

Progetto Manuzio



Orso Mario Corbino

**Nozioni di Fisica
per le scuole secondarie**

Vol. II

**Calore - Ottica - Elettrostatica e Magnetismo -
Corrente elettrica - Elettrotecnica**



www.liberliber.it

Questo e-book è stato realizzato anche grazie al sostegno di:

E-text

Editoria, Web design, Multimedia

<http://www.e-text.it/>

QUESTO E-BOOK:

TITOLO: Nozioni di Fisica per le scuole secondarie
Vol. II Calore - Ottica - Elettrostatica e Magnetismo - Corrente
elettrica - Elettrotecnica
AUTORE: Corbino, Orso Mario
TRADUTTORE:
CURATORE:
NOTE:

DIRITTI D'AUTORE: no

LICENZA: questo testo è distribuito con la licenza
specificata al seguente indirizzo Internet:
<http://www.liberliber.it/biblioteca/licenze/>

TRATTO DA: Nozioni di fisica : per le scuole secondarie / O. M. Corbino. - 2 v.
Volume 2. : Calore, Ottica, Elettrostatica e Magnetismo, Corrente
elettrica, Elettrotecnica. - Milano, Palermo, Napoli : Remo Sandron,
<19..>. - 272 p. : ill. ; 22 cm.

CODICE ISBN: informazione non disponibile

1a EDIZIONE ELETTRONICA DEL: 19 febbraio 2009

INDICE DI AFFIDABILITA': 1
0: affidabilità bassa
1: affidabilità media
2: affidabilità buona
3: affidabilità ottima

ALLA EDIZIONE ELETTRONICA HANNO CONTRIBUITO:
Gianluigi Trivia, gianluigitrivia@yahoo.it

REVISIONE:
Ruggero Volpes, r.volpes@alice.it

PUBBLICAZIONE:
Catia Righi, catia_righi@tin.it

Informazioni sul "progetto Manuzio"

Il "progetto Manuzio" è una iniziativa dell'associazione culturale Liber Liber. Aperto a chiunque voglia collaborare, si pone come scopo la pubblicazione e la diffusione gratuita di opere letterarie in formato elettronico. Ulteriori informazioni sono disponibili sul sito Internet: <http://www.liberliber.it/>

Aiuta anche tu il "progetto Manuzio"

Se questo "libro elettronico" è stato di tuo gradimento, o se condividi le finalità del "progetto Manuzio", invia una donazione a Liber Liber. Il tuo sostegno ci aiuterà a far crescere ulteriormente la nostra biblioteca. Qui le istruzioni: <http://www.liberliber.it/sostieni/>

O. M. CORBINO

NOZIONI di FISICA

PER

LE SCUOLE SECONDARIE

VOL. II

Calore - Ottica - Elettrostatica e Magnetismo
Corrente elettrica - Elettrotecnica



REMO SANDRON — EDITORE

Libraio della R. Casa

MILANO-PALERMO-NAPOLI

Deposito esclusivo per la Provincia di Bologna : Libreria Internazionale di LUIGI BELTRAMI in Bologna

Proprietà letteraria dell'Editore
Remo Sandron

Officine Tipogr. **Sandron** — 336-II-020908

CALORE.

TERMOMETRIA E CALORIMETRIA

1. **Quantità di calore e temperatura.** — Avvicinando un corpo a una fiamma noi constatiamo che esso si *riscalda*: la fiamma può essere considerata come una *sorgente di calore*, capace di comunicarlo ai corpi che tocca. Avvicinando un corpo a un blocco di ghiaccio, il corpo si *raffredda*; si potrebbe ancora considerare il blocco di ghiaccio come una *sorgente di freddo*, capace di comunicarlo ai corpi con cui viene in contatto. E poichè un corpo può essere prima riscaldato con una fiamma, e riportato poi alle sue condizioni normali per un breve contatto col ghiaccio, possiamo ritenere che la comunicazione di calore a un corpo può essere compensata col comunicargli freddo, come se quest'operazione equivallesse a una *sottrazione* di calore. Sarà perciò molto più semplice ritenere che i corpi, nelle condizioni ordinarie, hanno una certa *provvista* di calore, la quale può essere accresciuta o diminuita; corrispondentemente essi si riscaldano o si raffreddano.

