

## V.12. Approfondimenti di elettromagnetismo

### 12.1 La conduzione elettrica nei solidi

#### 12.1.1 L'ESPERIMENTO DI RIECKET

- ⌘ **Dagli esperimenti alla teoria sulla conduzione elettronica**
- ⌘ **Emissione termoionica: diodo, tubo a raggi X, fotomoltiplicatore**
- ⌘ **Il triodo e le sue caratteristiche**
- ⌘ **Il tubo a raggi catodici, l'oscilloscopio, il monitor**
- ⌘ **Produzione e misura della ionizzazione nei gas**

In quasi tutti i capitoli precedenti dedicati alla elettricità si è ripetutamente sottolineato che la conduzione nei metalli è dovuta alla disponibilità di elettroni liberi che si muovono quasi liberamente tra gli ioni collocati ai vertici del reticolo cristallino.

L'interesse relativo alla conduzione nei metalli si sviluppa dopo che si è affermata la realtà fisica degli elettroni come granuli di elettricità presenti come costituenti basilari della materia (inizio novecento).

La spiegazione della conduzione per elettroni è basata su alcuni risultati sperimentali che ci apprestiamo a descrivere.

Il primo esperimento fu eseguito nel 1910 da E.C.V. Riecket (1845-1915). Tre cilindri, due di rame ed uno di alluminio, con le facce accuratamente lavorate furono posti a contatto uno dopo l'altro e vennero quindi collegati ad un generatore. Fu fatta circolare una corrente costante di 0.1 A per un anno, il che corrisponde al trasporto di una carica totale superiore a  $3.5 \times 10^6$  C <sup>(1)</sup>.

Nonostante la quantità notevole di carica trasportata non si rivelò alcuna variazione di natura chimica o di massa e ciò significa che la corrente nei metalli è dovuta al moto di particelle che non hanno nulla a che vedere con la composizione chimica dei metalli stessi e, dunque, non può trattarsi di ioni, che sono diversi nei diversi metalli, ma solo di elettroni.

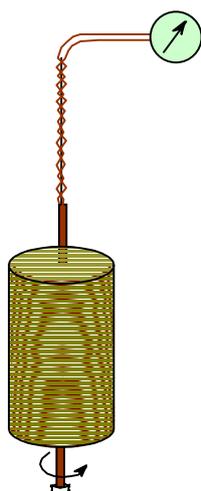
#### 12.1.2 L'ESPERIMENTO DI STEWART E TOLMAN

L'esperimento decisivo venne eseguito nel 1916 da due fisici T.D. Stewart e R.C. Tolman (1881-1948) sulla base di una proposta avanzata originariamente da Lorentz.

Un lungo filo conduttore (circa 500 m) venne avvolto ad una bobina e collegato ad un *galvanometro balistico* <sup>(2)</sup>. La bobina fu dapprima posta in rapida rotazione (velocità periferica di circa 300 m/s) e, successivamente, venne bloccata bruscamente.

I due fisici, per evitare fenomeni di induzione dovuti alla presenza del campo terrestre utilizzarono bobine percorse da corrente che eliminavano per sovrapposizione gli effetti del campo terrestre al punto che, durante la rotazione uniforme dell'apparato, il galvanometro non segnava alcuna corrente. L'esperimento venne eseguito utilizzando come metallo per l'avvolgimento sia rame, sia argento, sia alluminio.

Durante la fase di frenamento il sistema di riferimento solidale alla bobina risulta essere non inerziale e pertanto un qualsiasi corpo nel sistema



L'esperimento di **Stewart e Tolman** consente di misurare l'inerzia di rotazione delle cariche libere presenti in un conduttore

<sup>1</sup>  $Q = 0.1 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 = 3.15 \times 10^6$  C

<sup>2</sup> si tratta di un particolare tipo di galvanometro in grado di calcolare piccole quantità di carica connesse anche a fenomeni impulsivi

non inerziale risulta soggetto ad una forza apparente  $\mathbf{F}_{in} = -m\mathbf{a}$  dove  $\mathbf{a}$  è la accelerazione del sistema di riferimento.

Per effetto di questa forza le particelle libere all'interno del conduttore si muovono in avanti nel verso di movimento del conduttore come succede ai passeggeri di un autobus quando l'autobus frena bruscamente. Ciò produce nel conduttore una corrente il cui verso dipende dal segno delle cariche coinvolte dato che le particelle cariche, qualunque sia il loro segno, si muovono nella direzione del moto originario del conduttore. La forza inerziale è una forza estranea e dunque determina una f.e.m. Si ha pertanto:

$$\mathcal{E} = \frac{\mathcal{L}_{estr}}{q} = \frac{F_{in} l}{q} = - \frac{m a l}{q}$$

dove  $\left\{ \begin{array}{l} q \text{ è la carica della particella libera di massa } m \\ l \text{ è la lunghezza del conduttore} \end{array} \right.$

Sono note sia la lunghezza del conduttore, sia la accelerazione di frenamento ed è dunque possibile determinare il rapporto carica su massa della particella attraverso la misura della f.e.m.

L'esperimento ha consentito di affermare che le particelle libere coinvolte nella conduzione dei metalli sono cariche negativamente e si è trovato che il loro rapporto carica-massa è  $1.60 \times 10^{11}$  C/kg per il rame,  $1.49 \times 10^{11}$  C/kg per il l'argento e  $1.54 \times 10^{11}$  C/kg per l'alluminio.

Come si vede i risultati sperimentali differiscono dal rapporto carica-massa dell'elettrone per valori tra il 9 e il 15% e ciò può essere considerato pienamente accettabile vista la grossolanità dell'esperimento. Dunque possiamo affermare con sufficiente sicurezza che la corrente nei metalli sia costituita da un moto di elettroni. Il segno della carica è rilevato attraverso il verso della corrente che attraversa il galvanometro.

Nel 1944 venne realizzato anche l'esperimento inverso e cioè la capacità di una corrente impulsiva di far variare la quantità di moto di un cilindro oscillante. Anche questo esperimento consentì di determinare il rapporto  $q/m$  delle cariche coinvolte con un valore preciso entro lo 0.2 % con quello dell'elettrone.

### 12.1.3 VALORE E LIMITI DELLA TEORIA SUL GAS DI ELETTRONI

La teoria sulla conduzione elettronica nei metalli fu inizialmente proposta nel 1900 da P. Drude (1863-1906). Essa fu quindi sviluppata da H. Lorentz utilizzando la teoria statistica di Maxwell e Boltzmann. La teoria di Lenz-Drude prevede che la totalità di elettroni liberi possa essere trattata come un gas ideale detto *gas di elettroni* le cui proprietà sono in tutto simili a quello di un gas perfetto.

Incominciamo calcolando l'energia cinetica media del moto termico del singolo elettrone con la stessa relazione utilizzata per determinare l'energia cinetica media delle molecole del gas perfetto monoatomico:

$$\overline{\varepsilon} = \frac{m \overline{v}^2}{2} = \frac{3}{2} k_B T$$

A temperatura ambiente ( $T \approx 300$  K), si ottiene per la velocità media

$$\overline{v} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}} \approx \sqrt{\frac{3 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300}{9.1 \times 10^{-31}}} \approx 10^5 \text{ m/s}$$

Se si usano considerazioni di natura quantistica per calcolare l'energia cinetica media degli elettroni di conduzione, si deve utilizzare l'equazione relativa alla energia di una particella localizzata e in quel caso la velocità del moto casuale degli elettroni di conduzione risulta:

$$\overline{v} = \sqrt{\frac{2 \varepsilon}{m}} = \sqrt{\frac{2 \hbar^2 n^{2/3}}{m \cdot 2m}} = \frac{\hbar n^{1/3}}{m} \approx \frac{10^{-34} \times 10^{10}}{10^{-30}} \approx 10^6 \text{ m/s}$$

La velocità *random* può essere calcolata sia per via classica (equipartizione dell'energia) sia per via quantistica (energia di una particella localizzata); i due valori determinati sono tra loro compatibili

cioè un valore che, nell'ambito delle approssimazioni fatte, risulta compatibile con quello ottenuto applicando la teoria classica.

Come si vede, la velocità media del moto di agitazione termica supera la velocità del moto ordinato (che abbiamo determinato nel quarto capitolo di questa stessa parte) di ben 8 ordini di grandezza.

