

CORRENTE ELETTRICA NEI GAS

1. La scarica nei gas

Nei capitoli precedenti abbiamo studiato la corrente nei conduttori metallici. Rimane ora da considerare il fenomeno della corrente nei gas ed, in particolare, nell'aria. In un primo tempo abbiamo considerato l'aria ed i gas come isolanti. In alcuni casi i gas possono diventare conduttori. Dobbiamo però rilevare una caratteristica comune e molto importante di questi conduttori gassosi che li contraddistingue dai conduttori metallici:

la corrente nei gas non segue la legge di Ohm, e quindi non è possibile stabilire la nota relazione:

$$V = Ri.$$

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. Questo è il motivo per cui un elettroscopio carico, dopo un certo periodo di tempo, si scarica, in quanto la sferetta collegata all'asta contenente le foglioline attrae gli ioni di segno opposto che, venuti a contatto con l'elettroscopio, neutralizzano gradualmente la sua carica. Avvicinando un agente ionizzante, la scarica avviene più velocemente, perché si generano nell'aria nuovi ioni. L'effetto ionizzante dei raggi cosmici diventa sempre più intenso con l'aumentare dell'altitudine: a 100 Km dal livello del mare l'atmosfera presenta una notevole ionizzazione (ionosfera) importante per la propagazione delle onde elettromagnetiche.

I metodi di ionizzazione di un gas si possono suddividere in:

- 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

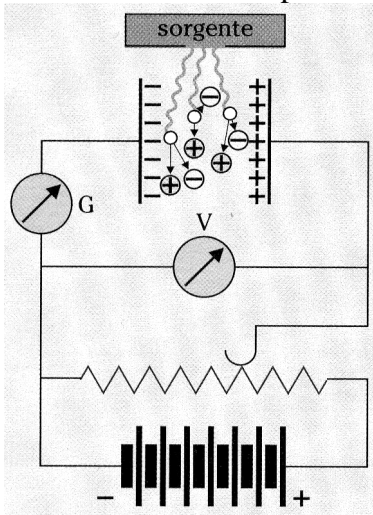
4) **Ionizzazione per radiazione elettromagnetica** – I raggi ultravioletti, i raggi X e γ , arrivando al gas, sono capaci di espellere degli elettroni dalle molecole e si hanno così ioni positivi ed elettroni liberi che nel loro cammino si fissano ad altre molecole neutre, creando ioni negativi.

In ogni caso la formazione di ioni positivi importa un lavoro di estrazione di elettroni e richiede assorbimento da parte della molecola di una determinata quantità di energia che è fornita dalla causa ionizzante, mentre invece la formazione di uno ione negativo che si forma fissando uno o più elettroni ad una molecola neutra, avviene con emissione di energia sotto forma di calore.

Per studiare la conduzione nei gas, consideriamo una quantità di gas a valori diversi di pressione.

2. Conduzione nei gas a pressione ordinaria

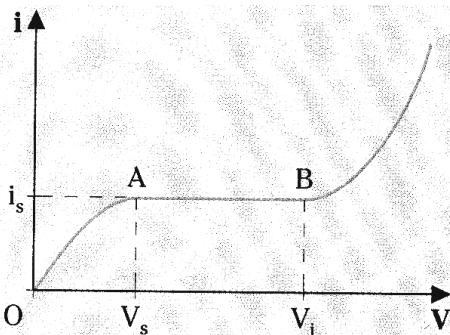
Ricorriamo ad un dispositivo così schematizzato:



le armature di un condensatore sono collegate ai poli di una pila per mezzo di un potenziometro. Se l'aria è secca, lo strumento di misura non segnala alcuna corrente. Se invece ionizziamo l'aria, irradiandola con raggi X, lo strumento segnala nel circuito una corrente che è costituita da un movimento di ioni negativi ed elettroni verso l'armatura positiva e di ioni positivi verso l'armatura negativa. Variando la d.d.p V tra le armature del condensatore e misurando per ogni valore di V la corrispondente intensità di corrente, possiamo costruire la curva caratteristica.