Un corpo caldo, in contatto con un corpo freddo, cede ad esso calore; si dice che il primo ha una *temperatura* più alta del secondo; e quando il passaggio di calore non ha luogo, essi si dicono *alla stessa temperatura*. Ma se un corpo ha una temperatura più alta di un altro, ciò non vuol dire che contiene una maggiore quantità di calore — solo per due corpi di egual peso e di eguale natura la maggiore o minore temperatura corrisponde a una maggiore o minore quantità di calore contenuta. Così una punta di platino incandescente, che può essere resa tale assorbendo la piccola quantità di calore svolta da un fiammifero acceso, contiene minore quantità di calore di una pentola d'acqua bollente che ha assorbito, per un tempo notevole, il calore svolto in un grande fornello. Eppure la punta di platino incandescente è a temperatura più alta della pentola d'acqua bollente, e se vi è immersa *cede* ad essa calore.

Non altrimenti avviene della piccola quantità d'acqua contenuta in un cannello sottile, e che vi raggiunge un *livello* elevato, e della grande quantità d'acqua contenuta in un ampio recipiente, fino a un livello più basso. Se i due recipienti son messi in comunicazione l'acqua passa dal primo al secondo. La temperatura di un corpo misura adunque la maggiore o minore tendenza della quantità di calore che esso contiene a comunicarsi agli altri corpi con cui viene in contatto.

2. **Variazioni di volume dovute al calore.** — Nel massimo numero dei casi finora osservati

aumentando la temperatura di un corpo se ne aumenta il volume, in generale di una quantità molto piccola. Questo risultato vale per tutti i solidi, per i liquidi (fatta eccezione dell'acqua in un campo limitatissimo di temperatura), e per i gas. Per i solidi è dimostrato dalla palla di S'Gravesand (fig. 1) che passa a freddo attraverso all'anello, e non l'attraversa più se vien riscaldata con una fiamma, mentre torna a passare dopo il raffreddamento. E poichè l'aumento di volume è dovuto all'aumento di tutte le dimensioni del corpo, nel caso della sbarra della fig. 2 il riscaldamento la fa aumentare di lunghezza, come è dimostrato dal moto dell'indice a leva, che amplifica la dilatazione e la rende facilmente visibile. Coi liquidi il fenomeno si complica per la necessità di

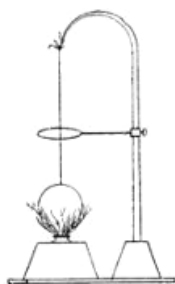


Fig. 1.

tenerli in un recipiente, che prende parte anch'esso alla dilatazione, aumentando di capacità. Si rende visibile la dilatazione ricorrendo a un palloncino munito di un cannello stretto (fig. 3), nel quale il liquido arriva ordinariamente a un certo livello, che monta col riscaldamento, e discende col raffreddamento. Questo prova che la dilatazione del liquido

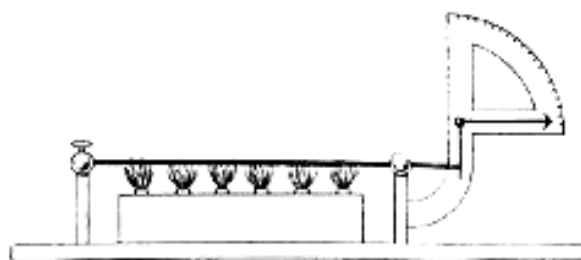


Fig. 2.

prevale sull'aumento di capacità del recipiente, mentre, con una brusca immersione del palloncino in un bagno caldo, il recipiente è il primo a dilatarsi, per l'immediato contatto, e si constata nel primo istante un abbassamento piccolo di livello.