In assenza di campo elettrico nel conduttore gli elettroni si muovono disordinatamente in tutte le direzioni e, appena si applica un campo dall'esterno, iniziano a muoversi lentamente in verso contrario a quello del campo. Questo moto ordinato e lento è spesso chiamato moto di *traslazione* e non ha alcun effetto sul moto termico.

Consideriamo un conduttore di lunghezza  $l$ , di sezione  $\sigma$  e di resistività  $\rho$  e supponiamo che, lungo il metallo agisca un campo elettrico  $E$ . L'elettrone risulterà soggetto ad una forza  $F = eE$  e si muoverà con accelerazione  $a = F/m = eE/m$  fino a collidere con uno ione.

Poiché gli elettroni partecipano anche al moto termico le loro collisioni con gli atomi saranno irregolari e inoltre è ignoto il tempo in cui essi rimangono temporaneamente legati allo ione. Per questa ragione si utilizzano una serie di valori medi tra cui il *tempo libero medio*  $\tau$  che corrisponde al tempo medio intercorrente tra un urto e il successivo.

Come vedremo tra breve il *tempo libero medio* può essere determinato tramite la conoscenza della resistività e della concentrazione e vale all'incirca  $10^{-14}$  s il che significa che un elettrone compie  $10^{14}$  urti al secondo contro le strutture del reticolo cristallino (*frequenza d'urto*).

Poiché possiamo ipotizzare che l'elettrone partendo da velocità nulla raggiunga nel tempo  $\tau$  la velocità  $a \tau$  stimeremo che la sua velocità media sia:

$$\overline{v} = \frac{a \tau}{2}$$

Se si tiene conto della espressione della accelerazione, poiché  $a = eE/m$  si ottiene:

$$\overline{v} = \frac{e \tau E}{2m}$$

e ciò ci permette di arrivare alla relazione tra  $\tau$  e  $\rho$ :

$$\tau = \frac{2 m \overline{v}}{e E} = \frac{2 m j}{e n e E} = \frac{2 m}{e^2 n \rho} \Leftrightarrow \rho = \frac{2 m}{e^2 n \tau}$$

Dunque nei metalli e nei semiconduttori la resistività è inversamente proporzionale alla concentrazione di elettroni liberi e al tempo libero medio.

Calcoliamo il valore di  $\tau$  per il rame usando i dati della tabella relativa all'effetto Hall:

Il *tempo libero medio*  $\tau$  tra due collisioni è di circa  $10^{-14}$  s e può essere determinato attraverso un modello a urti ripetuti con le informazioni sulla conduzione che possiamo ottenere tramite l'effetto Hall

$$\tau = \frac{2 m}{e^2 n \rho} = \frac{2 \times 9 \times 10^{-31} \times 6.41 \times 10^7}{1.6^2 \times 10^{-38} \times 11.4 \times 10^{28}} \approx 4 \times 10^{-14} \text{ s}$$

La ragione per la quale l'alluminio nonostante presenti un valore di  $n$  triplo del rame ha una resistività più elevata è dunque da ricercare in un tempo libero medio decisamente più basso; ciò indica una maggiore interazione tra il gas di elettroni e le strutture del reticolo cristallino.

Il prodotto tra la velocità media ed il tempo libero medio ci fornisce il libero cammino medio  $\lambda$ .

#### 12.1.4 UN GAS CALDO IN EQUILIBRIO CON UN RETICOLO FREDDO

Sappiamo che quando un conduttore è percorso da corrente la sua energia interna cambia e il conduttore si riscalda. La ragione per cui ciò accade viene spiegata dalla teoria elettronica della conduzione sostenendo che al termine del suo libero cammino medio, un elettrone accelerato da un campo elettrico ha aumentato la sua energia cinetica di una quantità  $\mathcal{E}_k = \frac{1}{2} m v_{\text{max}}^2$  dove  $v_{\text{max}} = a \tau$  è il valore massimo di velocità del moto ordinato.

Dopo aver percorso uno spazio pari al libero cammino medio, l'elettrone urta uno ione di massa migliaia di volte superiore alla sua e, per effetto dell'urto, l'energia in eccesso viene ceduta allo ione che aumenta il suo grado di vibrazione. Dunque, l'aumento di energia interna del conduttore è dovuto agli urti tra il reticolo cristallino e gli elettroni accelerati dal campo elettrico.

Applicando questo semplice modello si può dedurre oltre che la legge di Ohm anche la legge di Joule. Ma il meccanismo di trasmissione di energia dal gas di elettroni al reticolo cristallino non è così semplice.

Perché, durante l'urto, l'elettrone cede allo ione esattamente l'energia in eccesso corrispondente al moto ordinato, niente di più e niente di meno? Ci verrebbe da pensare che il gas di elettroni siano normalmente in equilibrio termico e che gli elettroni cedano energia perché questo equilibrio viene violato dal passaggio di corrente. Ma la situazione non è questa.

Il reticolo cristallino si trova ad una temperatura oscillante tra i 300 e i 500 K, ma per l'elettrone localizzato la situazione è molto diversa. La sua temperatura equivalente può essere dedotta eguagliando la espressione termica della energia con il valore corrispondente deducibile dalla condizione di localizzazione prevista dal principio di indeterminazione di Heisenberg:

$$\frac{3}{2} k_B T = \frac{\hbar^2 n_e^{2/3}}{2m}$$

e quindi:

$$T \approx \frac{\hbar^2 n^{2/3}}{3k_B m}$$

Se si sostituiscono i valori delle costanti di Planck e di Boltzmann e si tiene conto del fatto che la concentrazione elettroni è circa  $10^{29} \text{ m}^{-3}$  si ottiene:

$$T \approx \frac{10^{-68} \times 10^{58/3}}{3 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 9 \times 10^{-31}} \approx 6'000 \text{ K}$$

Perché quando urta il reticolo cristallino l'elettrone cede solo l'energia del moto ordinato e non anche quella del movimento random?

La temperatura del gas di elettroni dedotta dalle relazioni sulla localizzazione delle particelle è superiore di un ordine di grandezza a quella del reticolo; il fatto che non ci sia scambio termico è una conferma del principio di indeterminazione di Heisenberg

*Il reticolo cristallino e gli elettroni di conduzione formano due gas, uno classico e l'altro quantistico, che occupano lo stesso volume. Le loro temperature sono sensibilmente diverse: mentre quella del reticolo è tra i 300 e 500 K, la temperatura equivalente del gas di elettroni è intorno ai 6000 K*

Nonostante l'elevata differenza di temperatura tra il gas di elettroni e il reticolo, in assenza di corrente, non c'è scambio di calore. La ragione sta nel fatto che, in base al principio di indeterminazione di Heisenberg, l'energia degli elettroni di conduzione non può essere inferiore all'energia minima di una particella localizzata e pertanto anche se esiste equilibrio termico non si ha cessione di energia.

### 12.1.5 MA QUANDO PASSA CORRENTE L'EQUILIBRIO SI ROMPE

Quando inizia il passaggio di corrente la situazione muta sensibilmente. Grazie all'azione del campo elettrico gli elettroni acquistano della energia in eccesso. Tale energia in eccesso è estremamente bassa ed altrettanto lo è l'incremento di temperatura corrispondente.

Per stimarne il valore ricordiamo il valore tipico di campo elettrico in un conduttore è dell'ordine di 1 V/m e pertanto:

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{E}_k &= \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} m (a \tau)^2 = \frac{1}{2} m \frac{e^2 E^2}{m^2} \tau^2 = \frac{e^2 E^2 \tau^2}{2m} \approx \\ &\approx \frac{2.56 \times 10^{-38} \times 1 \times 10^{-28}}{2 \times 9 \times 10^{-31}} \approx 1.4 \times 10^{-36} \text{ J} \end{aligned}$$

Per contro l'energia media dell'elettrone è

$$\overline{\mathcal{E}_k} = \frac{\hbar^2 n^{2/3}}{2m} \approx \frac{10^{-68} \times \sqrt[3]{(10^{29})^2}}{2 \times 9 \times 10^{-31}} \approx 10^{-19} \text{ J}$$

e pertanto il valore relativo risulta estremamente basso:

$$\frac{\Delta \mathcal{E}_k}{\overline{\mathcal{E}_k}} \approx 10^{-17}$$

A questa variazione di energia corrisponde una variazione di temperatura assolutamente trascurabile:

$$\Delta T_{el} = \frac{2 \Delta \mathcal{E}_k}{3k_B} \approx \frac{2.8 \times 10^{-36}}{3 \times 1.38 \times 10^{-23}} \approx 0.7 \times 10^{-13} \text{ K}$$

ma è proprio questo eccesso di temperatura molto piccolo che viola l'equilibrio termodinamico e dà inizio al processo di scambio termico tra il gas di elettroni *surriscaldato* ed il reticolo cristallino: l'eccesso di energia che riceve il gas di elettroni attraverso il campo elettrico viene ceduta al reticolo e ciò determina il riscaldamento del conduttore e porta al cosiddetto effetto Joule.

