

A differenza della conduzione nei metalli, che segue leggi semplici, la conduzione nei liquidi e nei gas è in generale un fenomeno complesso, il cui studio ha impegnato generazioni di scienziati lungo l'arco di un secolo. Questo sforzo ha portato non soltanto alla comprensione del fenomeno della conduzione, ma ha dato anche un contributo decisivo alla conoscenza della struttura della materia. Le leggi di Faraday sull'elettrolisi, per esempio, hanno costituito una brillante conferma della teoria atomica e un forte indizio a favore dell'ipotesi della natura elettrica del legame chimico; l'analisi spettroscopica della luce emessa dai gas a bassa pressione attraversati da corrente ha fornito i primi elementi per la costruzione di un modello dell'atomo; la conduzione nel vuoto, ossia nei gas estremamente rarefatti, ha portato alla scoperta della prima particella elementare: l'*elettrone*.

Quasi tutti i liquidi *puri*, come l'olio o la benzina, sono buoni *isolanti* e soltanto l'acqua, l'alcool e pochi altri presentano una certa conducibilità, sia pure molto bassa. L'acqua diventa però un buon conduttore se in essa viene disciolto, anche in minima quantità, un acido o un sale. La comune acqua non distillata, per esempio, è buona conduttrice proprio a causa dei sali che contiene in soluzione. Come sappiamo, in una soluzione sono presenti molecole dissociate in ioni positivi, e ioni negativi; è naturale allora pensare che la forte differenza di conducibilità fra l'acqua pura e l'acqua che contiene qualche sostanza in soluzione sia dovuta proprio alla presenza di questi ioni. Consideriamo allora un recipiente contenente una soluzione in cui sono immersi due conduttori solidi, di metallo o di carbone, collegati con un generatore; questo apparato è detto *cella galvanica*, o anche *voltmetro*, e i due conduttori prendono il nome di *elettrodi*. Quando stabiliamo fra gli elettrodi una differenza di potenziale, gli ioni posi-

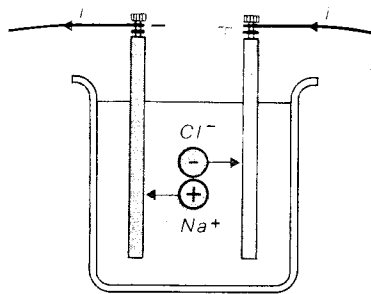
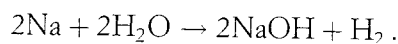
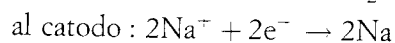
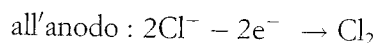


Fig. 11. In una soluzione in cui passa corrente si ha una doppia migrazione di cariche: gli ioni negativi vanno verso l'anodo, quelli positivi verso il catodo.

tivi vengono attratti dall'elettrodo negativo, detto *catodo*, e gli ioni negativi dell'elettrodo positivo, detto *anodo* (fig. 11): questo doppio flusso di particelle cariche dà origine al passaggio di corrente nella cella. Si può dire, pertanto, che, mentre nei metalli la corrente circola pressoché senza trasporto di materia, data la massa molto piccola degli elettroni di conduzione, nei liquidi, per effetto del moto degli ioni, che hanno massa migliaia di volte maggiore di quella degli elettroni, si ha corrente *con trasporto di materia*.

Il trasporto di materia non è però l'unico fenomeno che avviene in una cella galvanica. Infatti, secondo la teoria elaborata verso il 1887 dal chimico svedese Arrhenius, giunti sul catodo, gli ioni positivi ricevono da questo uno o più elettroni e si trasformano in atomi, o molecole, *neutri*; questo processo viene detto *riduzione*. Analogamente, gli ioni negativi, giunti sull'anodo, gli cedono uno o più elettroni e si trasformano a loro volta in atomi, o molecole, *neutri*; questo processo è detto *ossidazione*. Pertanto, fino a quando dura il passaggio di corrente, si verifica, in corrispondenza di entrambi gli elettrodi, formazione di atomi, o molecole, provenienti dal composto chimico in soluzione, detto *elettrolita*, oppure dall'acqua che costituisce il *solvente*. Il fenomeno, nel suo complesso, è detto *elettrolisi*.

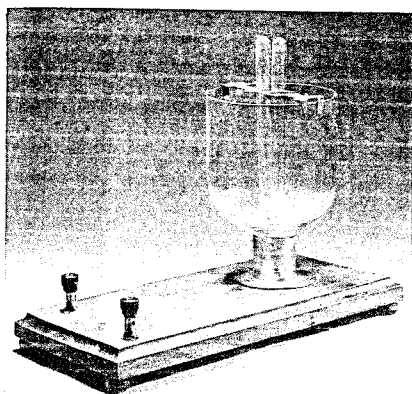
Le sostanze prodotte per elettrolisi possono, a seconda della loro natura e delle loro caratteristiche chimiche, *depositarsi* sugli elettrodi, oppure *combinarsi chimicamente* con gli elettrodi stessi o con l'acqua o ancora *liberarsi* in forma di gas che sale in superficie. Per esempio nell'elettrolisi del cloruro di sodio ( $\text{NaCl}$ ), gli ioni  $\text{Cl}^-$  formano per ossidazione gas cloro, mentre gli ioni  $\text{Na}^+$  formano per riduzione atomi metallici di Na, che sono fortemente reattivi con l'acqua; durante la reazione col sodio la molecola d'acqua si divide in due parti: un atomo di idrogeno che si libera al catodo e uno ione  $\text{OH}^-$  che si combina col sodio, dando idrossido di sodio ( $\text{NaOH}$ ), che resta in sospensione nell'acqua. In sintesi, le reazioni sono quindi le seguenti:



Le leggi dell'elettrolisi sono state stabilite sperimentalmente da Faraday fin dal 1832:

- a) la massa di una sostanza che si forma all'anodo o al catodo di una cella galvanica è proporzionale alla quantità di carica che ha attraversato la cella (1<sup>a</sup> legge di Faraday);
- b) una stessa quantità di carica, agendo su elettroliti diversi, produce masse di sostanza proporzionali alle masse atomiche o molecolari delle sostanze stesse, divise per un numero intero tipico di ciascun elettrolita (2<sup>a</sup> legge di Faraday).