Infine per gli aeriformi basta rinchiudere in un palloncino analogo un gas qualunque e disporre nel cannello una goccia di un liquido, come acqua colorata. Al minimo riscaldamento o raffreddamento la goccia si sposta in su o hi giù, rivelando la variazione di volume del gas, costantemente sottoposto alla pressione atmosferica.

3. Considerando le variazioni di temperatura come causa e le variazioni di volume come effetto, si convenne di servirsi di quest'ultime per misurare le prime — con ciò variazioni di volume uguali subite da un corpo corrispondono a variazioni eguali di temperatura. Questa convenzione è giustificata dal fatto sperimentale che gl'intervalli di temperatura riconosciuti eguali con questo criterio restano tali, sensibilmente, qualunque sia il corpo del quale si valutano le variazioni di volume.

Occorre naturalmente ricercare le condizioni più favorevoli per misurare le variazioni di volume del corpo termometrico. E si riconobbe che il mezzo più comodo è quello di servirsi di un palloncino o bulbo, come quello della fig. 3, munito di un cannello sottile, sul quale si valutano le dilatazioni del liquido. Si venne così al TERMOMETRO A MERCURIO (fig. 4) nel quale il bulbo e il cannello son di vetro e il liquido contenuto è il mercurio.



Fig. 4.

Diversi termometri con bulbi di capacità differente, e cannelli di diversa sezione, mostreranno uno spostamento diverso del liquido passando da un bagno a un altro — si avranno com'è chiaro spostamenti maggiori nell'apparecchio in cui il bulbo ha maggiore capacità e il cannello è più sottile. Ma se lo spostamento totale, diverso per i vari apparecchi, si divide in un numero di parti eguale per tutti, e perciò di diversa lunghezza da un termometro all'altro, e si indicano i tratti di divisione con i medesimi numeri arbitrari, le indicazioni lette sulle scale ottenute diverranno identiche per tutti i termometri entro le temperature intermedie; e anche al di sotto e al di sopra, se si ha di cura prolungare nei due sensi la graduazione ottenuta in ciascuno.

È quel che si è fatto scegliendo appunto *due punti fissi* per la graduazione di tutti i termometri. Occorre naturalmente che i due punti fissi siano veramente tali, e facilmente ottenibili in tutti i tempi. Ottime per lo scopo sono la temperatura del ghiaccio fondente e quella dei vapori sprigionantisi dall'acqua bollente sotto la pressione normale di un'atmosfera (76 centimetri di mercurio). Per segnare il primo punto s'immerge il termometro nell'apparecchio della fig. 5, contenente ghiaccio pesto. Per segnare il secondo ci si serve della caldaietta rappresentata nella fig. 6, ove i vapori che si sollevano dall'acqua bollente nel fondo, involuppano il bulbo e buona parte del cannello, salendo lungo un cilindro verticale, e ridiscendono per un involucro cilindrico che abbraccia il primo cilindro e che ha la funzione di sottrarre questo dall'azione raffreddatrice dell'atmosfera. Se nell'atto dell'esperienza il barometro non segna 76 cm. bisogna fare una correzione, come sarà spiegato più in là.

Ai due punti segnati sul termometro si danno, nella *scala centigrada*, i valori 0 e 100; e l'intervallo si divide in cento parti eguali, di cui ciascuna si chiama *un grado*. La divisione si prolunga al di sopra di 100, e sotto lo zero, ricorrendo in quest'ultimo campo ai numeri negativi. Cosicché *dire che la temperatura di un bagno è (per esempio) + 57°, significa che,*



Fig. 3.