Al crescere di V per piccoli valori, i dapprima cresce in modo proporzionale a V secondo la legge di Ohm, ma presto le sue variazioni si scostano da questa legge e raggiungono un limite che non è mai oltrepassato, per quanto si aumenti V . A questo valore di corrente si dà il nome **di corrente di saturazione** (i_{sat}) e con ciò viene dimostrato che la conduzione nei gas non segue la legge di Ohm.

I valori di i_{sat} variano con la forma del condensatore, con l'intensità dell'agente ionizzante, con la natura del gas e aumenta con la distanza tra le armature.



Il valore della f.e.m. per cui si ha la corrente di saturazione è detto **tensione di saturazione**.

Il tratto ascendente OA della curva si spiega col fatto che, se la tensione è bassa, il numero di ioni che per unità di tempo arrivano sugli elettrodi, e che perciò contribuiscono con la loro carica alla corrente, è inferiore al numero di ioni che nel tempo unitario vengono prodotti dagli agenti ionizzanti. Col crescere della tensione cresce anche il numero di ioni che arrivano sugli

elettrodi nell'unità di tempo e quindi aumenta l'intensità di corrente. Quando la tensione è tale che tutti gli ioni prodotti in un secondo arrivano sugli elettrodi nello stesso intervallo di tempo, la

corrente raggiunge il valore di saturazione i_{sat} e non può più aumentare. Se indichiamo con n il numero di ioni prodotti dagli agenti ionizzanti per unità di tempo e di volume, il numero di ioni N prodotti nell'unità di tempo tra le due piastre si ottiene moltiplicando n per il volume d'aria compresa tra le due piastre. Si ha pertanto:

$$N = n S h$$

dove S è l'area di ciascuna armatura ed h è la distanza tra le armature. Se supponiamo che gli ioni abbiano tutti carica e , l'intensità di corrente sarà:

$$i = \frac{q}{t} = N e = N S h e$$

Pertanto:

la corrente di saturazione è direttamente proporzionale alla distanza h tra gli elettrodi.

Per ottenere un'intensità di corrente superiore al valore di saturazione è necessario produrre un maggior numero di ioni per unità di tempo e per unità di volume. E' ciò che accade quando la tensione supera il valore d'innesco V_i . In tali condizioni il campo elettrico esistente tra gli elettrodi è tanto intenso da accelerare gli ioni tra un urto ed il successivo, fino ad una velocità tale che la corrispondente energia cinetica supera quella di ionizzazione. 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. Il passaggio della corrente in tali condizioni è noto come **scarica a valanga**.

La tensione d'innesco V_i è direttamente proporzionale alla pressione 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. Indicando con d la distanza tra gli elettrodi e con E , il campo elettrico corrispondente alla tensione d'innesco V_i , si ha:

$$E_i = \frac{V_i}{d}$$

da cui segue che a parità di distanza tra gli elettrodi, V_i diminuisce al diminuire di E_i . Pertanto ad una diminuzione di pressione corrisponde una diminuzione di E_i e quindi di V_i .

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

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

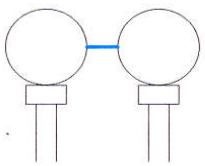
3. Fenomeni luminosi nella scarica a pressione normale

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.

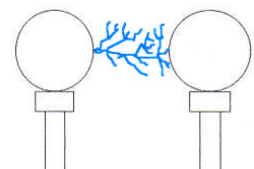
Osserviamo che gli ioni accelerati dal campo elettrico, nell'urto contro molecole neutre, possono produrre non solo la ionizzazione, ma anche la loro eccitazione. Infatti gli elettroni che, in condizioni normali, occupano le orbite più interne, possono ricevere dagli ioni l'energia sufficiente perchè si portino su di un'orbita più esterna. La molecola così si trova in uno stato di eccitazione. Dopo un certo periodo breve gli elettroni ritornano nelle orbite interne emettendo sotto forma di luce l'energia assorbita. Si tratta di un processo diretto di conversione di energia elettrica in energia luminosa senza riscaldamento. Infatti i corpi solidi emettono luce a causa del calore prodotto per effetto Joule.

