettrodi (scarica) rappresentabile come funzione della **differenza di potenziale ΔV** :

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

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.



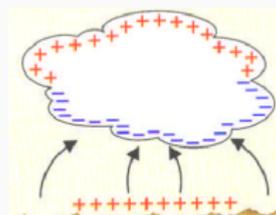
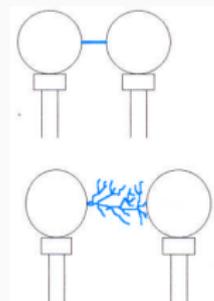
Agenti ionizzanti

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.

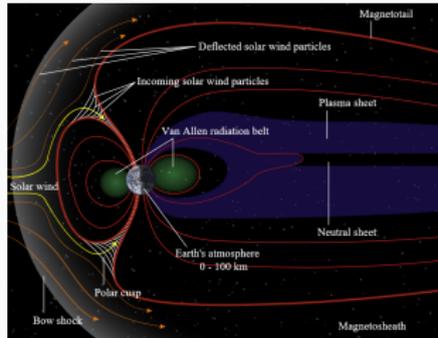
Esempi

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.

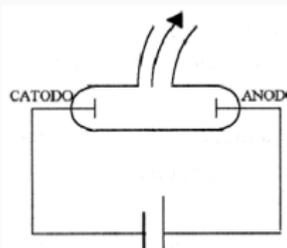


Ma anche... aurora boreale



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.

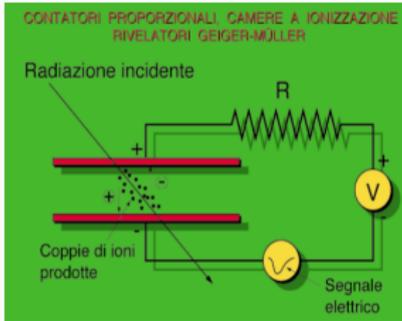
Diminuendo la pressione del gas, il numero di molecole presenti nel tubo va gradatamente diminuendo, cosicché gli ioni accelerati dalla tensione possono compiere un tragitto più lungo prima di incontrare altre molecole.

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...

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

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, nota come **velocità di deriva**, dipende dal campo elettrico E e dalla pressione P del gas:

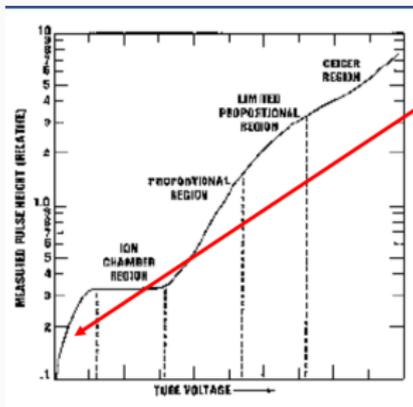
$$v = \mu \frac{E}{P}$$

Il coefficiente di proporzionalità μ prende il nome di **mobilità ionica**. È 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:



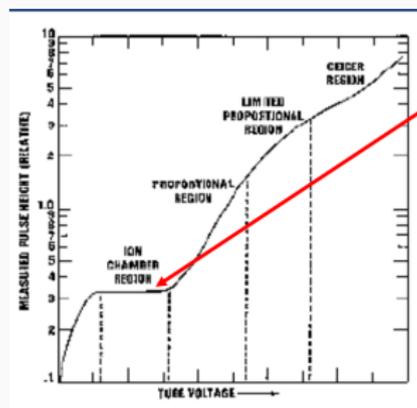
Zona di ricombinazione: $Q < N \cdot e$. Il campo elettrico applicato non è sufficiente a separare tutti gli ioni prodotti dalla radiazione, che quindi in parte si ricombinano. **Si possono avere informazioni sull'istante in cui è passata una particella ma non informazioni dosimetriche.**

- 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:



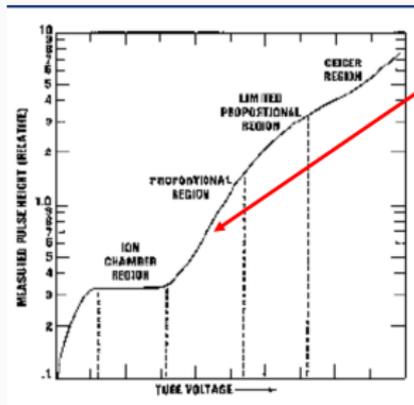
Regione di saturazione: $Q=N \cdot e$. E' l'intervallo di tensione in cui opera la camera a ionizzazione. Tutte e sole le cariche liberate dal passaggio della radiazione vengono raccolte agli elettrodi e contribuiscono al segnale elettrico. **Il segnale prodotto è quindi proporzionale all'energia rilasciata 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.

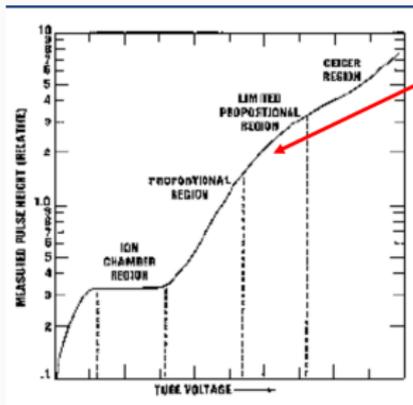
Il segnale prodotto è quindi ancora proporzionale all'energia rilasciata nella camera: informazioni dosimetriche.

- 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.

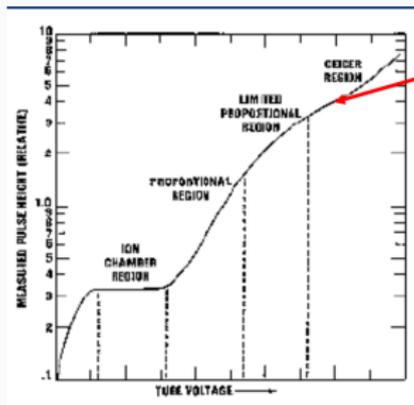
Si può ancora contare le particelle e determinare l'istante dell'interazione ma si perde l'informazione sull'energia rilasciata e quindi sulla dose.

- 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 liberata. **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:

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

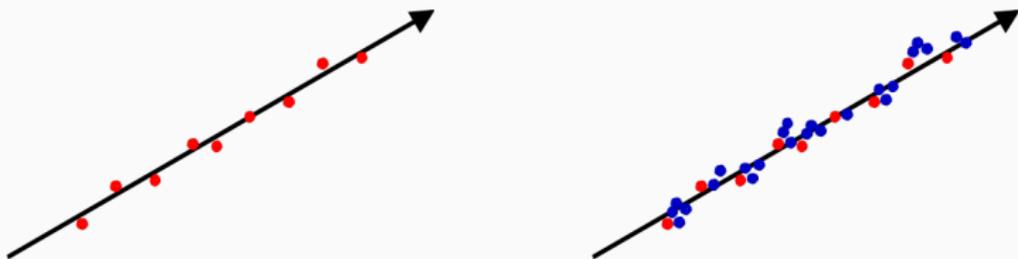
Dove w è l'energia media necessaria per produrre una coppia e-/ione: tale energia w è maggiore della energia di ionizzazione, esistono infatti altri meccanismi in cui la radiazione incidente perde energia senza creare coppie di ioni (tipicamente nelle eccitazioni – collisioni distanti).