Indicato con  $z$  tale numero e con  $A$  la massa atomica, o molecolare, il rapporto  $A/z$  è detto *equivalente chimico*. La seconda legge di Faraday si può pertanto enunciare più brevemente dicendo che: *per formare un numero di grammi di qualunque sostanza pari all'equivalente chimico, occorre sempre la stessa quantità di carica*. Questa quantità,



Il voltmetro di A. W. Hofmann, utilizzato per l'idrolisi, ossia la scomposizione dell'acqua, in idrogeno e ossigeno per mezzo della corrente elettrica. I due gas si raccolgono nelle due provette capovolte, immerse nella tazza contenente una soluzione diluita di acido solforico.

La quantità di carica trasportata da uno ione e misurata in unità di carica elettronica è detta valenza. Così lo ione  $\text{Ca}^{++}$  ha valenza +2, mentre lo ione  $\text{SO}_4^{-}$  ha valenza -2.

indicata con  $F$  e detta anche *costante elettrochimica di Faraday*, vale 96484 C.

Le leggi di Faraday possono allora essere riassunte dalla formula seguente:

$$m = \frac{1}{F} \frac{A}{z} i \Delta t, \quad (12)$$

ove il prodotto  $i \Delta t$  è pari alla carica che ha attraversato la cella e  $m$  è la massa di materia che si è formata al catodo nell'intervallo  $\Delta t$ .

Per spiegare la (12) supponiamo che ogni ione porti un numero di cariche elementari (positive o negative) pari a  $z$ , ossia una carica totale pari a  $z \cdot e$ , ove  $e$  è la carica elementare, espressa in coulomb. Se  $n$  è il numero di ioni che in un certo intervallo di tempo hanno attraversato la cella, la quantità totale di carica da essi trasportata è  $q = nze$  e quindi il loro numero è  $n = q/ze$ ; allora, se  $m_i$  è la massa di uno ione espressa in grammi, la massa totale trasportata agli elettrodi nello stesso tempo è data da  $m_i n = m_i q/ze$ . Indicata poi con  $A$  la massa in grammi di una mole, quantità di materia che per definizione contiene  $N_A$  molecole (dove  $N_A$  è il numero di Avogadro), risulta  $m_i = A/N_A$ . Si ha dunque:

$$m = m_i n = \frac{m_i q}{ze} = \frac{1}{N_A e} \frac{A}{z} q,$$

ossia, posto  $q = i \Delta t$ :

$$m = \frac{1}{N_A e} \frac{A}{z} i \Delta t. \quad (13)$$

Dal confronto fra la (12) e la (13) si ricava la relazione

$$F = N_A \cdot e \quad (14)$$

la costante di Faraday è eguale al prodotto di due costanti fondamentali, ossia il numero di Avogadro e la carica elementare. Quando Perrin, nel 1908, misurò il numero di Avogadro, fu possibile attraverso la (14) ottenere il valore di  $e$ , valore che fu pienamente confermato qualche anno più tardi dalle misure *dirette* di Millikan che abbiamo descritto nel capitolo 10.3. Questo accordo costituì il maggior successo della teoria dell'elettrolisi e, più in generale, di tutta la teoria atomica.

### 10.4.1 La corrente nei gas e nel vuoto

I gas, come i liquidi, sono ottimi isolanti allo stato puro. Anche nei gas, tuttavia, possono essere presenti molecole ionizzate per l'azione di particolari agenti naturali, come i raggi ultravioletti provenienti dal Sole, i raggi  $\gamma$  prodotti dalla radioattività delle rocce e i raggi cosmici; grazie a questi ioni i gas diventano debolmente conduttori, come dimostra il fatto che anche gli elettroscopi meglio isolati a poco a poco perdono la carica. Inoltre, la conducibilità dei gas può assumere valori elevati in presenza di agenti ionizzanti particolarmente intensi, come fiamme, scariche elettriche, ecc. Il passaggio della corrente in un gas assume aspetti molto differenti a seconda della differenza di

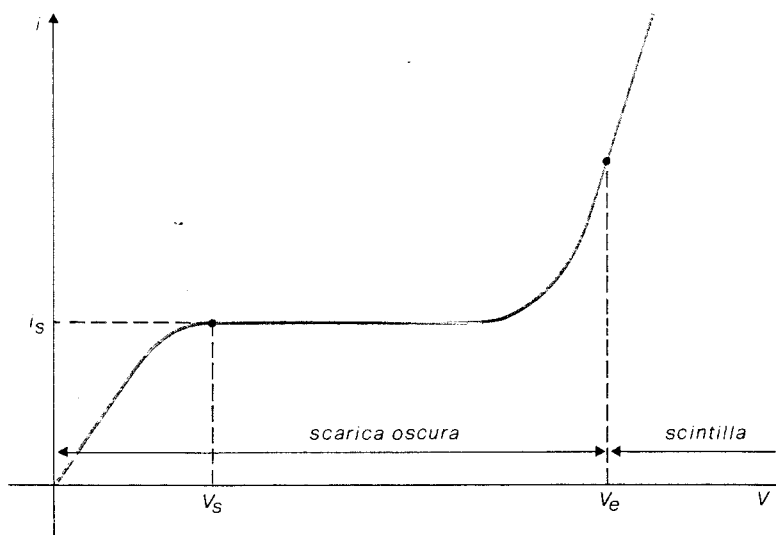


Fig. 12. Andamento della corrente nei gas in funzione della d.d.p. applicata agli elettrodi.