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 .

Il tubo di scarica è un tubo di vetro contenente due elettrodi e riempito di gas. I due elettrodi sono, ad esempio, le armature del condensatore di cui si è prima parlato. 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 bianco-azzurrognolo 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.

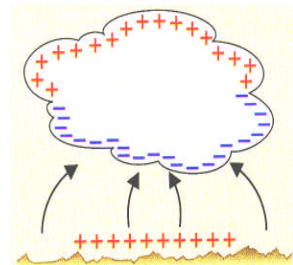


Se uno degli elettrodi ha la forma di una punta, la scarica elettrica diventa persistente e prende il nome di *effluvio*. Il campo elettrico molto intenso in prossimità della punta agevola la ionizzazione per urto producendo la scarica.

Un particolare tipo di scintilla è la scarica che avviene tra due nubi temporalesche oppure tra una nube temporalesca e la Terra.

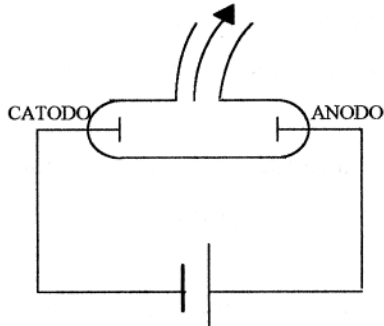
Essa prende il nome di *lampo* nel primo caso e di *fulmine* nel secondo caso.

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 nubi temporalesche.



4. Scarica nei gas rarefatti

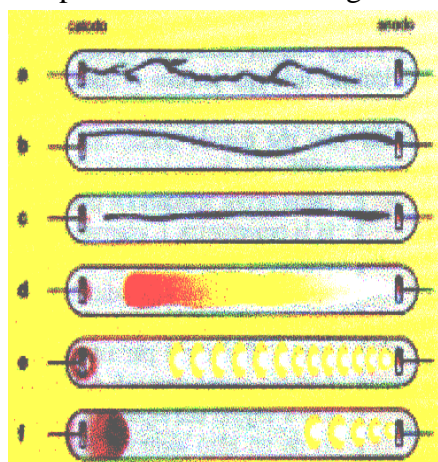
Si consideri un tubo di vetro cilindrico avente un elettrodo a ciascun estremo, collegato ad una pompa pneumatica che permette di ridurre progressivamente la pressione del gas in esso contenuto.



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.

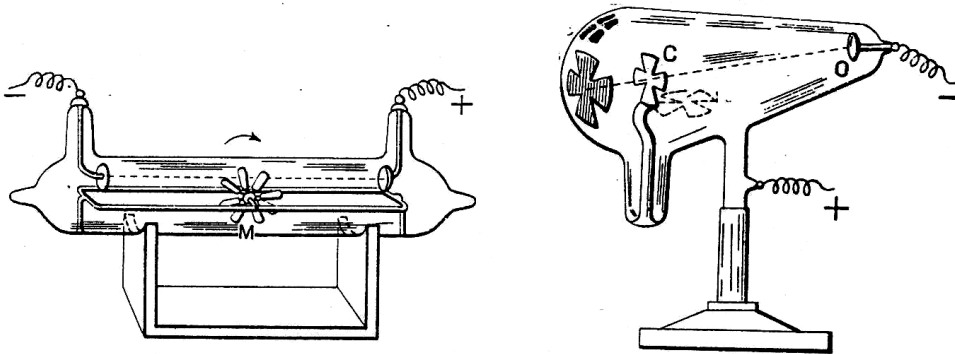
– Per valori di pressione prossimi a 0,01 mm di mercurio, ogni luminosità interna è scomparsa: la mancanza di ioni ha aumentato la resistenza del tubo e si dice che il tubo diventa duro. A queste pressioni e a quelle inferiori, la corrente si ottiene solo applicando tra gli elettrodi d.d.p. molto elevate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