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: $w = 30 - 35$ eV (in un rivelatore a semiconduttore: $w \simeq 3.5$ eV).

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

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 Dx sarà:

$$N_{tot} = \frac{\Delta E}{w_i}$$

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: esempi



Contatori Geiger-Muller

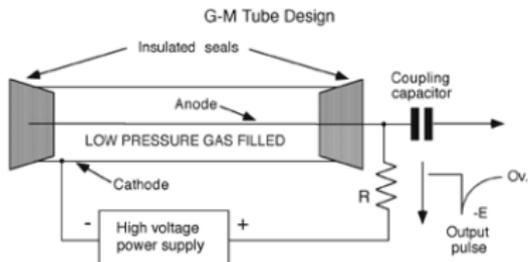
Operano nella [regione E](#) della curva segnale d'uscita-potenziale in un rivelatore a gas.

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.*

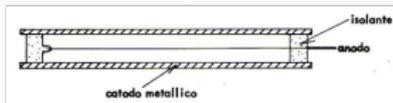
Infatti oltre alla [ionizzazione](#) si hanno fenomeni quali l'eccitazione seguita da emissione di luce visibile e ultravioletta. Una piccola parte di tali fotoni dà luogo ad emissione di fotoelettroni che generano nuova ionizzazione, tramite il processo della [moltiplicazione a valanga](#).

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 ($\approx \mu\text{s}$)

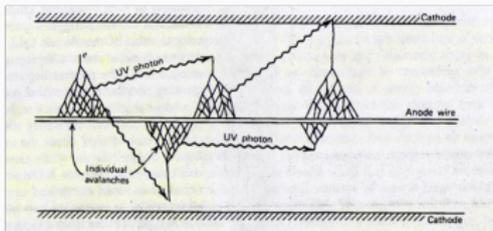
Termina quando si è creata la stessa carica



Tutti gli impulsi hanno la stessa ampiezza



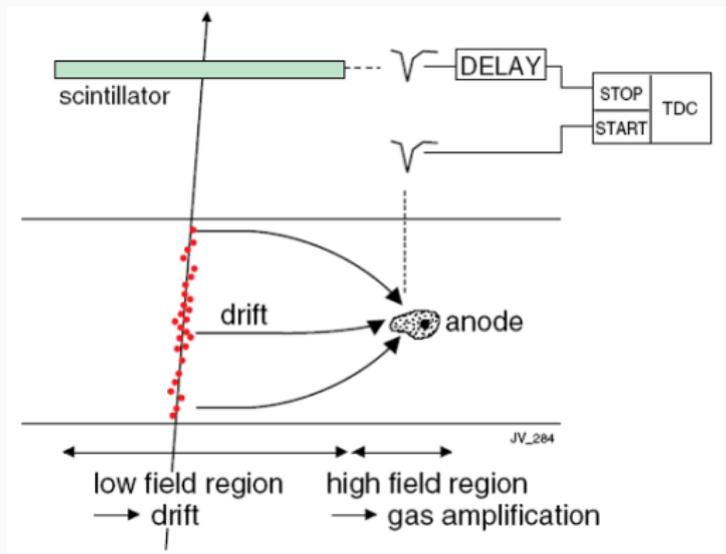
Contatore Geiger = Contatore di radiazione



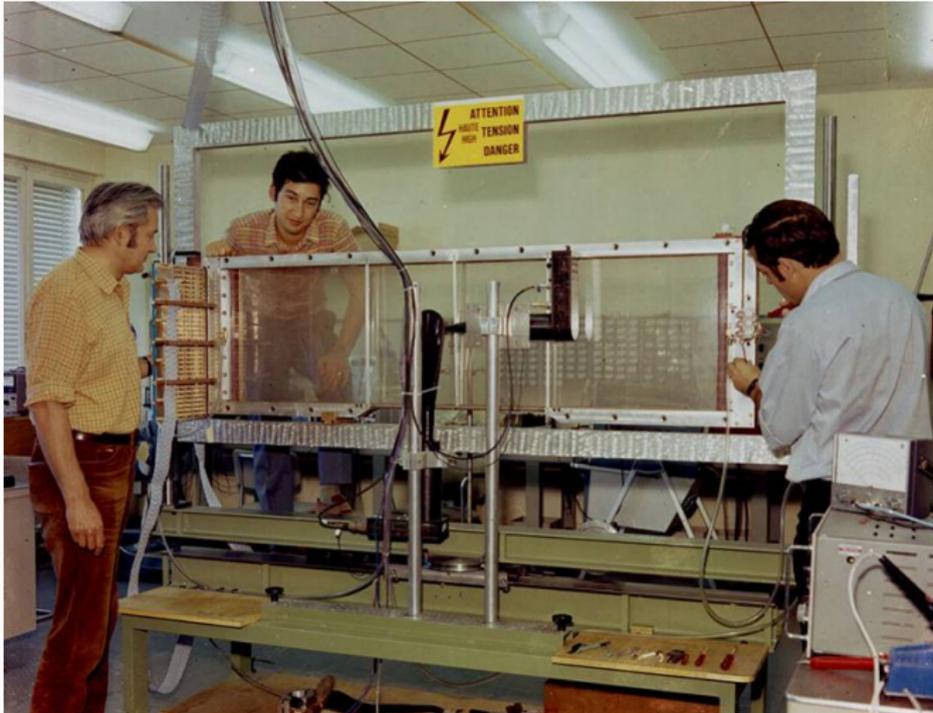
$$M \sim 10^6 + 10^8$$

Camere a deriva (drift)

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



Multi-wire Proportional Chambers



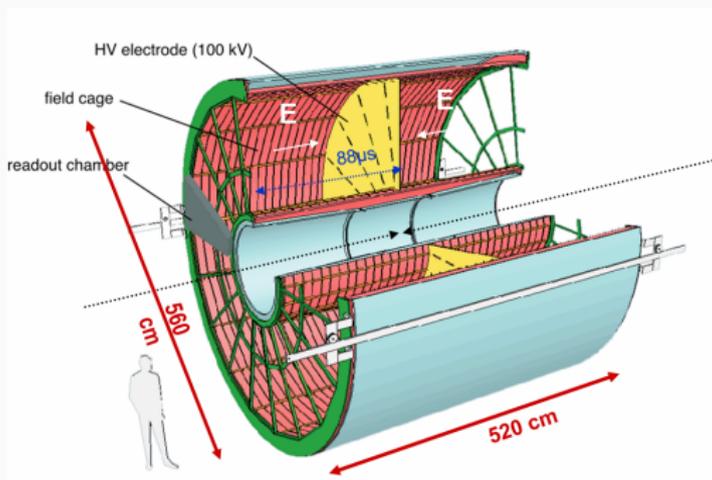
G. Charpak, F. Sauli and J.C. Santiard.