potenziale applicata e della pressione del gas. Se fra due elettrodi immersi in un gas che si trova in condizioni normali di pressione e di temperatura, viene applicata una certa differenza di potenziale  $V$ , ha inizio una doppia migrazione di ioni positivi verso il catodo e di elettroni liberi verso l'anodo; in altre parole, si verifica all'interno del gas un fenomeno del tutto analogo a quello della conduzione nei liquidi. In queste condizioni, almeno per valori di  $V$  abbastanza bassi, la corrente è proporzionale alla differenza di potenziale, ossia il gas si comporta come un conduttore ohmico; poiché il numero di portatori di carica è molto piccolo (qualche migliaio di ioni per  $\text{cm}^3$  contro i circa  $10^{22}$  elettroni dei conduttori metallici) la corrente è minima e può essere misurata soltanto con strumenti molto sensibili.

Se si aumenta gradualmente  $V$ , l'intensità di corrente cresce sempre meno rapidamente fino a quando, al di sopra di un certo valore  $V_s$ , detto *potenziale di saturazione* (fig. 12), la corrente non aumenta più e si stabilizza sul valore  $i_s$ , detto *corrente di saturazione*. Il fenomeno si spiega ammettendo che al di sopra del potenziale di saturazione, il numero degli ioni messi in moto dal campo elettrico sia uguale al numero di ioni prodotti dagli agenti naturali; se la ionizzazione del gas viene incrementata artificialmente i valori della corrente e della tensione di saturazione aumentano.

In questa fase, alla conduzione elettrica non si accompagna di solito alcun fenomeno luminoso o acustico; si parla allora di *scarica oscura* o anche *scarica silenziosa*. Se un elettrodo è appuntito si osserva il fenomeno, che abbiamo già studiato, del *vento elettrico*; si parla allora anche di *scarica ad effluvio*.

Se continuiamo ad aumentare  $V$ , per valori abbastanza elevati rispetto a  $V_s$  la corrente ricomincia ad aumentare e compaiono i primi fenomeni luminosi; si ha la cosiddetta *scarica alla Townsend*.

Al di sopra di un particolare valore del potenziale  $V_e$ , detto *potenziale esplosivo*, la scarica alla Townsend si trasforma in *scarica a scintilla*, accompagnata da intensi fenomeni luminosi e acustici. Nell'aria la scintilla ha l'aspetto di una linea luminosa, di colore bianco-violetto, talvolta ramificata; il più noto esempio è dato dal fulmine, fenomeno

Durante i temporali, l'accumulo di cariche elettriche sulle nubi e sul suolo può dare origine a campi elettrici dell'ordine di  $10^5$  V/m; si verifica allora una scarica elettrica fra nube e suolo (o fra nube e nube) che, seguendo un percorso di minor resistenza elettrica, dell'ordine dei chilometri, annulla differenze di potenziale dell'ordine di  $10^8$  V con correnti di  $10^4$  A. Mediante un'apparecchiatura fotografica speciale, detta camera di Boys, si è potuto accertare che la scarica è costituita in realtà da un rapidissima successione di scariche, di durata attorno ai  $50 \mu\text{s}$ , che all'occhio appaiono come un unico fenomeno luminoso. A causa dell'energia termica sviluppata ( $10^9$  cal) e dell'alta temperatura raggiunta ( $15.000^\circ\text{C}$ ), lo scoppio di un fulmine può essere accompagnato da effetti devastanti; nelle piante, ad esempio, poiché la linfa è conduttrice a causa dei sali di ferro in essa contenuti, la scarica si propaga attraverso i vasi legnosi, provocando la carbonizzazione dei tessuti per effetto dell'evaporazione pressoché istantanea dei liquidi dovuta al calore; il grande aumento della pressione interna che a ciò si accompagna, produce una brusca espansione della struttura, sufficiente a spaccare il fusto della pianta.

di grandi proporzioni, caratterizzato da differenze di potenziale di centinaia di milioni di volt e correnti di migliaia di ampere.

La scarica a scintilla ha carattere intermittente, in quanto il passaggio della carica tende a ridurre la differenza di potenziale fra gli elettrodi e pertanto una nuova scintilla può formarsi soltanto se tale potenziale risale al di sopra di  $V_0$ . Tuttavia la carica può assumere un andamento *continuo* se il catodo emette una notevole quantità di elettroni; ciò può avvenire quando il catodo stesso è sottoposto a un intenso bombardamento di ioni positivi o quando viene mantenuto ad alta temperatura. In queste condizioni si ha la cosiddetta *scarica ad arco*, caratterizzata da un'intensa emissione di luce e di calore e da valori molto elevati della corrente.