Tutto ciò è molto strano e molto in contrasto con le leggi della meccanica classica. Nei processi di urto elastico od anelastico della meccanica classica la energia trasferita nell'urto, quando il rapporto tra le masse dei due oggetti è molto piccolo, è dell'ordine del rapporto delle masse. Nel

nostro caso  $\frac{m}{M} \approx 10^{-4}$  e pertanto anche  $\frac{\Delta \mathcal{E}_k}{\overline{\mathcal{E}_k}} \approx 10^{-4}$ . Se fosse così avver-

rebbero fenomeni *impensabili o improponibili*.

La temperatura del gas di elettroni dedotta dalle relazioni sulla localizzazione delle particelle è superiore di un ordine di grandezza a quella del reticolo; il fatto che non ci sia scambio termico è una conferma del principio di indeterminazione di Heisenberg

Una volta tanto la *strana meccanica quantistica* salva il senso comune e consente di spiegarci perché avvenga la cosa sensata (il trasferimento della sola energia in eccesso fornita dalla elettricità) e non si abbia invece la degenerazione della materia, cosa che avverrebbe se il gas di elettroni cedesse le quote di energia previste dalla meccanica classica.

### 12.1.6 METALLI, LEGHE E SEMICONDUTTORI

Dall'esame della tabella annessa all'effetto Hall si osserva che la resistività dei metalli è inferiore a quella dei semiconduttori da 5 a 8 ordini di grandezza e la ragione di questa grande differenza si spiega attraverso la teoria della conduzione elettronica. La distanza tra i vertici del reticolo cristallino è, grosso modo, la stessa per tutti i solidi e pertanto neanche il libero cammino medio può essere molto diverso per le diverse sostanze. Ciò che cambia nettamente è la concentrazione elettronica.

Come si vede dalla tabella V.12.1 la resistività delle *leghe* è molto superiore a quella dei metalli puri da cui le stesse leghe sono composte. In particolare se si traccia l'andamento della resistività di una lega composta da due metalli al variare della concentrazione, si osserva una curva decisamente difficile da spiegare. La resistività dapprima aumenta e quindi diminuisce. Il massimo di resistività è sempre superiore alle resistività dei due componenti puri. È come se il moto degli elettroni venisse ostacolato dalla presenza di disuniformità nella struttura del reticolo.

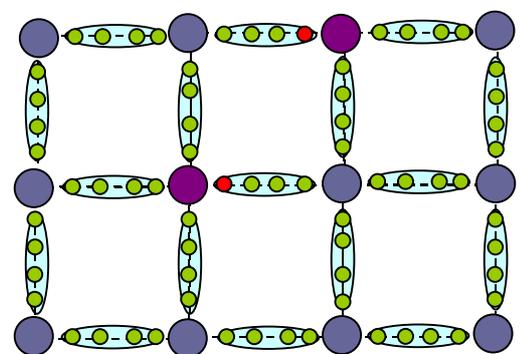
In effetti si è visto che la presenza di impurità e difetti nel reticolo cristallino e certe altre caratteristiche connesse alla vibrazione termica delle particelle in un solido, riducono fortemente il libero cammino medio degli elettroni e, di conseguenza, riducono la conducibilità elettrica dei materiali. La ragione in base alla quale la conducibilità elettrica di un corpo dipende dal grado di perfezione del reticolo cristallino può essere chiarita solo utilizzando concetti ripresi dalla meccanica quantistica relativi al carattere ondulatorio delle particelle.

I dati sperimentali indicano anche che i *semiconduttori* hanno un comportamento diverso da quello dei metalli. La loro resistività diminuisce sia al crescere della temperatura sia quando essi contengono delle impurità. Cerchiamo di dare una spiegazione di questo fatto.

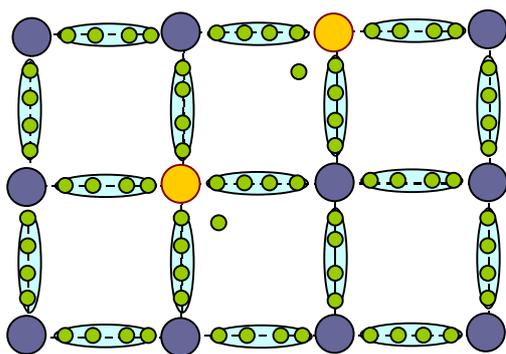
La conduzione nei semiconduttori è di due tipi: *conduzione intrinseca* (dovuta alla rottura episodica di legami covalenti per effetto termico con formazione di un elettrone libero e di un buco) e *conduzione drogata* (dovuta alla presenza di impurità nel reticolo cristallino che equivalgono alla rottura per difetto di struttura dei legami covalenti).

- Quando aumenta la temperatura si ha un aumento della probabilità di rottura di un legame covalente e pertanto diminuisce la resistenza pur in presenza di una riduzione del libero cammino medio.
- L'inserimento di impurità nel reticolo cristallino aumenta la concentrazione dei portatori liberi. Supponiamo di far diffondere in un reticolo di un elemento del IV gruppo (per esempio Silicio) degli atomi di un elemento del III gruppo, per esempio, Indio. Mentre un cristallo puro di Silicio conduce solo per la rottura episodica di legami covalenti (con creazione di un elettrone libero e di un buco), il cristallo drogato con atomi del III gruppo presenta un buco (nel legame con i circostanti atomi di Silicio) in corrispondenza di ogni atomo di Indio.

metalli		
	$\rho$ a 0° C	$\alpha$ (0° ÷ 100°C)
	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	$10^{-3} \text{K}^{-1}$
Alluminio	0.0245	4.5
Ferro	0.089	6.5
Rame	0.0156	4.3
Platino	0.0981	3.92
Rodio	0.043	4.4
Nickel	0.0614	6.8
Cromo	0.127	—
leghe		
	$\rho$ a 0° C	$\alpha$ (0° ÷ 100°C)
	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	$10^{-3} \text{K}^{-1}$
Platino-Rodio (90-10)	0.187	1.66
Nichelcromo (80-20)	1.03	1.0
Acciaio	0.12÷0.45	3.3÷1.5
Costantana	0.48	0.02



il drogaggio di tipo p con elementi del III gruppo mette a disposizione buchi per la conduzione



il drogaggio di tipo  $n$  con elementi del V gruppo mette a disposizione elettroni per la conduzione

Un tale cristallo possiede la capacità di condurre attraverso il movimento dei buchi che avviene con le modalità descritte nel capitolo 43. Per sottolineare il fatto che la conduzione, molto più energetica di quella dovuta al cristallo puro, è equivalente a quella che si avrebbe con cariche libere positive si dice che il *semiconduttore è drogato di tipo  $p$* . Analogamente si parla di *conduzione drogata di tipo  $n$*  quando si fanno diffondere elementi del V gruppo (arsenico, fosforo, antimonio). Si tenga presente che il drogaggio dei semiconduttori è in grado di farne aumentare la conducibilità sino a 5 ordini di grandezza.

Nei metalli la situazione è esattamente opposta perché, per ragioni spiegate dalla meccanica quantistica, una certa quota di elettroni è già libera e nessun aumento di temperatura, nell'ambito della permanenza allo stato solido, è in grado di far aumentare significativamente la concentrazione di elettroni di conduzione. Al contrario, per effetto delle vibrazioni del reticolo cristallino che incidono negativamente sul libero cammino medio, si ha una diminuzione di mobilità e dunque un aumento di resistività.

Lo stesso accade per la presenza di impurità che, non danno contributi significativi alla concentrazione di cariche libere, ma ne peggiorano la mobilità.

## 12.2 Emissione termoionica: diodo, tubo a raggi X, fotomoltiplicatore

### 12.2.1 L'EMISSIONE DI TERMOELETTRONI

Il vuoto è un ottimo isolante perché non possiede portatori di carica liberi. Uno spazio vuoto può essere trasformato in un conduttore se si introducono in esso cariche libere e ciò si può ottenere, per esempio, mediante la *emissione termoionica*, cioè la emissione di elettroni dalla superficie di un metallo riscaldato.