Premio Nobel 1992 per invenzione camera proporzionale multifilo

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:



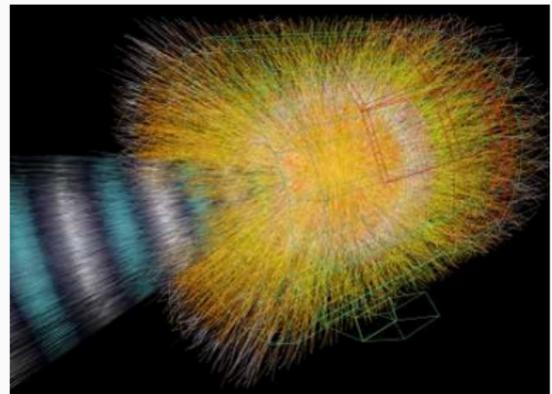
La coordinata z (assiale) viene misurata dal tempo di drift, le coordinate (x,y) dal particolare settore che raccoglie il segnale. Risoluzione tipiche: 0.5 mm.

TPC: Time Projection Chambers



La TPC di ALICE.

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



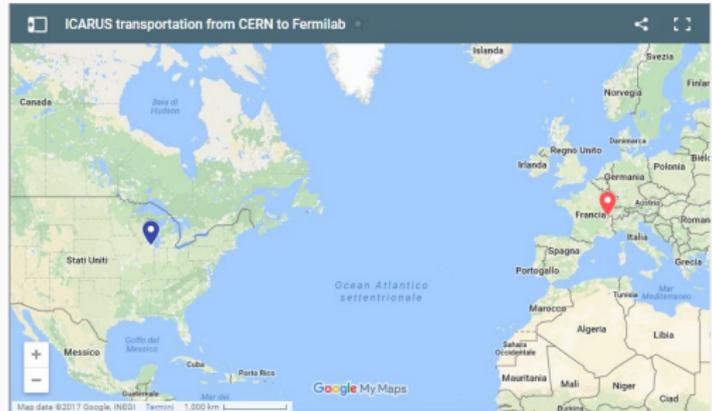
TPC: Time Projection Chambers



La TPC di Icarus.

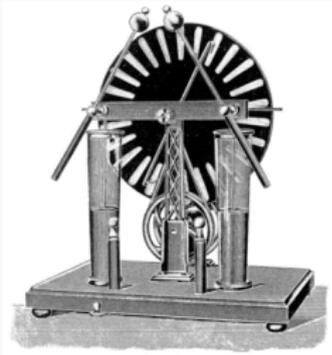
In viaggio a partire da questa settimana dal CERN a Fermilab:

<http://icarustrip.fnal.gov/>



Ma facciamo un passo indietro...

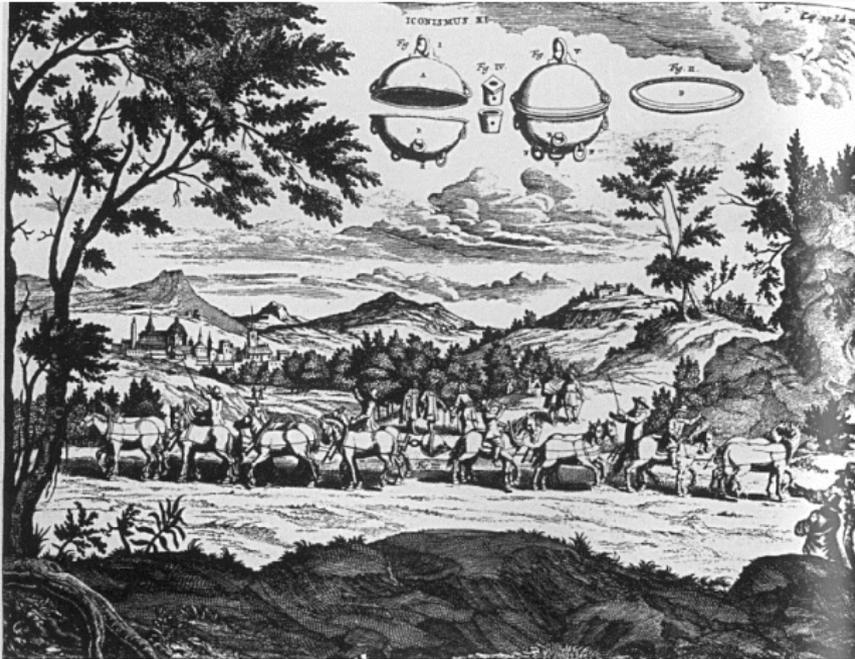
Fenomeni di scariche elettriche in gas sono noti all' uomo da molto tempo, ma solo dalla seconda metà dell' 800 i fisici ne hanno compreso la natura e oggi noi vi conviviamo senza problemi...



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)...



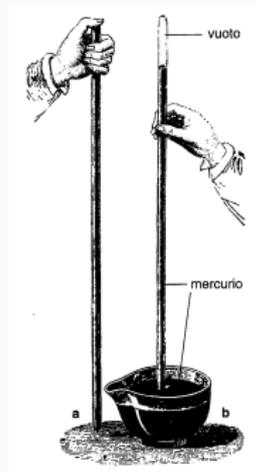
Esperienza di Magdeburgo di Otto von Guericke (1655).

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.

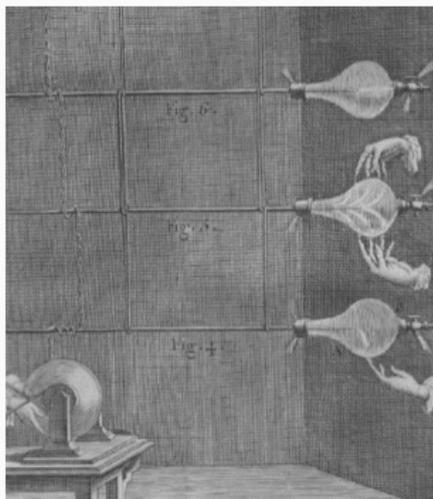
Hauksbee considera come **ben distinti** l' elettricità e i "bagliori": entrambi si ottengono per strofinio ma si verificano secondo lui in condizioni diverse, l' uno nel vuoto (parziale) e l' altro in presenza di aria.



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.

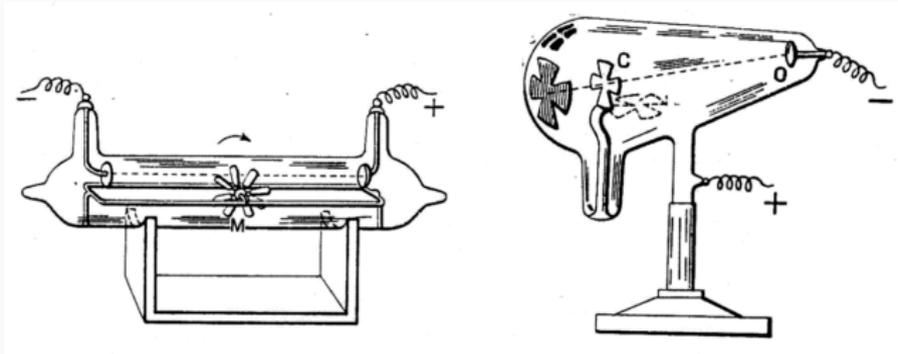
Hittorf stabilisce per la prima volta che quelli che lui chiamava **"Glimmstrahlen"** ("raggi splendenti o balenanti") vengono emessi dal catodo seguendo poi traiettorie rettilinee (1869).