Il fenomeno della scintilla si spiega ammettendo che per valori abbastanza alti del campo elettrico, gli ioni presenti naturalmente nel gas, detti anche *ioni primari*, acquistano energia cinetica sufficiente a ionizzare altre molecole del gas stesso; questi *ioni secondari*, prodotti per urto, costituiscono non soltanto nuovi portatori di carica, ma anche nuovi agenti ionizzanti, in quanto possono a loro volta, ionizzare per urto altre molecole; tale fenomeno è noto come *ionizzazione a valanga*. Per un dato gas a pressione ordinaria, il valore del potenziale esplosivo dipende essenzialmente dalla forma degli elettrodi ed è proporzionale alla loro distanza; in aria secca e con elettrodi *piani* vale circa  $3 \cdot 10^4$  V per ogni centimetro di distanza fra gli elettrodi.

Per realizzare una scarica ad arco si possono utilizzare due sbarrette di carbone, collegate ai poli di un generatore di corrente di potenza elevata. Inizialmente le sbarrette vengono poste a contatto fra loro, in modo che in esse circoli una corrente di grande intensità, che le riscalda fortemente per effetto Joule. Le sbarrette vengono poi allontanate di pochi millimetri e la loro elevata temperatura provoca l'emissione di elettroni da parte della sbarretta negativa e la formazione dell'arco.

Durante la scarica, il catodo si consuma, assumendo forma appuntita, mentre l'anodo assume una caratteristica forma a cratere.

La temperatura dell'anodo può raggiungere i 4000 °C, mentre una corrente di decine di ampere può venire mantenuta con differenze di potenziale di solo 40-50 V. Nelle applicazioni pratiche l'arco viene largamente utilizzato nella saldatura dei metalli e nella fusione delle sostanze refrattarie.

Per studiare come varia la scarica elettrica al variare della pressione del gas, si immette il gas in un tubo contenente gli elettrodi e collegato con una pompa a vuoto capace di raggiungere pressioni dell'ordine di  $10^{-3}$  tor; quindi si applica agli elettrodi una tensione pari al potenziale esplosivo e si comincia a svuotare il tubo.

Al variare della pressione, variano fortemente la differenza di potenziale necessaria a mantenere la scarica, la quantità di corrente che attraversa il tubo e le caratteristiche della scarica stessa; in particolare si osserva che il potenziale esplosivo diminuisce proporzionalmente alla pressione e che la corrente, inizialmente piuttosto intensa, scende gradualmente a valori molto bassi. Infatti al diminuire della pressione, il gas diventa più rarefatto e quindi diminuisce il numero degli ioni che trasportano la carica da un elettrodo all'altro.

A mano a mano che la pressione diminuisce, la scarica diventa sempre meno rumorosa e si espande sempre di più all'interno del tubo

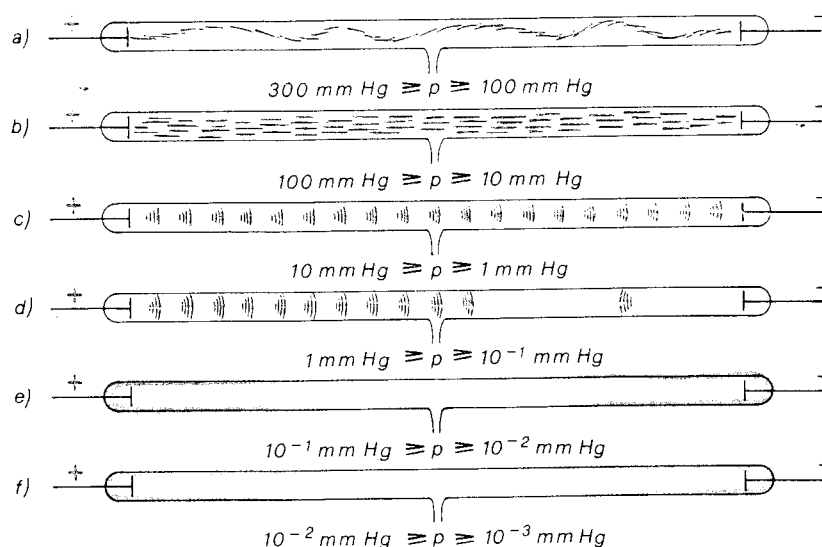


Fig. 13. Aspetti differenti della scarica nei gas rarefatti al diminuire della pressione.

(fig. 13); a pressioni comprese fra 100 e 10 tor la scarica assume la forma di una colonna luminosa e silenziosa che occupa tutto lo spazio fra gli elettrodi, detta *colonna positiva* o scarica a bagliore.

Il colore della scarica a bagliore dipende dal tipo di gas presente nel tubo. A pressioni via via più basse, la colonna positiva appare interrotta da uno o più spazi oscuri, che si allargano sempre di più, mentre intorno al catodo si forma una seconda colonna, detta *luce negativa*.

Infine, per pressioni intorno a  $10^{-3}$  tor, ogni luminosità all'interno del tubo scompare, mentre le pareti del tubo poste di fronte al catodo assumono una tipica colorazione verde fluorescente e la resistività del tubo sale a valori molto elevati. A tale pressione il gas è così rarefatto che la maggior parte degli elettroni provenienti dal catodo attraversa il tubo in tutta la sua lunghezza *senza subire urti contro le molecole del gas*; si parla allora di *conduzione nel vuoto*.

I fasci di elettroni che così si producono sono detti *raggi catodici* e il tubo prende il nome di *tubo a raggi catodici*.

La conduzione nel vuoto è caratterizzata dal fatto che i portatori di carica non perdono energia lungo il cammino, come succede invece in tutte le altre forme di conduzione. Pertanto l'energia cinetica finale di un elettrone è pari al lavoro compiuto su di esso dalle forze del campo elettrico; tale lavoro è dato dal prodotto  $e \cdot V$ , ove, come al solito,  $e$  indica la carica dell'elettrone e  $V$  è la differenza di potenziale fra gli elettrodi.