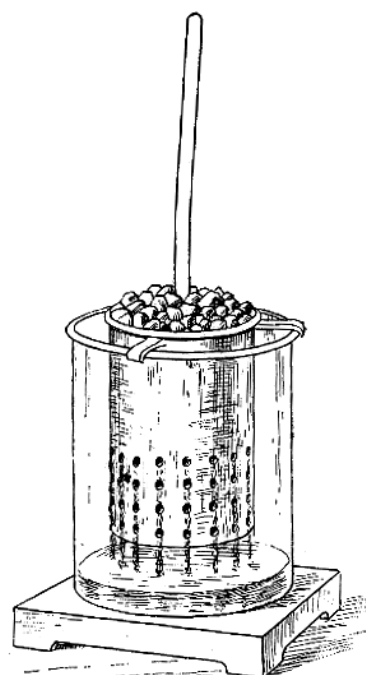


Fig. 5.

passando dalla temperatura del ghiaccio alla temperatura del bagno, il mercurio contenuto nel vetro subisce una variazione di volume eguale a $\frac{57}{100}$ di quella subita passando dalla temperatura

del ghiaccio fondente a quella dei vapori d'acqua bollente.

Nella scala Reaumur i punti fissi hanno ricevuto le designazioni 0 e 80° anzichè 0 e 100; e l'intervallo è diviso in 80 parti; il grado Reaumur è quindi più ampio del centigrado. Invece nella scala Fahrenheit i punti fissi medesimi corrispondono ai valori 32 e 212. Queste scale sono ormai poco in uso. Noi ci riferiremo sempre alla scala centesimale, detta anche di Celsius.

Un termometro è *pronto* se acquista rapidamente la temperatura del corpo in cui è immerso, raggiungendo perciò in breve tempo la indicazione finale; è *sensibile* se permette di riconoscere e misurare variazioni molto piccole di temperatura. Nel primo caso occorre che il bulbo contenga poco mercurio, e che sia grande la sua superficie di contatto col corpo, in proporzione al volume. Nel secondo occorre invece che il bulbo sia capace e il cannello sottile. Le due condizioni non sono purtroppo conciliabili.

Quanto ai limiti d'impiego del termometro a mercurio essi son dati dalla solidificazione del liquido, che ha luogo a $-38^{\circ},5$, e dalla sua ebollizione che avviene a circa $357^{\circ},2$. Per temperature più basse servono i termometri a *toluolo* che resta liquido fino a temperature bassissime; esso però bolle poco al di

sopra dei 100 gradi. Per le temperature molto alte o molto basse si ricorre ai termometri a gas e ad altri metodi di misura che saranno esposti più in là.

Abbiamo detto che gl'intervalli di temperatura riconosciuti eguali con un corpo termometrico restan tali, sensibilmente, cambiando la natura del corpo. A rigore diversi termometri riempiti con liquidi differenti, pur essendo graduati coi medesimi punti fissi, non vanno esattamente d'accordo a tutte le temperature. Il termometro a mercurio è tra tutti i termometri a liquido quello che si scosta meno dal termometro a gas; se perciò si attribuisce ai gas, e precisamente a un gas speciale riscaldato in condizioni determinate, la funzione del corpo termometrico, bisognerà nelle misure di precisione correggere le indicazioni del termometro a mercurio, il che si fa, non molto agevolmente, per confronto diretto tra questo e il termometro campione a gas.

Infine occorre notare che i termometri con bulbo di vetro son soggetti a delle contrazioni molto lente e continue del bulbo medesimo, con conseguente spostamento in alto del zero indicato nel cannello rispetto alla temperatura del ghiaccio che fonde. Si ovvia a questo inconveniente ricorrendo a delle qualità di vetro speciali, che presentano al minimo grado queste anomalie, e sottoponendo il termometro, prima della graduazione, a un trattamento termico speciale.

4. Quantità di calore e sua misura. — Abbiamo già distinto il concetto di quantità di calore da quello di temperatura. E come abbiamo stabilito il criterio di misura della temperatura, anche senza saper bene che cosa essa sia, così, senza dir nulla per ora della natura del calore, possiamo stabilire un criterio per misurarne la quantità.