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).

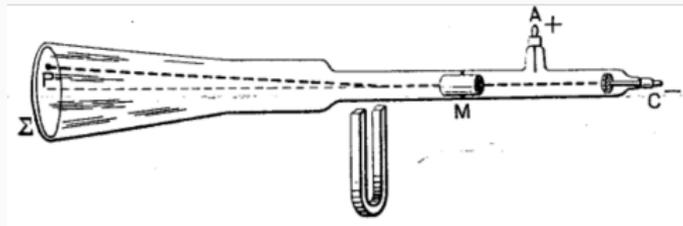
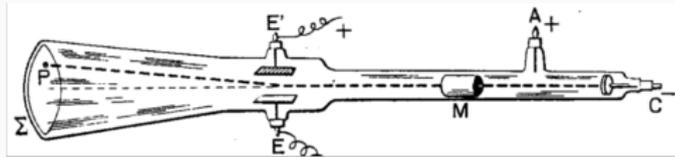
Raggi catodici

- 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.



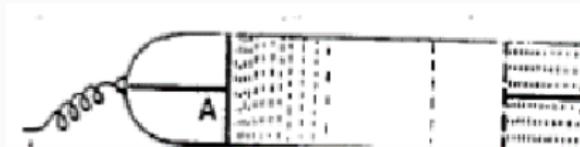
Raggi catodici

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



Raggi anodici

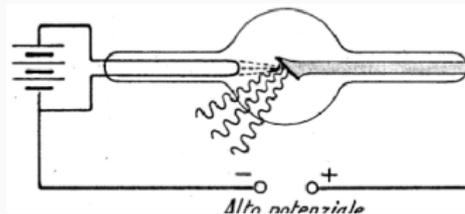
Anche dall' **anodo** di un tubo a vuoto molto spinto partono dei raggi la cui esistenza fu dimostrata da **Goldstein** con il tubo rappresentato in figura.



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

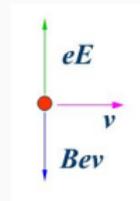
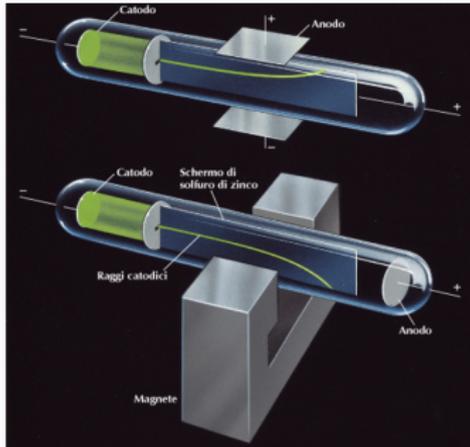
In **altissimo vuoto** un fascio di raggi catodici, con d.d.p. dell'ordine di qualche decina di migliaia di volt, urta una **piastrina metallica** di tungsteno collegata con l'anodo: i raggi catodici vengono assorbiti dalla piastrina e che, in loro vece, dalla superficie della piastrina stessa, vengono 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 $E = 0$: $evB = \frac{mv^2}{r} \rightarrow \frac{e}{m} = \frac{E}{B^2 r}$
dove r è il raggio di curvatura
- Risulta che:

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

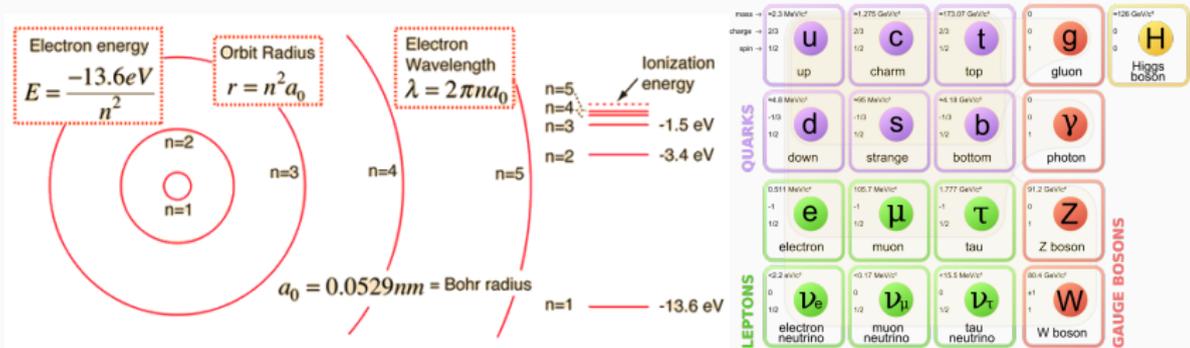
Esperimento di Thomson



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:

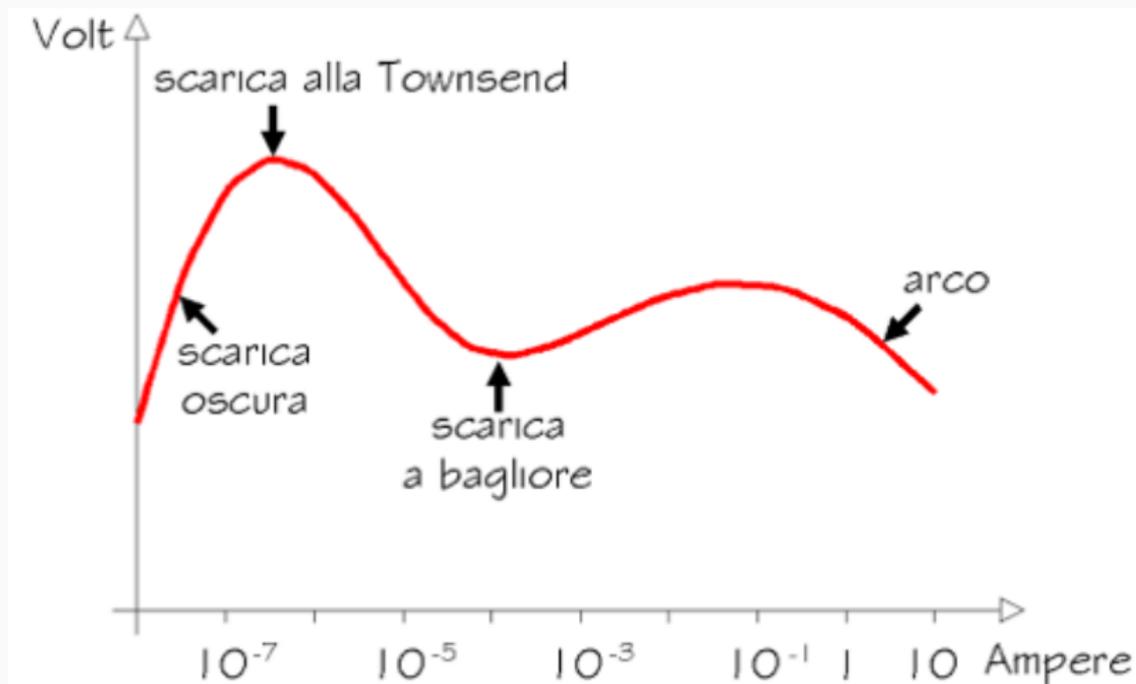
$$\Delta V = \Delta V(I, P, d, \dots)$$

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.