Questa semplice relazione fra il potenziale applicato e l'energia dei raggi catodici suggerisce l'introduzione di una nuova unità di misura dell'energia: l'*elettronvolt*, abbreviato eV, definito come energia acquistata da un elettrone accelerato dalla differenza di potenziale di un volt. Poiché, come sappiamo,

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

e inoltre, per definizione, si ha:

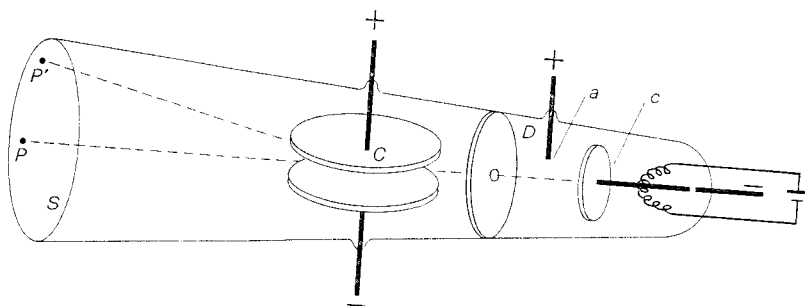
$$1 \text{ J} = 1 \text{ C} \cdot 1 \text{ V},$$

il rapporto fra elettronvolt e joule è dato da:

$$1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

Tale unità è molto usata in fisica nucleare. Lo studio sperimentale dei raggi catodici fu condotto negli anni che vanno dal 1880 al 1896 da molti fisici sperimentali, fra i quali Crookes, Perrin e J.J. Thomson. Per studiare i raggi catodici, Crookes ricoprì il catodo di materiale fluorescente che, colpito dai raggi catodici, emette una luce molto più intensa di quella emessa dal semplice vetro. Egli poté così verificare che, se l'anodo è costituito da un dischetto metallico forato, sullo schermo fluorescente si forma una piccola macchia luminosa in corrispondenza del foro; chiudendo il fo-  
rellino la macchia scompare (fig. 14). In una seconda esperienza, Crookes usò come anodo una croce metallica e ottenne sullo schermo l'ombra nitida della croce. Questi esperimenti dimostrarono che i raggi catodici si propagano in linea retta.

Fig. 14. Schema di tubo a raggi catodici. Gli elettroni emessi per effetto termoelettronico dal catodo  $c$  riscaldato dal filamento, vengono accelerati verso l'anodo  $a$ , passano attraverso il foro praticato nel dischetto  $D$  e giungono sullo schermo  $S$  nel punto  $P$ . Se le armature del condensatore  $C$  sono cariche, gli elettroni vengono deviati verso l'armatura positiva e giungono in un punto  $P'$ , diverso da  $P$ . La distanza di  $P'$  da  $P$  è tanto maggiore quanto più grande è la d.d.p. applicata alle armature di  $C$ . (L'emissione di elettroni da parte di un metallo riscaldato, detta effetto termoelettronico, sarà studiata alle pagine 87/89).



L'esperimento che mostrò in modo definitivo la natura dei raggi catodici fu realizzato da Thomson nel 1896. Questo esperimento, che sarà descritto nel paragrafo A12, permise di calcolare il rapporto fra la massa e la carica delle particelle che costituiscono i raggi catodici e mostrò che tale rapporto è sempre lo stesso, qualunque sia la natura del gas residuo presente nel tubo. A queste particelle fu dato il nome di elettroni. Ricordiamo, infine, che i raggi catodici non sono l'unica manifestazione della conduzione nel vuoto. Il fisico tedesco Goldstein ebbe l'idea di usare un catodo forato e di ricoprire di materiale fluorescente la parte del tubo posta dietro al catodo; egli poté così osservare i raggi anodici positivi, che si muovono in senso opposto ai raggi catodici e che egli stesso chiamò raggi canale. L'esperimento di Thomson applicato ai raggi anodici permise di misurare il rapporto  $e/m$  e mostrò che tale rapporto dipende dalla natura del gas residuo presente nel tubo, a differenza di quanto si osserva per i raggi catodici. Attraverso questa misura si giunse a stabilire che i raggi anodici sono costituiti da ioni positivi del gas contenuto nel tubo. Nel punto in cui i raggi catodici colpiscono il vetro del tubo, oltre alla luce fluorescente, si sprigiona una radiazione invisibile, che è in grado di attraversare i corpi e di impressionare le lastre fotografiche; questa importante scoperta fu compiuta dal tedesco Röntgen nel

Il metodo introdotto da Thomson per la misura del rapporto  $e/m$  troverà larga applicazione nei primi esperimenti di fisica nucleare, come vedremo nel tema 15.