La emissione termoionica, anche se oggi costituisce un fenomeno utilizzato solo in particolari strumenti (tubo a raggi catodici, tubo a raggi X) è stato il fenomeno che ha consentito di costruire i *tubi a valvola* (diodo e triodo) che sono stati i componenti basilari per la nascita della elettronica a partire dagli anni 20–30 del 900 anche se essi sono stati gradualmente sostituiti dai componenti basati sui semiconduttori nel corso degli anni 60 del 900. La radio, la televisione, il radar, i circuiti per la registrazione delle particelle, sono stati possibili grazie ai tubi a vuoto.

Per osservare la emissione termoionica si può operare in questo modo: si fissano in un tubo di vetro in cui si è realizzato un vuoto spinto, due elettrodi: un filamento sottile che fa da catodo e un conduttore cilindrico, detto placca, che fa da anodo.

Se colleghiamo ora il tubo come nel circuito qui a fianco vedremo che ad interruttore aperto non si ha passaggio di corrente anche per d.d.p. di placca di 300 o 400 V, ma quando si chiude l'interruttore si osservano due eventi concomitanti: il filamento che fa da catodo si riscalda, il miliamperometro indica un passaggio di corrente e ciò ci porta a concludere che dal filamento incandescente sono stati emesse delle particelle cariche negativamente.

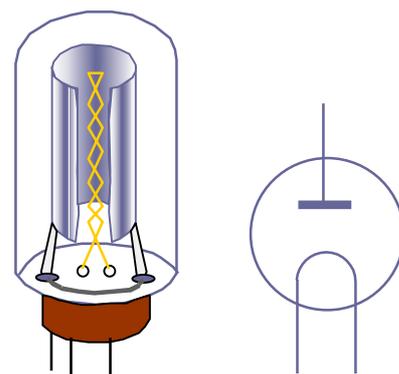
Una misura del loro rapporto carica-massa consente di affermare che si tratta di *elettroni*; data la loro origine termica vengono detti *termoelettroni*.

Il fenomeno della emissione termoionica è simile alla evaporazione di un liquido. Così come le molecole con energia superiore a quella di evaporazione abbandonano la superficie del liquido, altrettanto fanno gli elettroni con energia superiore al lavoro di estrazione dalla superficie del metallo e il loro numero cresce rapidamente al crescere della temperatura. Alla fine, così come si forma del vapore saturo alla superficie di un liquido, si crea una *nube elettronica* intorno al filamento; tale nube elettronica se viene sottoposta all'azione di un campo elettrico correttamente orientato darà luogo al passaggio di una corrente elettrica.

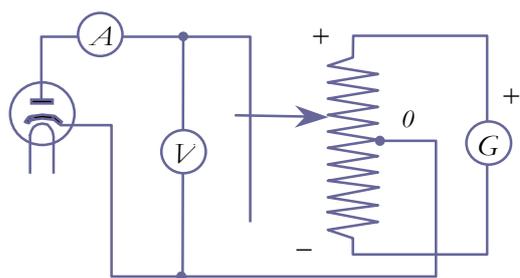
### 12.2.2 IL DIODO

Il tubo a vuoto descritto nel paragrafo precedente è chiamato *tubo elettronico a due elettrodi*, o *valvola*, o più semplicemente *diodo*.

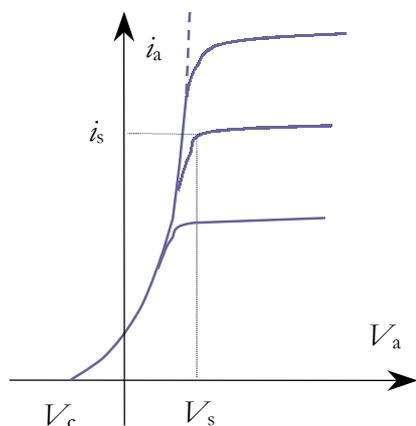
Si utilizzano diodi con catodi riscaldati sia direttamente, sia indirettamente: nel primo caso il filamento di tungsteno fa da catodo e, per ottenere una buona emissione, lo si riscalda a temperature tra 2000 e 2500 K, nel secondo caso il catodo è un piccolo tubo di nichel ricoperto da uno straterello di bario, di stronzio o di ossido di calcio.



il diodo termoionico e il suo simbolo nel quale sono rappresentati l'anodo e il catodo



circuito per evidenziare la conduzione unidirezionale del diodo



caratteristica voltamperometrica del diodo con la saturazione e la tensione di arresto

In questo caso il lavoro di estrazione è molto minore che nel caso del tungsteno e ciò consente di operare a temperature più basse il che garantisce una maggiore durata del dispositivo.

Il diodo è un dispositivo di tipo non lineare e presenta inoltre un comportamento di tipo *polare*: conduce infatti corrente solo quando l'anodo si trova ad un potenziale più alto del catodo. In caso contrario gli elettroni vengono riassorbiti dal catodo che li ha emessi e non si ha passaggio di corrente.

Per costruire la caratteristica voltamperometrica si realizza un circuito come quello in figura in cui, attraverso un potenziometro si possono realizzare tensioni anodiche sia positive sia negative. Inoltre, cambiando la d.d.p. del filamento, si possono ottenere curve caratteristiche relative a diversi valori di temperatura.

La prima cosa che si nota è una curva in cui la corrente anodica cresce molto rapidamente seguita da un ginocchio di saturazione collocato in posizioni diverse a seconda della temperatura. La saturazione è dovuta al fatto che la concentrazione di cariche nella nube elettronica diminuisce al crescere della corrente perché non è detto che il catodo riesca ad emettere elettroni con lo stesso ritmo con cui la corrente li trasporta verso l'anodo.

A partire da un valore  $V_s$ , la corrente non dipende più dalla d.d.p. ma solo dalla temperatura del catodo e il suo valore è chiamato *corrente di saturazione*  $i_s$ . Ciò si verifica perché la corrente non può comunque superare la velocità di generazione delle cariche da parte del catodo e tale valore, oltre che dalle caratteristiche chimiche e fisiche del catodo dipende esclusivamente dalla temperatura.

Se si applica all'anodo un potenziale  $V$  negativo rispetto al catodo si osserva infine che la corrente diminuisce e, in corrispondenza di un valore  $V_c$  dipendente esclusivamente dalla temperatura del filamento, essa si riduce a zero; si dice che il tubo si è interrotto. Ciò avviene quando l'energia cinetica degli elettroni è insufficiente a superare il controcampo che li respinge dalla placca. Attraverso la misura del potenziale di interruzione è possibile risalire all'energia cinetica (e alla velocità) massima con cui gli elettroni vengono emessi dal catodo.

Questa proprietà del diodo consente attraverso un collegamento opportuno di realizzare i circuiti di raddrizzamento, cioè i circuiti in cui una d.d.p. bidirezionale viene tagliata nelle sue componenti negative e trasformata in una d.d.p. unidirezionale.

### 12.2.3 IL TUBO A RAGGI X

I raggi X sono radiazioni elettromagnetiche molto energetiche analoghe alla luce che differiscono da essa esclusivamente per la frequenza di oscillazione (e conseguentemente per la energia trasportata da ogni fotone <sup>3</sup>).



<sup>3</sup> Secondo la fisica moderna la radiazione elettromagnetica presenta anche natura corpuscolare. Si chiama *fotone* la particella corrispondente. L'energia di tale particella  $\mathcal{E} = h \nu$  dove  $\nu$  è la frequenza della radiazione e  $h$  è la costante di Planck. Il fotone trasporta anche una quantità di moto  $p = \frac{h}{\lambda}$  dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda legata alla frequenza

Il tubo a raggi X è costituito da un tubo a vuoto dotato di un catodo in grado di emettere termoelettroni. Il catodo viene realizzato con una forma tale da focalizzare il fascio elettronico in una regione ristretta in modo di creare una specie di macchia elettronica sulla superficie anodica. L'anodo, realizzato in tungsteno, molibdeno, platino o altri materiali pesanti è costituito da un pezzo di uno dei materiali suddetti, collegato ad un supporto in rame massiccio deputato alla dispersione dell'intenso calore che si sviluppa durante il funzionamento.