- 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**.

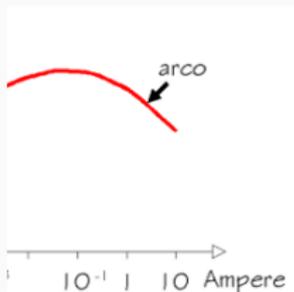
Secondo tratto



- 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**).



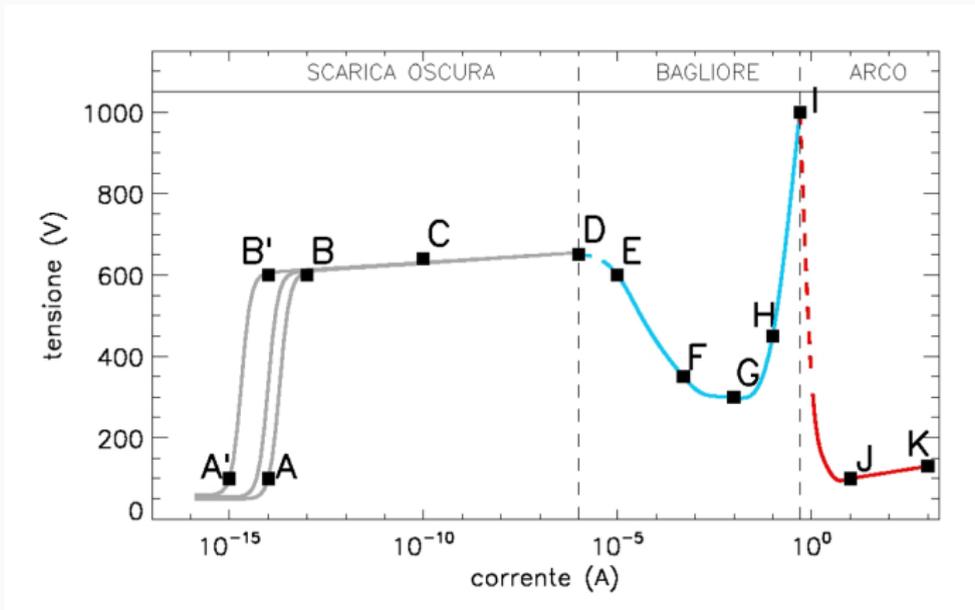
- Ionizzazione con **processo a valanga**;
- Ulteriore aumento della corrente ($10^{-5} - 10^{-3}$ A) e diminuzione della differenza di potenziale tra gli elettrodi.
- Accumulo di cariche di segno opposto in prossimità degli elettrodi, che alterano l'andamento del campo elettrico.
- Accumulo di **carica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



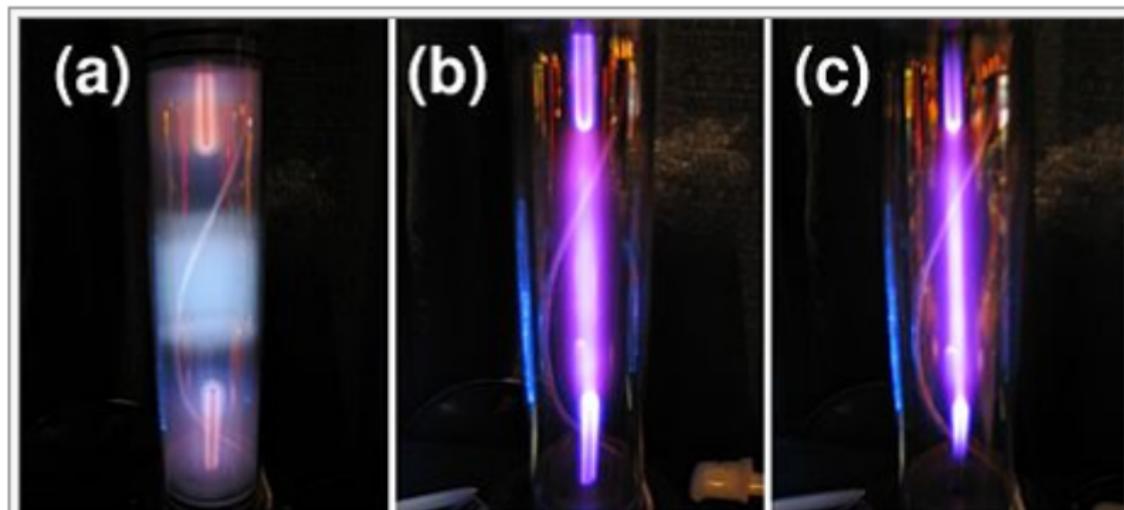
- Ulteriore aumento della corrente ($> 1 \text{ A}$);
- **Scarica ad arco** alla quale concorrono gli elettroni emessi per effetto termoionico dal catodo riscaldato fino a $900 \text{ }^\circ\text{C}$ per l' impatto con gli ioni positivi;
- Diminuzione della tensione.

Curva caratteristica

Riassumendo...

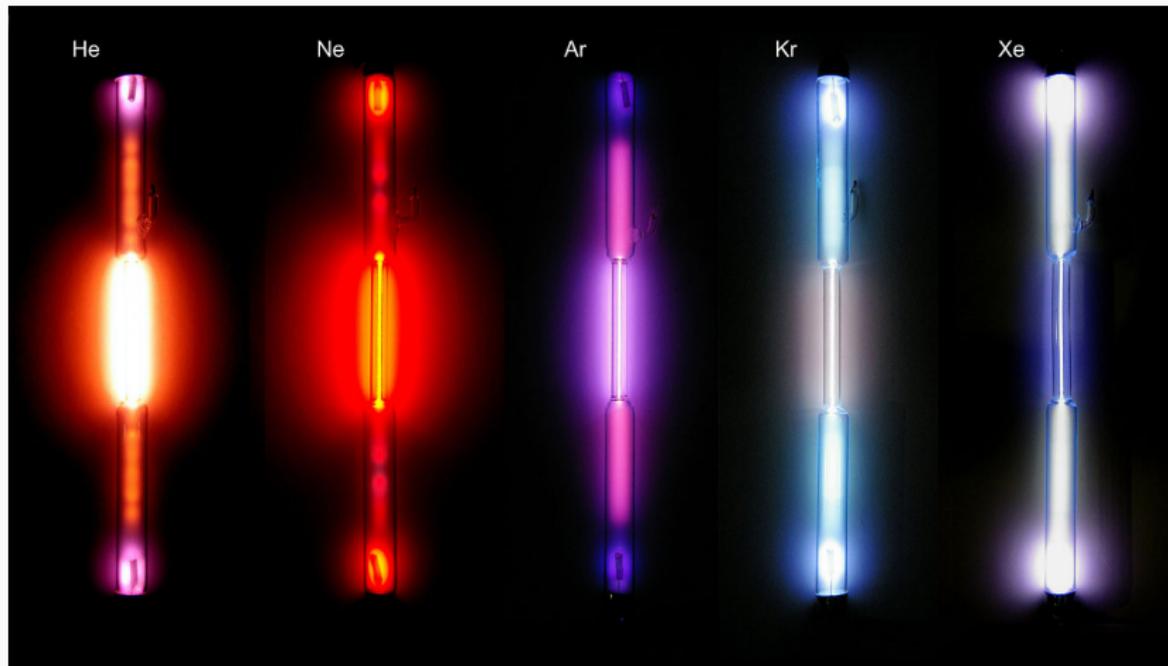


Curva caratteristica di un **tubo al Neon**, pressione 1 torr, con due elettrodi a disco di 2 cm di diametro, separati di 50 cm.