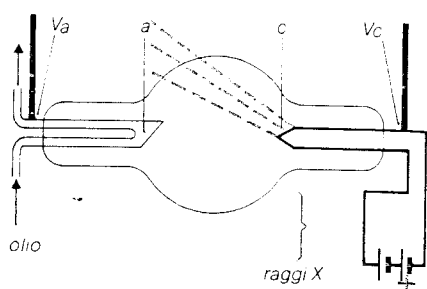
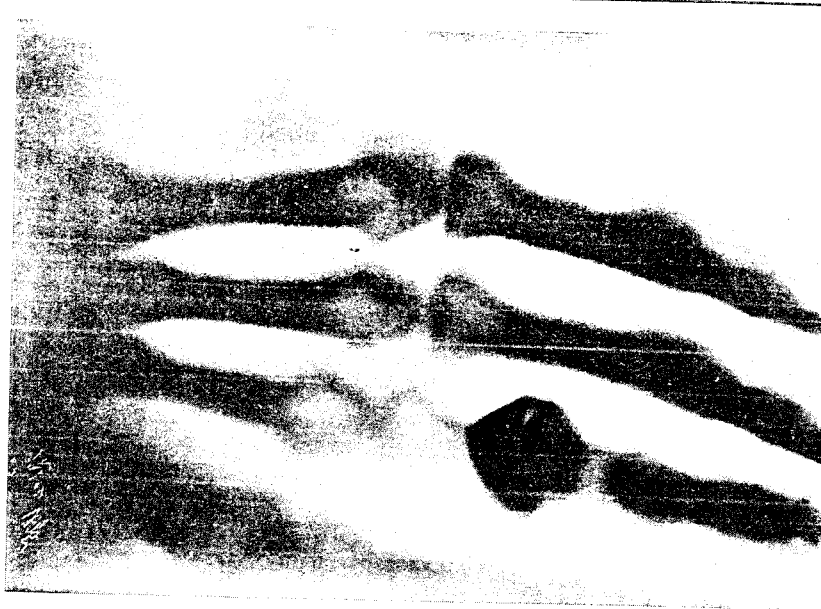


Fig. 15. Un tubo a raggi X. Gli elettroni provenienti dal catodo *c* ed accelerati da una d.d.p. dell'ordine di 150000 V giungono sull'anticatodo *a*, che emette i raggi X. L'anticatodo è raffreddato da una circolazione d'olio.

La prima fotografia ai raggi X: la mano della moglie di Röntgen.



1895, il quale, ponendo la mano della moglie fra il tubo e una lastra fotografica realizzò la prima *radiografia*.

I raggi scoperti da Röntgen, a differenza dei raggi catodici e anodici, non erano deviati né da campi elettrici, né da campi magnetici e la loro origine rimase per parecchi anni un mistero; per questa ragione furono detti raggi X.

Soltanto nel 1912 gli esperimenti di von Laue e dei Bragg mostrarono che i raggi X sono onde aventi la stessa natura della luce, ma con lunghezza d'onda molto più breve (da  $10^{-8}$  m a  $10^{-12}$  m).

### 1045 Termoelettricità e fotoelettricità

In più occasioni abbiamo paragonato gli elettroni liberi che si trovano all'interno dei metalli a un *gas*: il moto degli elettroni, in assenza di un campo elettrico applicato, si riduce in sostanza ad un moto disordinato di agitazione termica.

Consideriamo allora un conduttore. Se tutti i suoi punti sono alla stessa temperatura, la velocità media degli elettroni sarà eguale ovunque e la loro distribuzione all'interno del metallo risulterà *uniforme*. Se invece una regione, che chiameremo *A*, si trova a temperatura maggiore rispetto ad un'altra, che chiameremo *B*, la velocità media degli elettroni sarà maggiore in *A* che in *B*; ciò significa che gli elettroni, nel loro moto continuo di agitazione, si allontaneranno più rapidamente da *A* che da *B* e quindi *A* risulterà in media più povera di elettroni rispetto a *B*. Ciò comporta che *in un conduttore non isoterma i vari punti non si trovano tutti allo stesso potenziale*: il potenziale è maggiore là dove la temperatura è maggiore, ossia dove la densità degli elettroni è minore. Tale fenomeno è noto come *effetto Thomson*.

Come abbiamo visto, non è possibile sfruttare l'effetto Volta per produrre una corrente in una catena chiusa di metalli differenti tutti alla stessa temperatura. Se, per esempio, prendiamo due sbarrette metalliche differenti e formiamo con esse un circuito chiuso, come in figura 16, il numero di elettroni che passa attraverso ciascuna delle due saldature è eguale, e poiché attraverso una saldatura gli elettroni si



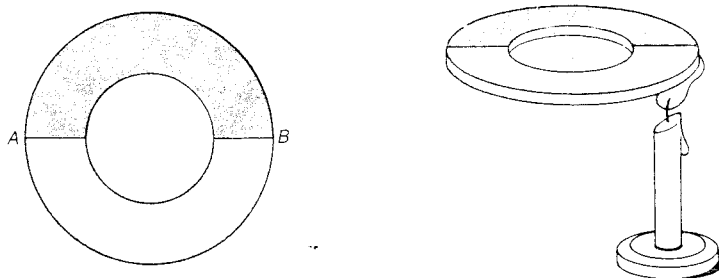


Fig. 16. Schema per la spiegazione dell'effetto Seebeck.

muovono in senso orario rispetto al circuito e nell'altra in senso antiorario, la corrente totale è nulla.

Se però le due saldature sono mantenute a temperature differenti, l'effetto Volta sarà maggiore in corrispondenza della saldatura più calda, in quanto l'energia cinetica media degli elettroni è maggiore e quindi un numero più grande di elettroni è in grado di compiere il salto da un metallo all'altro. Di conseguenza la corrente totale è diversa da zero e la coppia metallica, o *termocoppia*, si comporta come un generatore di corrente. Questo fenomeno è noto come *effetto termoelettrico*, o *effetto Seebeck*. Esso trova applicazione nella misura della temperatura, in quanto la corrente termoelettrica cresce al crescere della differenza di temperatura fra le due saldature.