È chiaro infatti che per riscaldare di 1° due grammi d'acqua occorrerà il doppio della quantità di calore necessaria per scaldarne un grammo solo. L'esperienza dimostra inoltre che la stessa quantità di calore basta per scaldare un peso costante d'acqua di 1° qualunque sia la temperatura di partenza; questo risultato non è rigorosamente esatto, ma si può in prima approssimazione ritenerlo tale, poichè le differenze sono molto piccole. Posto ciò noi assumeremo come unità di misura delle quantità di calore quella che occorre per scaldare di 1° un grammo d'acqua; e la chiameremo CALORIA. Per scaldare di 1° un chilogrammo d'acqua occorreranno quindi 1000 calorie, o, come si suol anche dire, una *grande* caloria.

E così per scaldare da 0° a 100° , cioè fino all'ebollizione, 10 Kg. d'acqua occorreranno

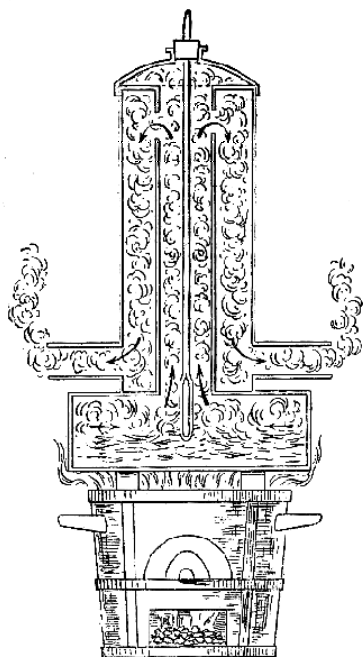


Fig. 6.

$$10 \times 100 = 1000 \text{ grandi calorie} = 1000000 \text{ calorie}$$

5. Propagazione del calore. — Come abbiamo detto il calore passa spontaneamente dai corpi di temperatura più alta ai corpi di temperatura più bassa; altrettanto avverrà nello stesso corpo se le sue parti sono a temperatura diversa. Dobbiamo ora studiare più da vicino i particolari di questo passaggio.

Esso può aver luogo in tre modi: per *conduzione*, per *irradiazione*, per *convezione*.

Il passaggio per conduzione ha luogo in modo caratteristico in una sbarra di cui un estremo sia fortemente riscaldato. I primi strati comunicano calore a quelli immediatamente in contatto, e questi ai successivi, cosicchè dopo un certo tempo si trovano riscaldati anche gli strati alquanto lontani; in questo caso la temperatura è continuamente decrescente dai posti più vicini ai più lontani.

Può invece il calore passare direttamente da un corpo caldo a un corpo freddo, senza che divengano più caldi di questo i corpi intermedi, e anche quando questi corpi intermedi non esistono; così giunge a noi il calore del Sole, mentre l'atmosfera può essere anche molto fredda. Si ha allora il passaggio di calore per irradiazione, che ha luogo anche nel vuoto degli spazi interplanetari, con leggi analoghe a quelle con cui si propaga la luce. Noi studieremo queste leggi nel Capitolo sull'energia raggiante.

Infine nei liquidi e nei gas possono aver luogo dei movimenti delle loro parti, in virtù dei quali, e del rimescolamento che ne consegue, il calore si comunica con una certa rapidità a tutti i punti della massa. Si ha allora il passaggio per *convezione*. Così se un fornello a carbone è posto nel centro di una stanza, l'aria che è con esso in immediato contatto diviene per il riscaldamento più leggiera; e monta su, per il principio d'Archimede, cedendo il posto ad altra aria più fredda. Le correnti aeree che così si determinano portano rapidamente in contatto col carbone rovente tutta l'aria della stanza, mentre l'aria calda ascendente comunica al tetto il proprio calore. Un fenomeno analogo si produce in un recipiente pieno d'acqua, e riscaldato dal di sotto.