4.a. I RAGGI CATODICI

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

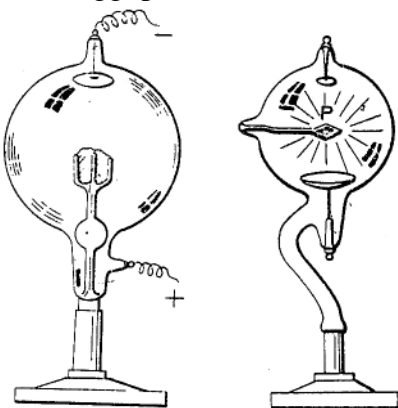
1. I raggi catodici partono dal catodo ed hanno effetto meccanico.

Si dimostra col tubo che porta un mulinello a palette di mica. Quando il mulinello viene investito dai raggi catodici, si pone subito in rapida rotazione; invertendo la polarità degli elettrodi, il mulinello inverte il senso di rotazione



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

Si dimostra con il tubo nel quale si ha una croce C di alluminio che può essere elevata o abbassata a piacere, mentre il catodo è una calotta sferica convessa di centro O e l'anodo è costituito da un filo saldato lateralmente. Quando la croce è alzata, sul vetro opposto al catodo si forma un'ombra, come se i raggi provenissero dal centro O seguendo in tutto la legge della propagazione rettilinea



3. I raggi catodici producono in determinate sostanze emissione di

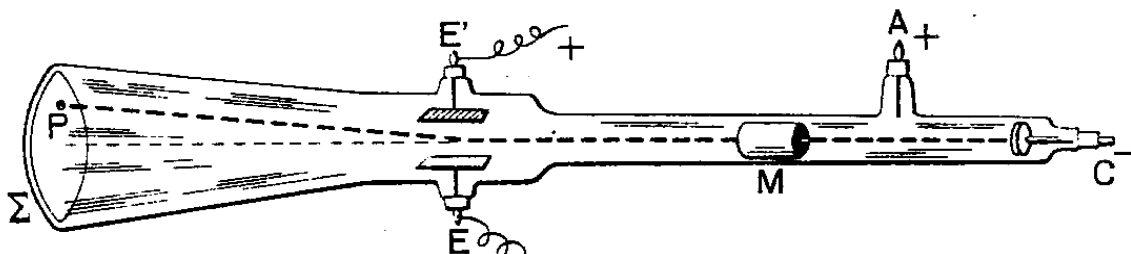
luce, detta fluorescenza se cessa al cessare della causa eccitante, fosforescenza se permane ancora per qualche tempo. Si dimostra con il tubo in cui sono collocati dei minerali. Il solfuro di carbonio, per fluorescenza, si colora intensamente di azzurro, il carbonato di calcio di color rosso, etc.

4. I raggi catodici hanno effetto termico

Si dimostra col tubo che ha per catodo una calotta sferica nel cui centro si trova una piastrina di

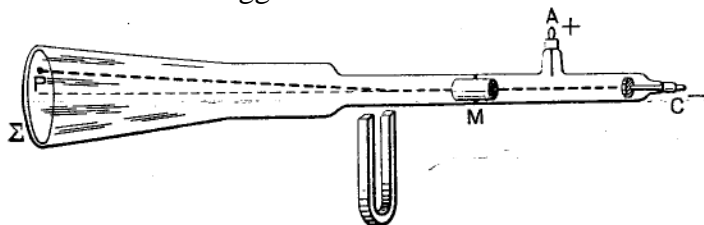
platino P. I raggi catodici, uscendo normalmente dal catodo, vengono concentrati in P e la piastrina si arroventa, anzi qualche volta fonde.

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



L'esperienza viene eseguita al tubo di Braun che consiste in un tubo a vuoto spinto, in cui di fronte al catodo C, vi è un cilindretto di alluminio M il quale porta al centro un piccolo foro che lascia passare un pennello di raggi, mentre all'estremità opposta al catodo si trova uno schermo S ricoperto di una sostanza che diventa fluorescente quando viene investita dai raggi catodici.