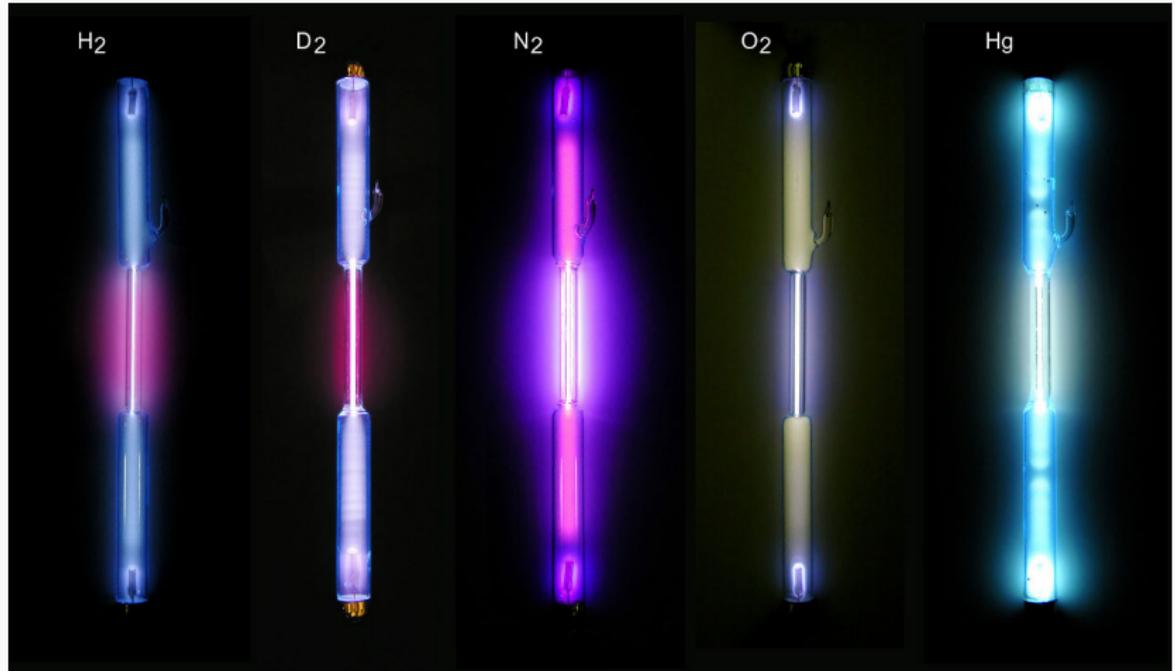


La transizione dalla scarica a bagliore all'arco si può ottenere semplicemente aumentando la **pressione del gas** di riempimento, come nell'esempio qui mostrato: da (a) a (c) la scarica passa dalla glow, dove il bagliore occupa tutto il tubo da vuoto, all'arco, dove la scarica invece assume gradualmente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

Effetti luminosi in gas diversi



Effetti luminosi in gas diversi



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

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

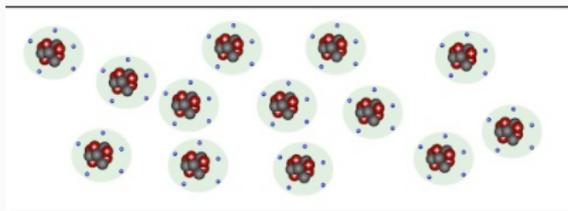
Investigating spontaneous gas discharge in air as a function of pressure

Objects of the experiments

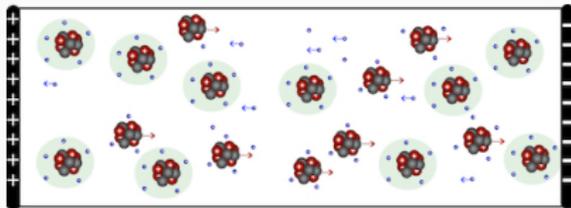
- Observing spontaneous gas discharge in air as a function of pressure.
- Measuring the high voltage from the current-limited high-voltage power supply as a function of pressure.



Effetto del potenziale

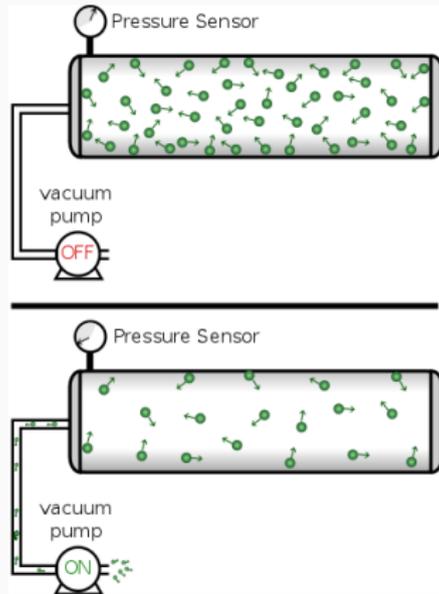


Gli ioni vengono accelerati dalla ΔV tra gli elettrodi.



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.

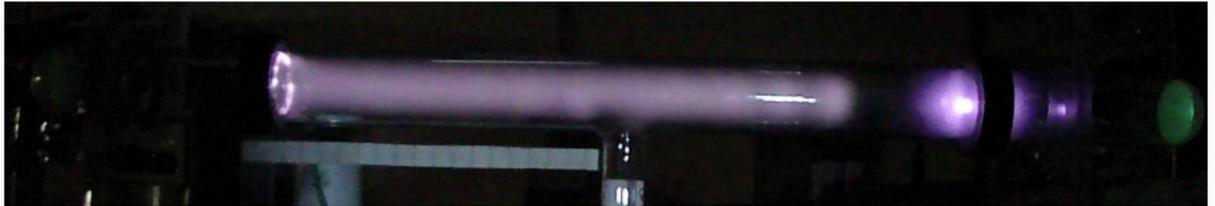
Osservazione della scarica

- $p \sim 9.5 \cdot 10^{-1}$ 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