I termoelettroni prodotti al catodo vengono accelerati e focalizzati contro l'anodo. La brusca decelerazione che subiscono nel processo d'urto determina tre tipi diversi di fenomeno:

- gli elettroni, per effetto del frenamento, emettono come qualsiasi carica soggetta a moto accelerato, della radiazione elettromagnetica secondo uno spettro di emissione continuo (cioè con frequenze che variano con continuità sino ad un valore massimo che corrisponde ad una energia pari alla energia cinetica degli elettroni). Tale radiazione è nota come *radiazione di frenamento*.
- una quota considerevole della energia degli elettroni viene dissipata in urti elastici ed anelastici nell'anodo e determina il riscaldamento dello stesso
- alcuni elettroni colpiscono elettroni degli strati elettronici interni del metallo costituente l'anodo, li spostano su orbite più esterne e il successivo processo di riassetamento produce fotoni con una energia esattamente uguale alla differenza di energia delle orbite elettroniche coinvolte. Ciò determina la comparsa, nello spettro di emissione, di picchi in corrispondenza dei salti energetici del metallo di cui è fatto l'anodo.

Lo spettro di emissione è rappresentato qui a lato; si tenga presente che il valore di  $\lambda$  minimo, o equivalentemente di  $\nu$  massimo dipende dal valore della d.d.p. di alimentazione; infatti il fotone X più duro non può avere energia superiore alla energia massima dell'elettrone accelerato dal tubo che vale  $e \Delta V$ . Se si fa variare la d.d.p. tra anodo e catodo cambia la energia dei fotoni X emessi e cambia dunque il potere di penetrazione della radiazione:

$$e \Delta V = \mathcal{E}_{\text{MAX}} = h \nu_{\text{MAX}} = h \frac{c}{\lambda_{\text{min}}}$$

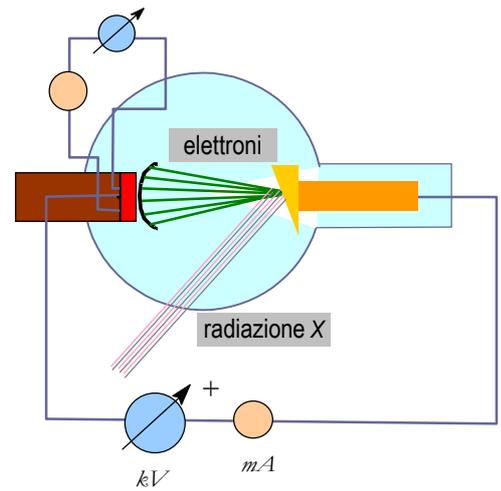
Se invece si aumenta la corrente che circola nel filamento deputato al riscaldamento del catodo, cambia il numero di elettroni termoeionici e cambia dunque la intensità della radiazione emessa. Non cambia lo spettro della radiazione, ma cambia il numero di fotoni emessi nella unità di tempo.

#### 12.2.4 IL FOTOMOLTIPLICATORE

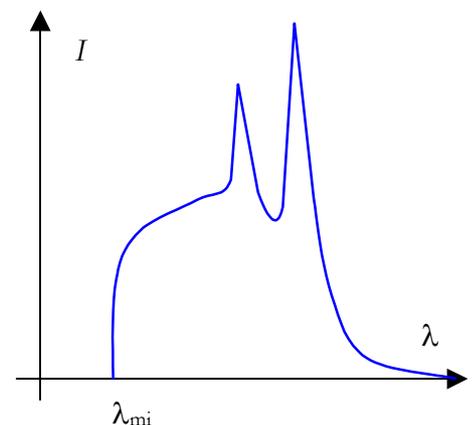
In molte esperienze fondamentali di fisica del 900 si incontra la necessità di individuare con sicurezza effetti molto piccoli quali, per esempio, l'arrivo di un singolo fotone su di una superficie.

---

dalla velocità della luce  $c = \lambda \nu$ . La energia di un fotone X è di almeno 4 ordini di grandezza superiore alla energia di un fotone di luce.



W. Roentgen scopritore dei raggi X nel 1896 e la sua prima radiografia; i raggi X sono trattati in modo ampio nella parte di fisica moderna



spettro di emissione dei raggi X con lo spettro continuo della radiazione di frenamento e le righe tipiche del metallo costituente l'anodo

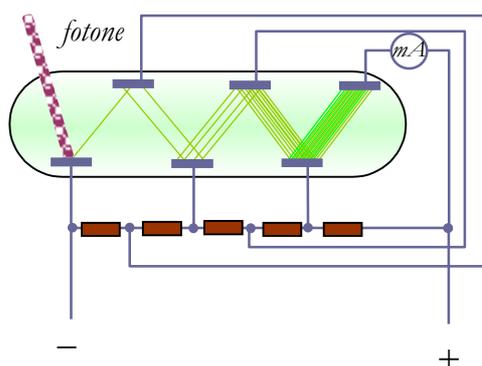
La energia luminosa trasportata da un singolo fotone è di qualche elettronvolt. Come è possibile costruire un rivelatore in grado di trasformare una energia così piccola in un fenomeno macroscopicamente osservabile? Allo scopo si utilizza la proprietà che hanno i metalli, e soprattutto i semiconduttori, di emettere elettroni secondari quando la loro superficie è colpita da un elettrone sufficientemente energetico.

Un singolo elettrone, se viene opportunamente accelerato da un campo elettrico, può raggiungere una energia cinetica sufficiente a strappare, attraverso urti successivi, un certo numero di elettroni presenti nel bersaglio.

Attraverso esperienze raffinate basate sul deposito di film metallici sottili su superfici vetrose si è visto che questo fenomeno riguarda gli strati superficiali per uno spessore di circa  $10^{-9} \div 10^{-8} \text{m}$ . Si è visto anche che i materiali che effettuano meglio la emissione secondaria sono i semiconduttori. Infatti, nei metalli, gli elettroni secondari che si dirigono verso la superficie hanno una probabilità piuttosto elevata di cedere questa loro energia al gas di elettroni e, pertanto, di rimanere prigionieri all'interno del reticolo. I semiconduttori hanno una probabilità bassa di incontrare altri elettroni liberi e dunque l'elettrone liberato dall'urto riesce più facilmente a giungere in superficie.

Per superfici metalliche dotati di strati superficiali in semiconduttore si raggiunge facilmente un fattore moltiplicativo di 10: un elettrone incidente libera 10 elettroni secondari.

A questo punto, se si dispongono in successione una serie di elettrodi opportunamente alimentati da campi elettrici si può realizzare un dispositivo (detto tubo fotomoltiplicatore) in grado di realizzare un fattore di amplificazione tra  $10^5$  e  $10^9$ . Ciò consente di produrre delle correnti elettroniche misurabili e pertanto di trasformare l'arrivo di un singolo fotone in un evento macroscopico osservabile.



il fotomoltiplicatore consente di rivelare anche un singolo fotone attraverso un meccanismo a cascata di emissione di elettroni

## 12.3 Il triodo e le sue caratteristiche

Consideriamo un diodo e *inventiamo* un metodo per controllare a piacimento la corrente di placca. Per ottenere lo scopo si inserisce un terzo elettrodo, detto *griglia* perché si tratta di una reticella metallica in grado di modificare il campo elettrico ma contemporaneamente di lasciarsi attraversare dagli elettroni. Il dispositivo si chiama *tubo elettronico a tre elettrodi*, o *valvola a tre elettrodi*, o *triodo*.

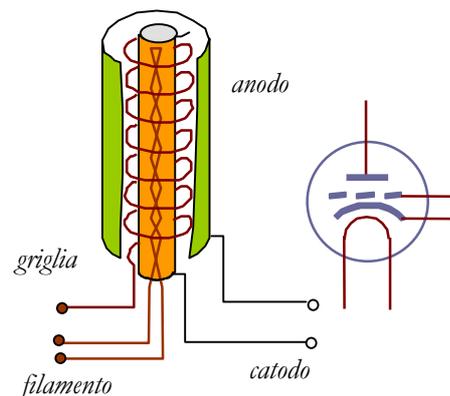
La griglia viene collegata in maniera di possedere un potenziale variabile, sia positivo, sia negativo rispetto al catodo. Ciò si ottiene attraverso un potenziometro il cui elemento centrale viene collegato al catodo che fa da punto di potenziale 0.