E ed E' sono due elettrodi che possono essere collegati ai poli di un generatore di d.d.p.. Quando E ed E' sono allo stesso potenziale ed il tubo funziona, si ha su S una tacca luminosa P fluorescente, allineata con il catodo ed il foro. Se invece tra E ed E' si ha un campo elettrico creato da una d.d.p., la tacca P si sposta ed indica che il pennello di raggi catodici è attratto dall'elettrodo positivo e respinto da quello negativo E confermando la presenza di cariche negative sui corpuscoli che costituiscono i raggi catodici.



Nel medesimo tubo, accostando una calamita, si osserva uno spostamento della tacca luminosa P.

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**.

Questi studi hanno portato alla scoperta dell'elettrone e si è trovato che tutti gli elettroni sono uguali, hanno massa uguale a circa $\frac{1}{1837}$ della massa dell'atomo di idrogeno, una carica negativa

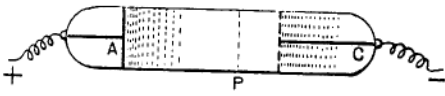
pari a

$$E = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

e sono lanciati con velocità variabile tra i 40.000 ed i 100.000 Km/sec, dipendente dal grado di rarefazione del tubo e dalla tensione applicata ai suoi elettrodi.

4.b. 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.



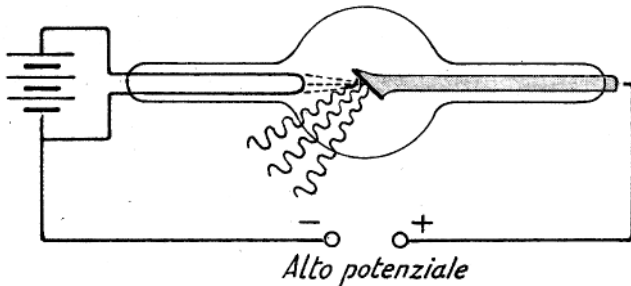
A è l'anodo, C è il catodo sul quale sono praticati dei piccoli fori. Quando il tubo è in funzione, dietro al catodo compaiono dei pennelli luminosi in corrispondenza dei fori. Questi pennelli, però, vanno rapidamente sfumando e in apparenza sembrano provenire dal catodo, ma un ostacolo posto in P, davanti 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.

4.c. 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.

I raggi X presentano notevolissime proprietà che passiamo ad esporre:

1. I raggi X ionizzano l'aria.

2. I raggi X eccitano la fluorescenza e impressionano la lastra fotografica.

Uno schermo, ricoperto di particolari sostanze, colpito dai raggi X, emette una radiazione luminosa che lo rende visibile nell'oscurità; inoltre si può constatare che una lastra fotografica, esposta ai raggi X, subisce trasformazioni chimiche analoghe a quelle della luce

3. I raggi X si propagano in linea retta, si riflettono, si rifrangono, interferiscono, si diffrangono, mentre **non vengono deviati** da campi elettrici e magnetici.

Questi esperimenti permettono di affermare che i raggi X sono radiazioni della stessa natura della luce.

4. I corpi otticamente opachi, e di densità non elevata, sono trasparenti ai raggi X

Facendo passare attraverso una mano un fascio di raggi X e raccogliendoli su di uno schermo fluorescente, si vede che i muscoli diventano trasparenti; tuttavia la trasparenza è maggiore per i corpi meno densi. Sono opachi i metalli, specialmente quelli di peso atomico più elevato, come il piombo.

5. I raggi X sono debolmente calorifici.

Questi raggi riscaldano leggermente i corpi sui quali vanno a cadere.