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



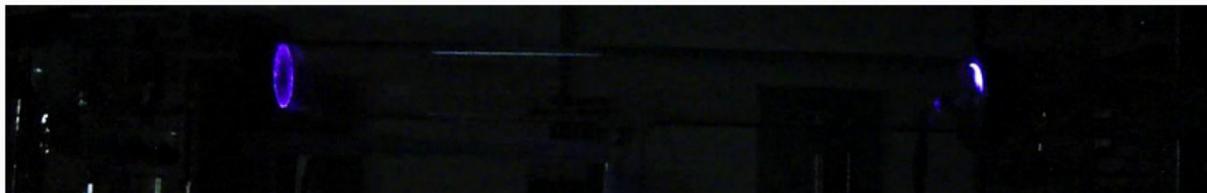
Osservazione della scarica

- $p \sim 1.4\text{mbar}$: 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

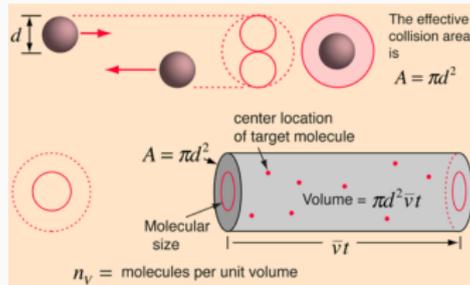
- $p \sim 5.7\text{mbar}$: permane una leggera luminescenza di colore blu solo sugli elettrodi.



con $p > 6\text{mbar}$: **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:

$$n_V = \frac{n N_A}{V} = \frac{n N_A}{\frac{n R T}{p}} = \frac{N_A p}{R T}$$

Il **libero cammino** medio sarà:

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

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

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

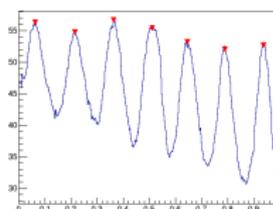
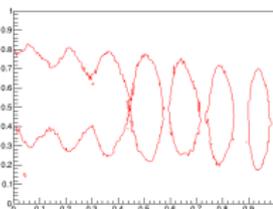
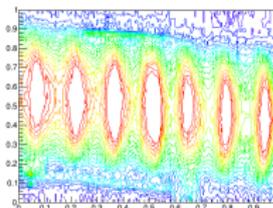
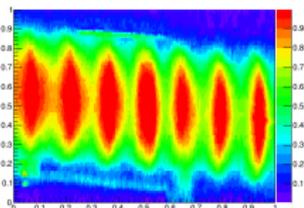
dove Ω è il volume in cui avviene l'interazione e N il numero di particelle in Ω .

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

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

Analisi dei "mushrooms"

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

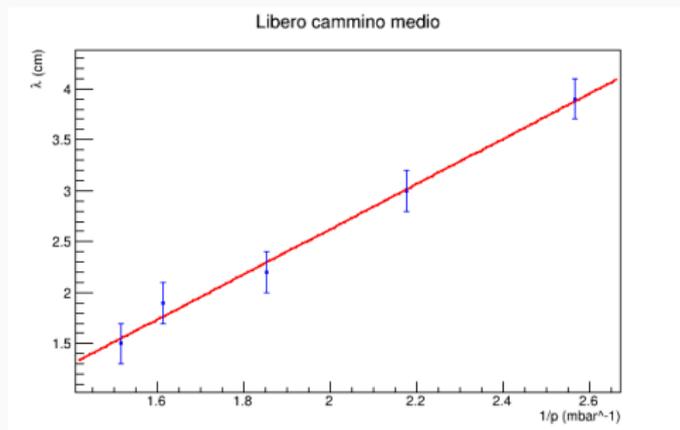


Tesi triennale: E. Tiengo.

Libero cammino medio

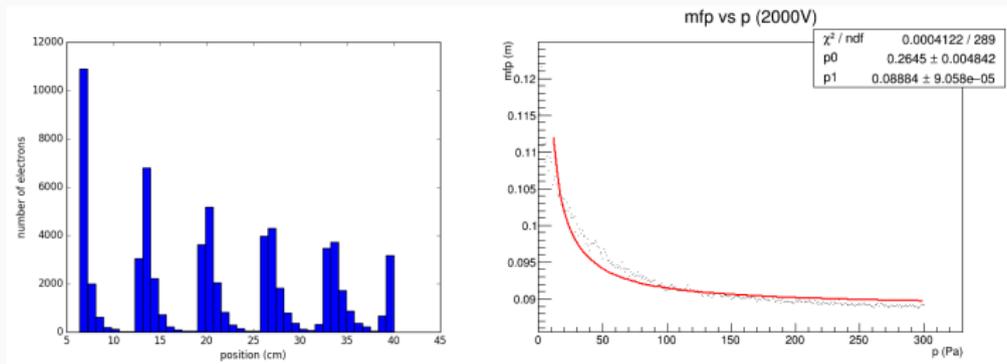
Andando a valutare la **distanza degli anelli al variare della pressione** si ottiene un grafico che segue la legge:

$$\lambda \times p = \text{const}$$



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.

- **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.**

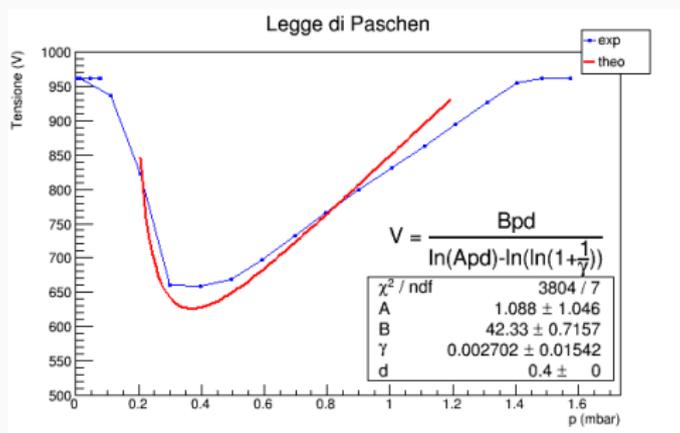
$$V = V(P, d, \dots)$$

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:

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



Lo studio della scarica in gas rarefatti ha portato:



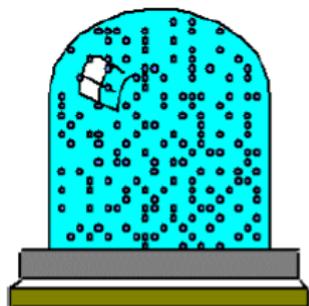
- primo **acceleratore** di particelle
- scoperta dell' **elettrone**
- scoperta dei raggi X