Se riuniamo in serie più termocoppie (formate di solito da antimonio e bismuto), otteniamo la cosiddetta *pila termoelettrica* (fig. 17), che trova utilizzazione in campo scientifico nella misura dell'intensità del calore raggiante.

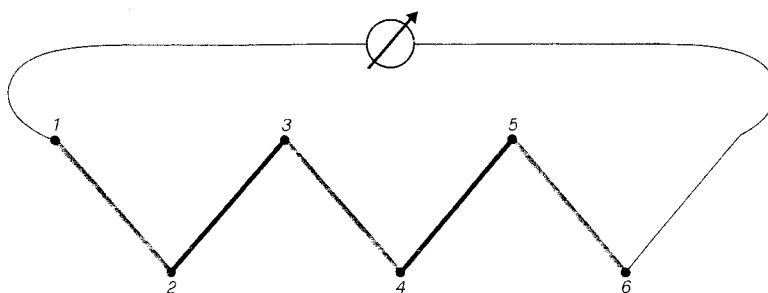


Fig. 17. Schema di pila termoelettrica, formata da più termocoppie poste in serie. Tutte le saldature di posto pari si trovano ad una temperatura più elevata di tutte le saldature di posto dispari.

L'effetto termoelettrico è *reversibile*, ossia facendo circolare corrente attraverso un conduttore bimetallico, una delle due saldature si riscalda, mentre l'altra si raffredda (tale riscaldamento non va naturalmente confuso con l'effetto Joule). Questo fenomeno, noto come *effetto Peltier*, dal nome dello scienziato francese che lo scoprì nel 1834, è una conseguenza dell'effetto Volta. Infatti la differenza di potenziale fra i due metalli ostacola il passaggio degli elettroni di conduzione in corrispondenza di una saldatura e lo favorisce in corrispondenza dell'altra saldatura; la prima saldatura, pertanto, si comporta come una resistenza e, assorbendo energia dagli elettroni, si riscalda, la seconda, invece, cede energia agli elettroni, e quindi si raffredda.

Sulla base della teoria cinetica dovremmo attenderci che, a temperature abbastanza elevate, l'energia cinetica degli elettroni di conduzione sia abbastanza intensa da proiettare gli elettroni stessi fuori dal

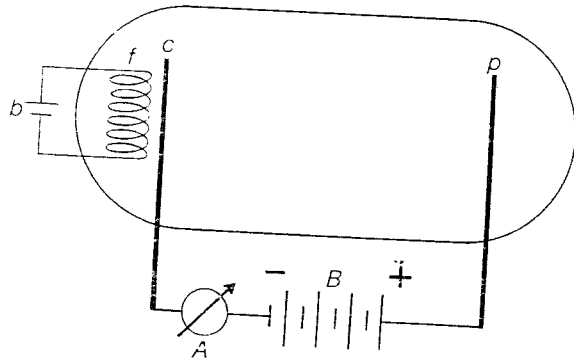


Fig. 18. Schema di diodo. Sono mostrati il filamento  $f$ , il catodo  $c$ , la placca  $p$ , la batteria per l'alimentazione del filamento  $b$  e la batteria anodica  $B$ , il milliamperometro  $A$ .

metallo. La verifica sperimentale di questo fenomeno, noto come *effetto termoelettronico*, e scoperto da Edison nel 1883, si realizza con un dispositivo detto *diodo*, schematizzato nella figura 18. Un tubo di vetro in cui viene praticato un vuoto molto spinto ( $\sim 10^{-6}$  tor) contiene un filamento e due piastrine metalliche: catodo e placca. Il filamento, reso incandescente dal passaggio della corrente prodotta da una batteria, riscalda il catodo, che emette elettroni. Una seconda batteria, detta batteria anodica, mantiene una d.d.p. fra catodo e placca. Il catodo è collegato al polo negativo, la placca a quello positivo; gli elettroni emessi dal catodo attraversano il tubo senza incontrare ostacoli e vengono raccolti dalla placca. Un milliamperometro misura l'intensità della corrente nel circuito catodo-placca-batteria anodica, detta *corrente di placca*. Mantenendo costante la temperatura del filamento e aumentando la d.d.p. placca-filamento, la corrente aumenta ma senza seguire la legge di Ohm, in quanto perviene rapidamente ad un valore massimo, detto *di saturazione*, raggiunto il quale cessa di crescere (fig. 19). Si giunge alla saturazione quando tutti gli elettroni, emessi a quella temperatura, sono assorbiti dalla placca. Si verifica a questo punto un nuovo aumento della corrente, solo se si fa crescere la temperatura del filamento. La variazione della corrente di saturazione al variare della temperatura  $T$  segue la *legge di Richardson*:

$$i_{sat} = b T^2 \cdot e^{W/kT}, \tag{15}$$

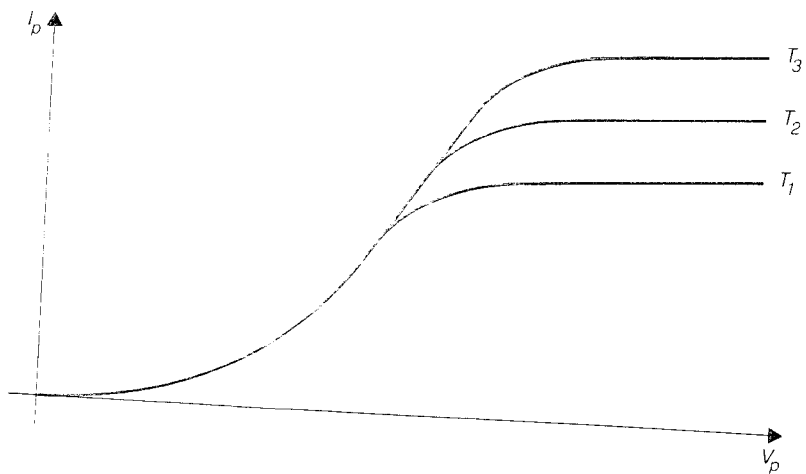


Fig. 19. La curva caratteristica del diodo a tre diverse temperature ( $T_3 > T_2 > T_1$ ).