Le applicazioni dei raggi X sono numerose ed importanti. Nella **radioscopia** viene osservata direttamente, sopra uno schermo fluorescente, l'ombra prodotta da un oggetto colpito dai raggi X; nella **radiografia**, invece, si sostituisce allo schermo fluorescente la lastra di una macchina fotografica. Questi procedimenti sono molto utili in medicina per rilevare l'esistenza di fratture ossee, di alterazioni organiche, per localizzare la presenza di formazioni tumorali o di corpi estranei penetrati nel corpo umano (proiettili, schegge, etc); in certi casi (ad esempio per l'esame dell'apparato digerente) l'organo da osservare viene reso opaco mediante ingestione di sostanze opportune non trasparenti ai raggi X.

5. Effetto termoelettronico

Un filamento di metallo, in un'ampolla a vuoto spinto, e portato all'incandescenza, emette elettroni. Questo fenomeno chiamato **effetto termoionico** o **termoelettronico**, è stato scoperto da Edison nel 1883 per filamenti di platino e carbone, ma si verifica anche per altre sostanze, ed è molto attivo nei metalli.

Nel filamento metallico vi sono gli elettroni di conduzione i quali si muovono disordinatamente come le molecole di un gas. Il fatto che gli elettroni, nonostante il moto di agitazione molecolare, non escano fuori dal metallo, s'interpreta ammettendo che in prossimità della superficie del metallo esiste una barriera di potenziale che ne riduce progressivamente l'energia cinetica fino ad annullarla. Dette E_e ed E_i , le energie che un elettrone avrebbe rispettivamente all'esterno del metallo, in un punto molto vicino alla superficie, e nell'interno, la differenza:

$$\Delta E = E_e - E_i$$

risulta positiva ed è chiamata **energia di estrazione** o lavoro di estrazione del metallo, in quanto rappresenta l'energia minima che è necessario fornire al metallo perchè si abbia emissione di elettroni. Il rapporto:

$$\Delta V = \frac{\Delta E}{e}$$

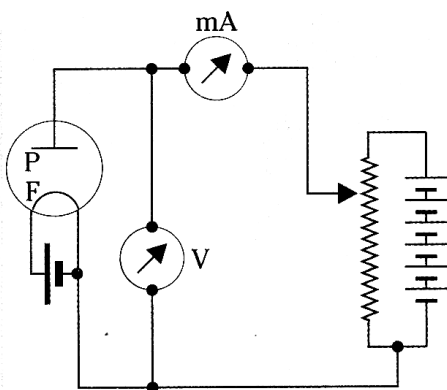
rappresenta l'energia di estrazione per unità di carica e si chiama **potenziale di estrazione**. Esso dipende dalla natura del metallo considerato e dalla temperatura alla quale si trova il metallo.

Uno dei meccanismi con cui è possibile cedere agli elettroni l'energia sufficiente perchè si abbia emissione consiste nel riscaldamento del metallo. Infatti, se aumentiamo la temperatura del metallo, aumenta di conseguenza l'energia cinetica degli elettroni e di questi, quelli che hanno acquisito un'energia almeno pari all'energia di estrazione, possono essere emessi dal metallo.

Si dimostra che il numero di elettroni emessi in un secondo attraverso l'unità di superficie è espresso dalla formula:

$$N = AT^2 e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$$

in cui A è una costante per tutti i metalli, T è la temperatura assoluta del metallo, ΔE è l'energia di estrazione, k è la costante di Boltzmann ed e è la costante di Nepero.



Un dispositivo in cui trova applicazione l'effetto termoionico è il **diode**, (così chiamato perchè comprende due elettrodi), che consiste in un'ampolla di vetro a vuoto spinto nella quale si trova un filamento F di tungsteno che si può portare all'incandescenza mediante una batteria d'accensione B_f di 4-5 volt. Attorno al filamento è posto un cilindretto P di nichel detto *placca*. Tra placca e filamento è inserita una batteria B_a , che crea una tensione anodica V_a regolabile mediante un potenziometro.