Supponiamo di fissare il potenziale di placca e modifichiamo gradualmente quello di griglia da valori negativi a valori positivi registrando man mano la corrente di placca. Con queste misurazioni si traccia la *caratteristica di griglia* del triodo in cui si vede la dipendenza della corrente di placca dalla tensione di griglia per un valore fissato della tensione di placca. La curva è rappresentata qui a lato e su di essa si possono fare le seguenti considerazioni.

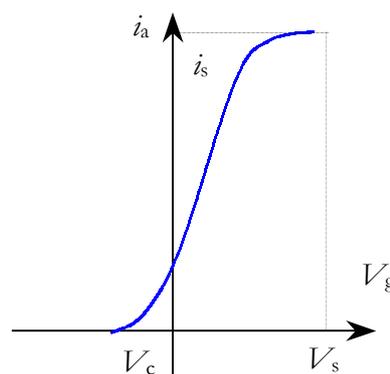
- L'andamento è di tipo non lineare e pertanto, anche in questo caso, non vale la legge di Ohm, ma in prima approssimazione, se ci si riferisce a tratti brevi si può trascurare questo elemento (questo aspetto viene sfruttato nelle applicazioni elettroniche nelle quali si sfrutta la proporzionalità tra le variazioni della tensione di griglia e quelle della corrente anodica).
- La corrente aumenta per potenziali positivi di griglia e diminuisce per potenziali negativi e ciò si spiega così. Se il potenziale di griglia è zero, la corrente  $i_0$  nel tubo è determinata solo dal potenziale di placca. Supponiamo ora di applicare un potenziale positivo alla griglia: i due campi di placca e di griglia si sommano determinando un aumento di velocità degli elettroni e la eliminazione della nube elettronica; di conseguenza la corrente aumenta sino a raggiungere il valore di saturazione.
- Per valori negativi del potenziale di griglia si osserva il processo inverso. Il campo risulta indebolito, la velocità degli elettroni diminuisce, la concentrazione della nube elettronica aumenta e, conseguentemente, diminuisce anche la corrente. Ad un certo punto, per un valore del potenziale di griglia che indicheremo con  $V_c$  e che dipende dal potenziale di placca, la energia cinetica degli elettroni diventa insufficiente a superare l'azione repulsiva della griglia e gli elettroni non riescono più a raggiungere la zona tra la griglia e la placca: il tubo si interrompe e la corrente scende a zero.

Dunque, variando il potenziale di griglia, si può variare la corrente nel tubo e si parla pertanto di *griglia di controllo*.

Se si applica alla griglia di controllo un segnale, variabile nel tempo anche molto rapidamente, data la piccola inerzia degli elettroni, questo segnale si trasforma altrettanto rapidamente in una variazione di corrente di placca. Basta, a questo punto mettere in serie al circuito anodico una opportuna resistenza e la variazione di corrente di placca si trasformerà in una d.d.p. variabile ai capi della resistenza. Poiché basta una piccola



il triodo e il suo simbolo che evidenzia il catodo, l'anodo e la griglia di controllo



tramite il triodo si può costruire un **amplificatore di segnali** perché **piccole variazioni del potenziale di griglia** possono determinare **variazioni istantanee e notevoli della corrente anodica** e tali variazioni possono divenire tramite una resistenza corrispondenti variazioni amplificate della tensione d'uscita

variazione nella corrente di griglia per ottenere una grande variazione nella corrente di placca si è realizzato un *amplificatore di segnali elettrici*.

Come si è già accennato il diodo e il triodo sono stati i dispositivi su cui è nata l'elettronica moderna e sono stati impiegati su larga scala dagli anni 30 sino agli anni 60 del 900.

- Il diodo veniva utilizzato per raddrizzare le correnti, vista la sua capacità di condurre solo per potenziali positivi di placca.
- Il triodo veniva usato, sfruttando la griglia di controllo, come amplificatore di segnali. Infatti la variazione di segnale di ingresso (applicato alla griglia) determina una variazione di corrente di placca che, attraversando una opportuna resistenza, diventa variazione amplificata del segnale di uscita. I circuiti elettronici di amplificazione erano solitamente costituiti da due o più triodi collegati a cascata.

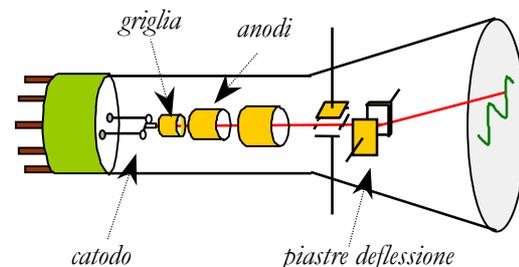
I tubi a valvola sono stati dapprima sostituiti dai corrispondenti circuiti a semiconduttore (diodo a giunzione e transistor) e quindi dai circuiti integrati. I microprocessori per i Personal computer contengono in uno spazio di alcuni millimetri quadri l'equivalente di decine di milioni di triodi.

## 12.4 Il tubo a raggi catodici, l'oscilloscopio e il monitor

### 12.4.1 LA STRUTTURA DEL TUBO A RAGGI CATODICI

Un dispositivo elettronico molto utilizzato sul piano applicativo è il *tubo a raggi catodici*. Come si vede in figura gli elettroni vengono emessi da un catodo a riscaldamento indiretto e passano attraverso una griglia (elettrodo di controllo). Questo sistema è chiamato *cannone elettronico* e serve a creare un fascio di elettroni focalizzato verso lo schermo, che è ricoperto con una sostanza fluorescente in grado di emettere luce quando viene colpita da un elettrone.

Il fascio elettronico viene focalizzato attraverso una d.d.p. negativa (tra  $-20$  e  $-70$  V) applicata alla griglia il cui campo ha l'effetto di stringere il fascio emesso dal catodo. Al primo anodo è applicato un potenziale positivo tra  $+250$  e  $+500$  V e al secondo una d.d.p. tra  $+1000$  e  $+2000$  V. Nei cinescopi, cioè nei tubi impiegati per la Tv si applicano d.d.p. ancora più alte. Variando la d.d.p. di griglia e quella anodica si influisce sulla luminosità e sulla focalizzazione del punto luminoso.



### 12.4.2 IL CONTROLLO DELLA POSIZIONE DEL PUNTO LUMINOSO

Il fascio passa quindi attraverso un sistema di elettrodi di controllo. Per esempio se si applica un potenziale positivo sulla piastra di deflessione verticale superiore, e uno negativo su quella inferiore, il punto luminoso si sposta verso l'alto. Se si inverte la polarità si inverte anche lo spostamento. Pertanto un potenziale oscillante applicato a queste piastre determina un movimento oscillatorio verticale del fascio. Allo stesso modo un potenziale oscillante applicato alle piastre di deflessione orizzontale determina un movimento oscillatorio orizzontale.

I tubi in cui la deflessione viene ottenuta variando il campo elettrico tra le piastre sono detti a *controllo elettrostatico*. Per i tubi televisivi si utilizzano anche tubi a *controllo elettromagnetico*. Questi tubi, invece degli elettrodi di controllo hanno degli avvolgimenti nel collo del tubo e il controllo avviene variando la corrente nell'avvolgimento; la variazione del vettore induzione magnetica dovuta alla variazione di corrente determina una variazione nella forza di Lorentz e quindi una deflessione variabile nel fascio elettronico.

### 12.4.3 LA RAPPRESENTAZIONE DELLE IMMAGINI E IL SINCRONISMO

Nel caso sia dell'oscilloscopio, sia del tubo televisivo esiste il problema di rappresentare immagini. Supponiamo, per esemplificare di voler rappresentare un segnale sinusoidale che cambi nel tempo con frequenza di 50 Hz. Se ci limitassimo ad applicare tale segnale alle piastre di deflessione verticale vedremmo solamente un segmento verticale la cui lunghezza è proporzionale al doppio del valore massimo del segnale (il segmento corrisponde alla traiettoria del punto luminoso percorsa 50 volte al secondo).

Per osservare la forma d'onda bisogna applicare un segnale che sposti orizzontalmente il punto luminoso in maniera proporzionale al tempo e ciò si ottiene applicando alle piastre una d.d.p. crescente con andamento lineare nel tempo. Ma quando il punto luminoso è arrivato all'estremo destro dello schermo sorge il problema di riportarlo all'estremo sinistro.

Si ottiene questo risultato applicando una brusca inversione alla d.d.p. che fa fare un salto da destra a sinistra al punto luminoso. A questo punto il processo ricomincia con un segnale che aumenta linearmente nel tempo.