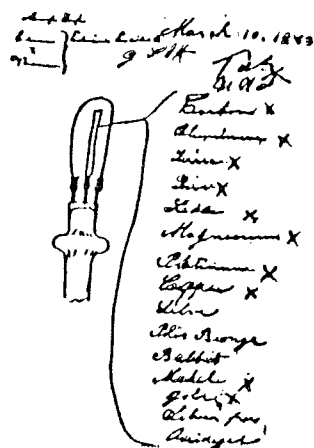
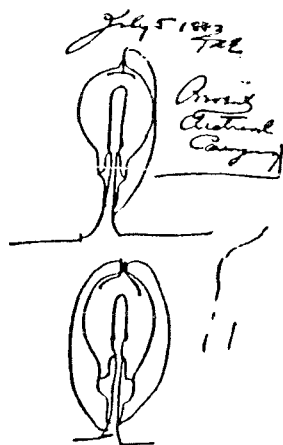
nella quale  $h$  è una costante di proporzionalità,  $k$  è la costante di Boltzmann,  $e$  è la base dei logaritmi naturali e  $W$  è il lavoro di estrazione di un elettrone.

Un fenomeno simile all'effetto termoelettronico è l'effetto fotoelettronico (o fotoelettrico), scoperto da Hertz nel 1887. Nell'effetto fotoelettrico si ha estrazione di elettroni da un metallo come nell'effetto termoelettronico, con la differenza che l'energia di estrazione viene fornita non dal calore, ma dalla luce o dai raggi ultravioletti.

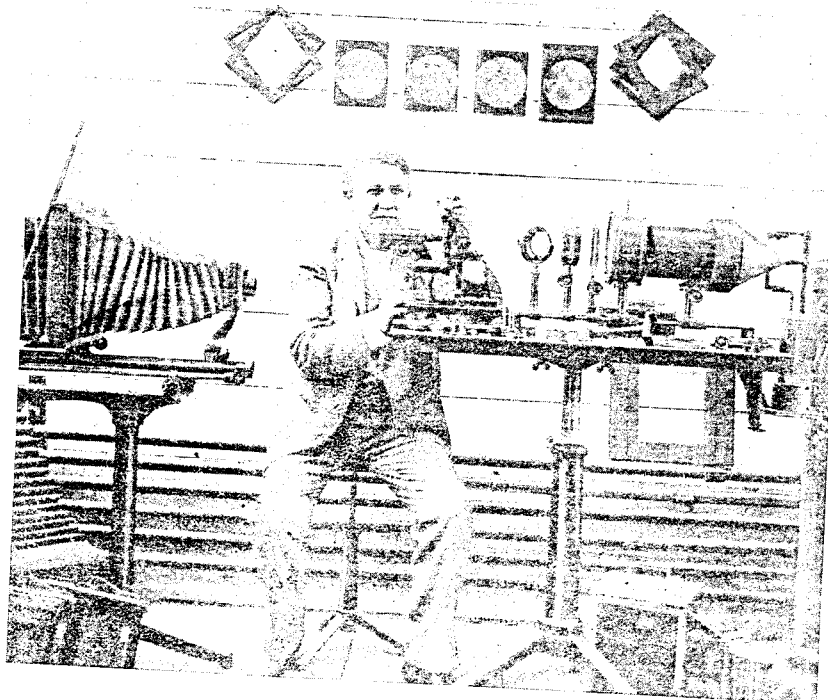
Per studiare sperimentalmente l'effetto fotoelettrico si può usare una piastrina di zinco lucidato e perfettamente pulito, collegata con un elettroscopio. Dopo aver elettrizzato il sistema piastrina + elettroscopio, si invia sulla piastrina stessa la luce proveniente da una sorgente ricca di raggi ultravioletti (come per esempio un tubo di quarzo contenente vapori di mercurio a bassa pressione eccitati per mezzo di una scarica elettrica). Si osserva allora che se la piastrina è elettrizzata negativamente, l'elettroscopio si scarica in breve tempo, segno che l'energia luminosa incidente facilita l'emissione di elettroni da parte dello zinco; se invece, la piastrina è elettrizzata positivamente, gli elettroni sono trattiene dalle cariche positive, l'emissione non ha luogo e l'elettroscopio resta carico.

Si può anche verificare che l'emissione fotoelettrica è dovuta soprattutto alla componente ultravioletta della luce emessa dalla lampada; se infatti la lampada viene schermata con una lastra di vetro, che non è trasparente agli ultravioletti, l'elettroscopio non si scarica.

La spiegazione delle leggi quantitative che regolano l'effetto fotoelettrico non può essere ricavata dalle leggi della fisica classica. Come vedremo nel tema 14, fu proprio dalla esigenza di spiegare adeguatamente il fenomeno che sorse, all'inizio del nostro secolo, l'ipotesi dei fotoni o quanti di luce, la quale sarebbe confluita, a sua volta, in una più vasta teoria dei fenomeni microscopici, nota come meccanica quantistica.



Disegni di Edison riguardanti il diodo.



Thomas Alva Edison (1847-1931), inventore statunitense nel suo laboratorio.