Negli schemi elettrici il simbolo grafico mediante il quale si

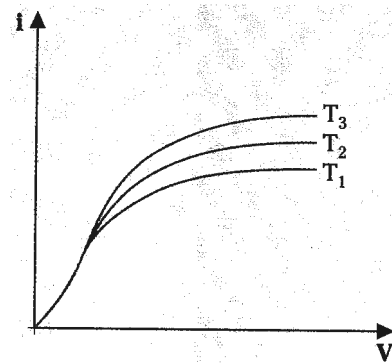
rappresenta il diode termoionico é:



Se il filamento è spento, il milliamperometro non segna corrente, mentre se si rende incandescente il filamento, chiudendo il circuito del filamento, si osserva che il milliamperometro segnala un passaggio di corrente i_a , detta corrente anodica, solo se la placca è positiva.

Il diodo funziona dunque come una valvola: lascia passare la corrente convenzionale solo in un senso e precisamente dalla placca positiva verso il filamento negativo. E' facile interpretare il fenomeno se si pensa che, se la placca fosse negativa, essa respingerebbe gli elettroni, mentre se è positiva, li attrae e, attraverso il circuito di placca ritornano al filamento.

L'analisi della corrente anodica porta a stabilire che questa corrente è dovuta effettivamente ad un flusso di elettroni, perfettamente uguali a quelli che costituiscono i raggi catodici e che si muovono dal filamento alla placca.



Per avere una visione completa del comportamento di un diodo, dobbiamo ricorrere alla sua curva caratteristica. Come si vede la curva passa per l'origine perché, è ovvio, quando la tensione anodica ha il valore zero, anche la corrente anodica è nulla. Per una data temperatura del filamento, la corrente anodica cresce dapprima con l'aumentare della tensione anodica V_a , ma ad un certo limite ogni aumento di V_a lascia costante l'intensità della corrente. Si dice che si è raggiunta l'intensità di saturazione i_{sat} .

Per spiegarci il comportamento del diodo, dobbiamo considerare cosa avviene, nel suo interno, degli elettroni emessi dal catodo. A questo scopo occorre tenere presente che gli elettroni vengono attratti dall'anodo, come un corpo viene attratto dalla Terra: un corpo che cade al suolo per effetto dell'attrazione terrestre aumenta continuamente la sua velocità, cioè subisce un'accelerazione. In modo analogo, gli elettroni vengono accelerati dalla forza di attrazione esercitata dall'anodo e quindi la loro velocità aumenta a mano a mano che essi si allontanano dal catodo; l'accelerazione dipende dalla tensione anodica, risultando tanto maggiore quanto più elevata è questa tensione.

Per piccoli valori di V_a , gli elettroni si allontanano poco velocemente dal catodo, per cui degli elettroni emessi dal filamento in un secondo, solo pochi riescono a raggiungere l'anodo. Poiché il filamento continua ad emettere altri elettroni, vicino ad esso si forma un addensamento di elettroni, che costituiscono una specie di nube elettronica avente una carica elettrica negativa distribuita nello spazio circostante al catodo (carica spaziale). La nube elettronica, dopo essersi formata, esercita un'azione di repulsione sugli elettroni emessi successivamente dal catodo, facendo ritornare quelli meno veloci sul catodo stesso; in tal modo, non tutti gli elettroni emessi da questo elettrodo costituiranno la corrente anodica, perchè solo i più veloci di essi riescono a raggiungere la nube e a portarsi sull'anodo.

Con il crescere di V_a , gli elettroni aumentano la loro velocità e quindi risultano meno addensati intorno al catodo, perchè rimangono per minor tempo nei pressi di questo elettrodo: diminuisce perciò il numero di elettroni che costituiscono la nube. Gli elettroni emessi vengono respinti in minor numero e risultano così più numerosi quelli che possono raggiungere l'anodo, facendo aumentare la corrente anodica. Si spiega in tal modo perchè il primo tratto della caratteristica del diodo indica un aumento della corrente anodica all'aumentare della tensione anodica.