Cosa vede un uomo che guardi lo schermo mentre avviene tutto questo? Bisogna intanto ricordare che i nostri occhi osservano il movimento come sequenze di immagini diverse distanziate nel tempo di  $1/10$  di secondo (persistenza delle immagini sulla retina). Pertanto se il segnale di inversione è sufficientemente rapido non si osserva il movimento da destra a sinistra. Altrettanto non si vede il punto luminoso percorrere una sinusoidale perché in  $1/10$  di secondo di sinusoidi ne vengono percorse 5. Noi percepiamo una immagine: la traccia sinusoidale del punto. Quando il punto luminoso torna indietro ci sono due possibilità. Se i segnali funzionano in sincronismo il punto luminoso si riporterà nel punto di partenza della immagine precedente ed osserveremo un segnale fisso. Se i segnali non funzionano in sincronismo osserveremo una nuova immagine spostata rispetto alla precedente.

Se tutto ciò avviene molte volte al secondo osserveremo una immagine in movimento.

Del problema del sincronismo si occupano opportuni circuiti elettronici che rendono automatico o, se lo si desidera, manuale, il processo.

#### 12.4.4 IL MONITOR PER PC: RISOLUZIONE E COLORE

La formazione delle immagini nella televisione e nei monitor dei computer avviene seguendo questo principio. Il pennello luminoso percorre molto rapidamente una serie di righe orizzontali fino a pennellare l'intero schermo. Quando ha finito si riporta nella posizione in alto a sinistra e ricomincia a disegnare una nuova immagine.

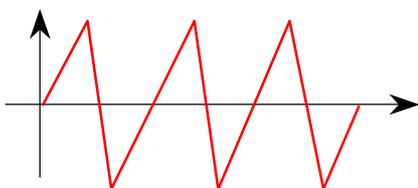
Nel caso dei monitor per computer entrano in gioco altri due problemi: la risoluzione grafica e il *refresh* dello schermo.

La risoluzione grafica dipende dal numero di punti che vengono disegnati (indirizzati sullo schermo). Si opera ormai con immagini costituite da oltre  $1000 \times 1000 = 10^6$  punti luminosi (*pixel*).

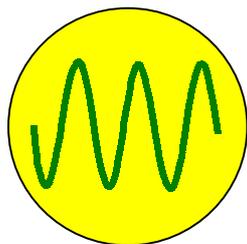
Su ciascuno di tali punti i pennelli luminosi, corrispondenti ai 3 colori base (rosso, blu e verde) devono inviare sincronicamente la informazione modulata in grado di creare fino a milioni di colori diversi. Quando il pennello ha riempito il suo milione di pixel l'immagine è formata e rimane tale per effetto della persistenza della stessa sulla retina.

Per garantire stabilità alle immagini, cioè per evitare sensazioni di sfarfallio delle immagini, che affaticano la vista queste operazioni vengono svolte ridisegnando lo schermo da 70 a 100 volte al secondo. Il movimento della immagine è dovuto alla presentazione successiva di immagini diverse.

traccia di un segnale sinusoidale applicato alle sole piastre di deflessione verticale



segnale a dente di sega applicato alle piastre di deflessione orizzontale per rappresentare l'andamento nel tempo del segnale



il risultato finale dato dalla composizione di un segnale sinusoidale in verticale con quello a dente di sega in orizzontale

## 12.5 Produzione e misura della ionizzazione nei gas

### 12.5.1 LA CONDUZIONE ESTRINSECA E QUELLA AUTO-SOSTENUTA

Quando si opera con un gas in condizioni di *conduzione estrinseca*, cioè quando la conduzione è dovuta ad un agente esterno, si osserva che la conduzione diminuisce sino a sparire del tutto quando si attenua la causa ionizzante.

- Il processo di ionizzazione inizia sempre per il distacco di un elettrone da una molecola con creazione di uno ione positivo e di un elettrone che, solitamente, aderisce ad un'altra molecola creando uno ione negativo. Molto spesso gli ioni sono poi formati da raggruppamenti di molecole e ciò costituisce una importante differenza rispetto alla conduzione nei liquidi nei quali il singolo ione corrisponde ad una singola unità ionizzata. Per questa ragione, nel caso dei gas, non valgono leggi analoghe a quelle di Faraday che stabiliscono la proporzionalità tra carica e massa trasportata.
- Ancora, nel caso della conduzione estrinseca, non vale la legge di Ohm. Si osserva infatti che, al crescere della d.d.p. la corrente aumenta (con andamento curvilineo) e ben presto si satura, cioè non cresce più al crescere della d.d.p.

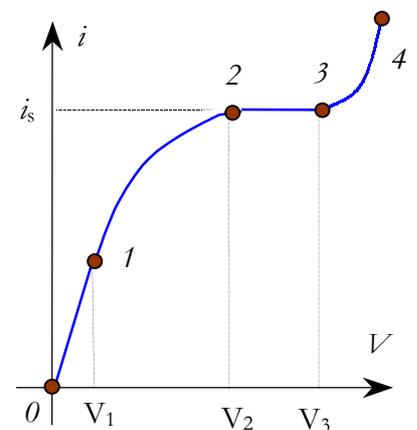
La spiegazione di questo elemento è abbastanza semplice. Al crescere della d.d.p. cresce il numero di ioni che attraversano una sezione trasversale del tubo, perché, per effetto del campo elettrico aumentato, aumenta anche la loro velocità. Ma la corrente elettrica non può comunque superare il valore consentito dalla limitazione posta dalla causa ionizzante. Se la sorgente genera  $10^9$  e/s la corrente corrispondente (tenendo conto del movimento in entrambe le direzioni) non potrà mai essere superiore a  $2 \times 10^9 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ C/s} = 3.2 \times 10^{-10} \text{ A}$ .

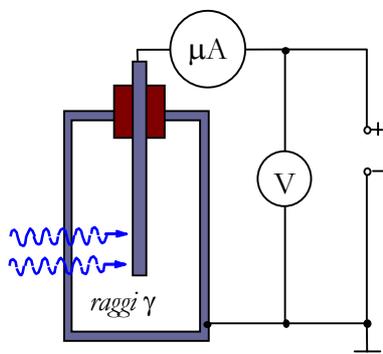
Aumentando ancora la d.d.p. si osserva che ad un certo punto la curva presenta una brusca impennata dovuta al fatto che la energia cinetica degli ioni ha ormai raggiunto valori tali da consentire la creazione di altri ioni per urto delle molecole neutre. Si è passati alla cosiddetta *scarica auto-sostenuta o conduzione intrinseca*. Il gas non ha più bisogno della azione della sorgente ionizzante che è servita ad innescare la scarica.

### 12.5.2 LA CURVA TENSIONE CORRENTE E LA CAMERA A IONIZZAZIONE

Di tutto ciò è possibile dare una trattazione quantitativa e, in particolare, dedurre da un opportuno modello la legge rappresentata in figura. Ci limitiamo in questa sede ad esporre i risultati e gli argomenti principali.

- Il passaggio di corrente elettrica in date condizioni di pressione e temperatura dipenderà esclusivamente da due fattori: l'azione di generazione di ioni ed elettroni da parte della sorgente ionizzante e la tendenza degli stessi a ricombinarsi. Entrambi questi fenomeni dipenderanno, anche se in maniera diversa, dalle caratteristiche del gas





la camera a ionizzazione misura tutte le cariche prodotte da un agente ionizzante

- Per piccoli valori di d.d.p. (campo elettrico) il numero di ioni che si dirigono verso gli elettrodi è piccolo e pertanto si può considerare che la concentrazione ionica sia costante. In queste condizioni la densità di corrente risulta proporzionale al campo elettrico, vale la legge di Ohm e la curva caratteristica ha andamento rettilineo (tratto 01 della linea).
- Man mano che aumenta la d.d.p. la intensità di corrente cresce più lentamente perché al crescere del campo elettrico diminuisce la concentrazione ionica (tratto 1-2 della curva caratteristica). Si sta andando verso la saturazione.
- Nel tratto 2-3 la corrente è così elevata che, praticamente, tutti gli ioni vengono portati via prima che abbia luogo il processo di ricombinazione. Il numero di cariche che attraversano una data sezione nell'unità di tempo è esattamente uguale a quelle generate dalla sorgente ionizzante.