-  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

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

<http://www.pv.infn.it/~fontana>

Riserva

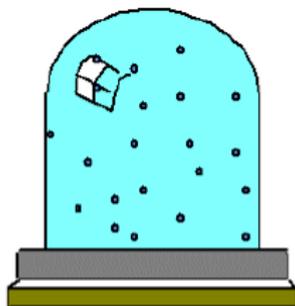


Basso vuoto

759 - 1×10^{-3} torr

1012 - 1×10^{-3} mbar

1×10^5 - 1×10^{-1} Pa

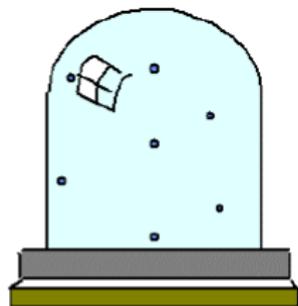


Alto vuoto

1×10^{-3} - 1×10^{-8} torr

1×10^{-3} - 1×10^{-8} mbar

1×10^{-1} - 1×10^{-6} Pa



Ultra alto vuoto

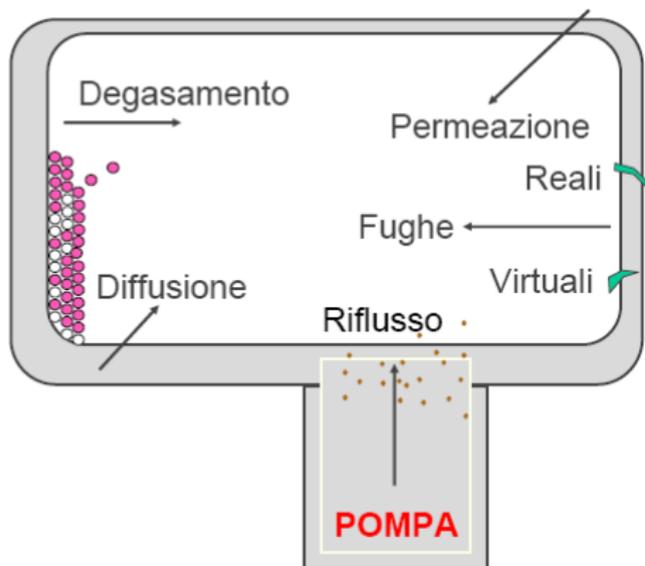
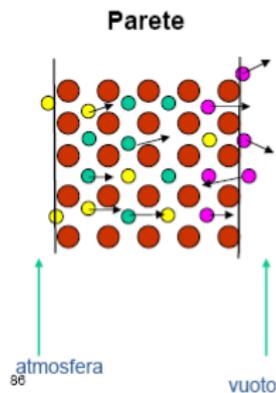
1×10^{-8} - 1×10^{-12} torr

1×10^{-8} - 1×10^{-12} mbar

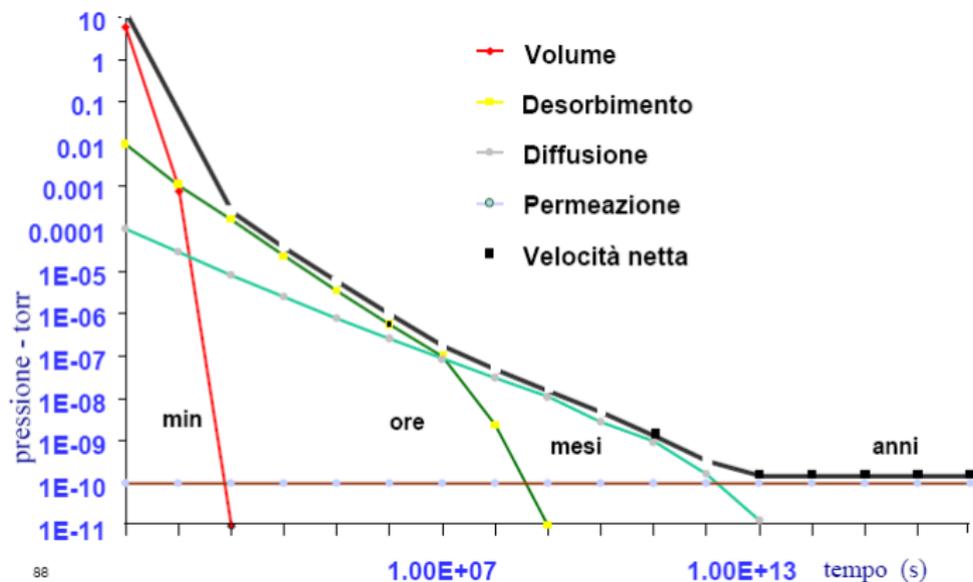
1×10^{-6} - 1×10^{-10} Pa

Mantenere il vuoto 1

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



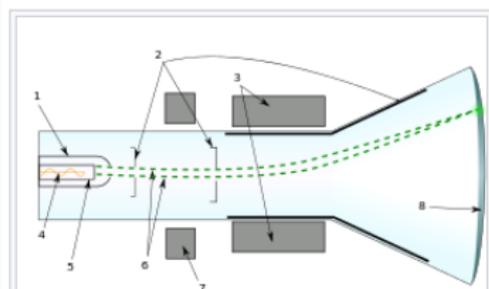
Mantenere il vuoto 2



88

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.

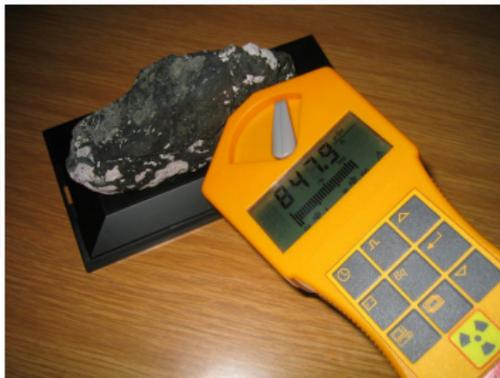
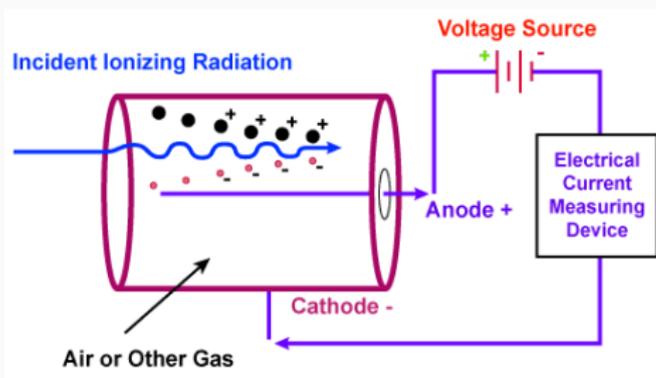


Sezione schematica di un tubo a raggi catodici monocromatico

- 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

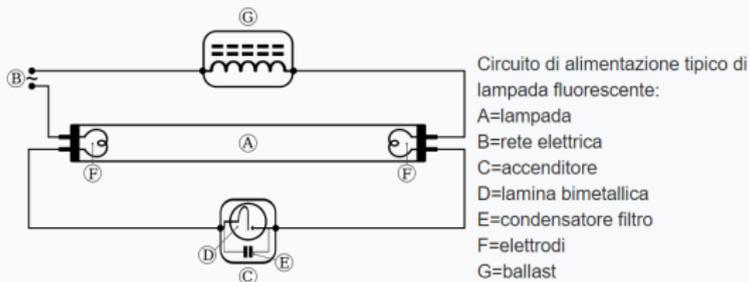
Applicazione: rivelatori a gas

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:

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

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

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

Dal confronto segue la **legge di Paschen**:

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

I coefficienti A e B dipendono dal tipo di gas.