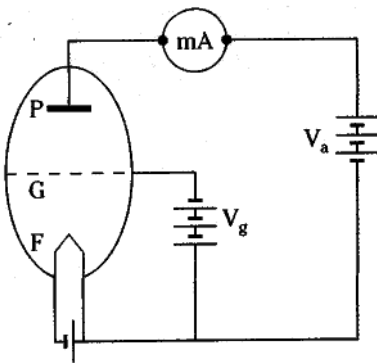
Continuando ad aumentare questa tensione, gli elettroni vengono allontanati dal catodo sempre più rapidamente, perciò l'effetto della carica spaziale va diminuendo fino a scomparire del tutto. Quando ciò accade, si ottiene la corrente di saturazione, il cui valore non può più aumentare perchè ormai tutti gli elettroni che, nell'unità di tempo, il catodo è in grado di emettere raggiungono l'anodo. Da questo istante in poi l'intensità di corrente dipende dal numero degli elettroni emessi in un secondo dal filamento, cioè dalla temperatura del filamento. Per aumentare ulteriormente la corrente, si dovrebbe aumentare la temperatura del catodo.

Per ottenere il valore della corrente di saturazione ad una certa temperatura T del filamento, dobbiamo moltiplicare il numero N di elettroni emessi per unità di tempo e di superficie per la carica e di ciascuno di essi e per la superficie S del filamento. Si ha perciò: v

$$i_{sat} = e AT^2 e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$$

La più importante applicazione del diodo consiste nel suo impiego come raddrizzatore di corrente. Se tra filamento e placca si applica una tensione alternata, è chiaro che la corrente passa solo quando P è positiva ed F è negativo; si ottiene dunque una corrente pulsante in cui è raddrizzata solo una semionda.

Una importante modificazione del diodo si ha nel **triodo** che consiste in un diodo con l'aggiunta di



un terzo elettrodo G detto *griglia*, collocata tra il filamento e la placca e costituita da una sottile rete metallica oppure un filo metallico avvolto ad elica attorno al filamento. Il nome di triodo proviene dal fatto che l'ampolla ha in sostanza tre elettrodi.

Come nel diodo, il filamento F è portato all'incandescenza dalla batteria d'accensione B_f . Gli elettroni emessi vengono raccolti dall'anodo, passando facilmente attraverso le spire della griglia. Essa può influire, tuttavia, sulla quantità di elettroni che si dirigono verso

l'anodo se si trova ad un potenziale elettrico diverso da quello del filamento.

Nel triodo c'è una terza batteria che mantiene la d.d.p. V_g , detta **tensione di griglia**, tra il filamento F e la griglia G . Se la griglia è positiva rispetto al filamento, a parità di tensione anodica, gli elettroni si dirigono in maggior numero verso la placca, passando attraverso le maglie della griglia. Se, invece, la griglia è negativa rispetto al filamento, gli elettroni sono ostacolati nel percorso da una forza di repulsione esercitata dalla griglia e, pertanto, solo gli elettroni più veloci tra quelli emessi possono passare attraverso la griglia e raggiungere l'anodo, per cui l'intensità di corrente diminuisce fino ad annullarsi per un opportuno valore della tensione di griglia. In conclusione, col triodo, possiamo far variare a piacere la corrente anodica i_a , variando convenientemente il potenziale di griglia. In realtà, anche nel triodo si forma intorno al catodo una nube di elettroni che, con la sua carica spaziale, concorre con la griglia ad ostacolare il cammino degli elettroni verso l'anodo.

Quindi, in un triodo, la corrente anodica dipende non soltanto dalla tensione anodica, come nel diodo, ma anche dalla tensione di griglia.

Le curve caratteristiche di un triodo si chiamano anodiche, se indicano come varia la corrente

anodica in conseguenza della variazione della tensione anodica, mutue, se indicano come varia la corrente anodica in conseguenza della variazione della tensione di griglia. Le caratteristiche anodiche e mutue sono anche dette *statiche*, perché ciascuna di esse indica come varia la corrente anodica quando viene fatta variare una sola delle due tensioni da cui dipende la corrente.

Una delle più importanti applicazioni del triodo consiste nell'utilizzarlo come amplificatore di corrente. Infatti, una piccola variazione della tensione di griglia produce una notevole variazione della tensione anodica.