Pertanto anche se il campo elettrico cresce, la corrente non può più aumentare e si raggiunge la condizione di saturazione. Questo comportamento è utilizzato nella *camera ad ionizzazione* in cui è possibile confrontare il potere ionizzante delle diverse radiazioni attraverso la misura della corrente di saturazione che esse inducono. Dalla misura del potere ionizzante si riesce poi a risalire alle caratteristiche dell'agente ionizzante.

- Dal diagramma si vede che la corrente aumenta bruscamente per d.d.p. superiori a  $V_3$  a causa di una *ionizzazione per urto nel gas*. Per ionizzare un atomo o una molecola è richiesta una ben definita quantità di energia  $\mathcal{E}_{ion}$  tipica delle caratteristiche chimiche del gas. Questa energia è di 13.6 eV per l'idrogeno, 14.5 eV per l'azoto, di 24.5 eV per l'elio, e dell'ordine di 4 o 5 eV per i metalli alcalini. Se l'energia cinetica della particella urtante è superiore alla energia di ionizzazione dell'atomo allora la molecola può essere ionizzata in caso di urto totalmente anelastico.

### 12.5.3 GLI ELETTRONI IONIZZANO MEGLIO DEGLI IONI

L'energia cinetica  $\mathcal{E}_k$  di una particella ionizzante proviene dal lavoro  $\mathcal{L}$  svolto dalle forze elettriche che agiscono sullo ione immerso nel campo elettrico:

$$\mathcal{E}_k = \mathcal{L} = F \lambda = e E \lambda$$

dove  $\left\{ \begin{array}{l} E \text{ è l'intensità del campo elettrico} \\ \lambda \text{ è il libero cammino medio dell'agente ionizzante} \end{array} \right.$

- L'elettrone e lo ione sono soggetti allo stesso campo elettrico, ma il libero cammino medio degli elettroni è molto superiore a quello degli ioni e ne consegue che sono gli elettroni a giocare il ruolo principale nella ionizzazione per urto.
- La seconda ragione per cui il ruolo principale è svolto dagli elettroni è legata al fatto che durante un urto, nel rispetto della legge di conservazione della quantità di moto, solo una parte dell'energia cinetica si può trasformare in energia interna e, in particolare, quanto minore è la massa della particella ionizzante rispetto a quella del bersaglio

tanto maggiore è la quota di energia cinetica che può essere spesa per la ionizzazione.

Infatti, se indichiamo con  $m$  e  $p$  la massa e la quantità di moto della particella ionizzante e con  $M$  la massa del bersaglio, supposto in quiete prima dell'urto anelastico, la variazione di energia interna è uguale alla perdita di energia cinetica:

$$\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_k - \mathcal{E}'_k = \frac{p^2}{2m} - \frac{p'^2}{2(m+M)} = \frac{p^2 M}{2m(m+M)} = \mathcal{E}_k \frac{M}{m+M}$$

dove  $\mathcal{E}_k = \frac{p^2}{2m}$  è l'energia della particella ionizzante.

La massa dello ione è praticamente uguale alla massa della molecola e pertanto se il proiettile è lo ione si ha  $\Delta\mathcal{E}_0 = \frac{1}{2} \mathcal{E}_k$

Invece quando il proiettile è l'elettrone, la massa della molecola è diverse migliaia di volte quella del proiettile e pertanto si ha  $\frac{M}{m+M} \approx 1$  e  $\Delta\mathcal{E}_0 \approx \mathcal{E}_k$ . Dunque a parità di energia cinetica l'elettrone ha una efficacia doppia rispetto allo ione nella ionizzazione della molecola.

Se il campo elettrico è sufficientemente elevato la ionizzazione per urto produce una *ionizzazione a valanga*. Gli elettroni secondari prodotti dalla ionizzazione per urto sono accelerati dal campo e, a loro volta, ionizzano per urto le molecole che incontrano. Come conseguenza di tale *reazione a catena* anche i pochi elettroni generati dalla ionizzazione esterna sono in grado di generare una corrente di scarica elevata.

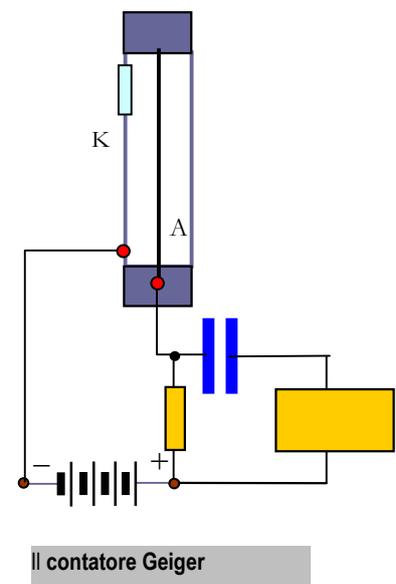
Ma questo processo non corrisponde ancora ad una scarica auto-sostenuta perché la scarica cessa, in assenza di elettroni primari, quando tutte le cariche prodotte si neutralizzano agli elettrodi. Perché la scarica si auto sostenga è necessario che anche gli ioni positivi siano in grado di liberare elettroni o per urto contro le molecole o espellendoli dal catodo. Questo risultato può essere ottenuto o aumentando l'intensità del campo elettrico o aumentando il libero cammino medio dello ione.

#### 12.5.4 IL CONTATORE GEIGER

Nella ionizzazione per urto il numero di coppie di ioni aumenta molto nettamente (da  $10^4$  a  $10^6$  volte). Pertanto se anche si genera una sola coppia di ioni (uno ione positivo e un elettrone) nel volume di gas considerato il loro numero aumenta di milioni di volte grazie alle ionizzazioni per urto. In queste condizioni si dice che la camera di ionizzazione opera con *amplificazione a gas*.

L'amplificazione a gas è applicata nel contatore di Geiger che viene usato per rivelare e conteggiare le singole particelle che si producono nei fenomeni radioattivi. Tale dispositivo, se opportunamente tarato, è in grado di contare le singole particelle.

Il contatore è costituito da un tubo di vetro sigillato contenente del gas a bassa pressione; il catodo è un cilindro metallico dalle pareti sottili collocato all'interno del cilindro di vetro. L'anodo  $A$  è un filo sottile collocato lungo l'asse del tubo. I contatori utilizzati per le particelle  $\alpha$  e per i  $\beta$  molli possiedono inoltre una finestra con un film sottile ad una estremità per consentire la penetrazione delle particelle.



Il contatore è collegato ad un circuito di registrazione e tra il catodo e l'anodo è applicata una d.d.p. positiva all'anodo. In serie al circuito è collegata una resistenza di alcuni  $M\Omega$  che trasforma il picco di corrente in un picco di potenziale e lo trasmette al circuito di conteggio attraverso un condensatore che lascia passare i picchi impulsivi.

Supponiamo che un particella entri nel tubo e che, nel suo cammino, produca una coppia di ioni. Gli elettroni, muovendosi verso l'anodo (filo sottile) attraversano un campo elettrico di intensità via via crescente; la loro velocità aumenta rapidamente ed essi producono una scarica a valanga lungo il percorso.

Quando essi raggiungono l'anodo si stabilisce una corrente circuitale e ciò produce un impulso di tensione lungo la resistenza. Questo impulso passa attraverso il condensatore e raggiunge il circuito di conteggio.

Durante la fase di conduzione la d.d.p. della batteria che, in assenza di corrente è tutta concentrata tra anodo e catodo, va a finire prevalentemente sulla resistenza. Ciò riduce il potenziale dell'anodo e conseguentemente si ha una riduzione della energia degli elettroni.

Poiché la mobilità degli ioni positivi è minore di quella degli elettroni e poiché il campo è molto più intenso all'anodo che al catodo (dato il suo carattere radiale determinato dalla forma degli elettrodi) la velocità degli ioni positivi è molto inferiore a quella degli elettroni. Ne consegue che gli ioni arrivano al catodo dopo un tempo non trascurabile, di circa  $10^{-4}$  s dall'inizio della scarica. Durante questo tempo il contatore non è in grado di registrare altre particelle in arrivo perché mentre la nube di ioni positivi riempie la camera il campo si abbassa e non si determinano altre ionizzazioni per urto. Per questa ragione il tempo  $\tau$  è anche detto *tempo morto del contatore*. Si chiama *potere risolvete* del contatore il numero di particelle che il contatore è in grado di rivelare come impulsi distinti nell'unità di tempo. Poiché due impulsi vengono visti separatamente se si seguono ad un intervallo non inferiore al tempo morto dello strumento, ne consegue che il potere risolvete di un contatore è di circa  $10^4$  impulsi al secondo.