6. Conduzione del calore. — Esaminiamo più attentamente il passaggio del calore in una sbarra scaldata a un estremo; e supponiamo, in principio, che la sbarra sia immersa in un ambiente che impedisca la *propagazione laterale* del calore. In tal caso ogni strato riceve dal precedente una certa quantità di calore, che in parte trattiene, elevando così la sua temperatura, e cede il resto allo strato successivo. Dopo alquanto tempo la temperatura dei vari strati rimane invariata, e d'allora in poi ogni strato cede al successivo il calore che riceve dal precedente. Se si misurano in tali condizioni, dette di *regime permanente*, le temperature dei vari punti della sbarra, si trova che esse sono uniformemente decrescenti, cioè che a spostamenti uguali lungo la sbarra corrispondono decrescimenti eguali di temperatura. Così se un estremo è tenuto a 100° e l'altro a 0° , per immersione permanente nei vapori d'acqua bollente e nel ghiaccio fondente, le temperature decresceranno uniformemente da 100° a 0° , e se la sbarra è lunga 100 centimetri si troverà che a ogni centimetro la temperatura si abbassa di 1° . Il diagramma *AB* delle temperature è allora una retta (fig. 7).

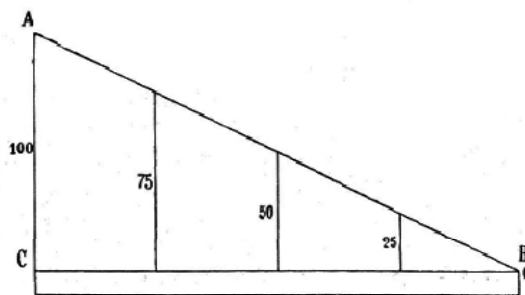


Fig. 7.

Se si cambia la natura della sbarra, si troverà inalterato il diagramma delle temperature, quando si aspetti che il regime permanente sia ottenuto. Ma misurandola quantità di calore che scorre lungo la sbarra, penetrando all'estremo *C* e riversandosi per *B* nel ghiaccio fondente, si trova che essa dipende notevolmente dalla natura della sbarra. Per alcuni corpi, detti buoni conduttori, quella quantità è piuttosto grande, ed è invece piccola per altri chiamati cattivi conduttori. In generale sono buoni conduttori i metalli, mentre il legno, il vetro e molti corpi organici sono cattivi conduttori.

Il moto del calore, in questo caso ideale che la sbarra sia sottratta a ogni perdita laterale, corrisponde al moto di un liquido in una condotta impermeabile, quale ad es., un tubo di ferro privo

di fori. E come in una condotta, che non abbia perdite, tanta acqua penetra a un estremo quanta ne vien fuori dall'altro, così avviene del calore se le perdite laterali lungo la sbarra sono evitate.

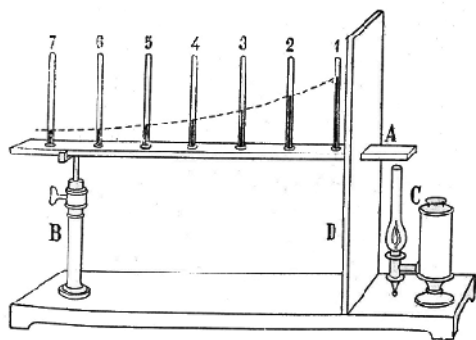


Fig. 8.

In realtà però, non potendo la sbarra essere assolutamente isolata, gli strati di essa cedono all'ambiente parte del calore che ricevono dagli strati antecedenti. E quando tutto il calore penetrato dall'estremo *A* (fig. 8) si è andato perdendo lateralmente per via, il resto della sbarra resterà alla primitiva temperatura, come se l'estremo *A* non fosse riscaldato. La distribuzione delle temperature, rivelata da una serie di termometri, ne risulta pure alterata; e invece del diagramma rettilineo di prima si ha un diagramma che discende più rapidamente.

La caduta del diagramma dipende dall'entità delle perdite laterali, in relazione alla quantità totale del calore che penetra da *A* e si propaga verso l'altro estremo; cosicchè se, per due sbarre diverse, *M*, *N* le perdite laterali sono le stesse, ma nella prima circola, per la sua migliore conducibilità, una maggiore quantità di calore, il diagramma di *M* sarà meno depresso di quello di *N*, e perciò in strati corrispondenti la temperatura in *M* sarà maggiore che in *N*. È questo il caso delle sbarre immerse nell'aria e scaldate a un estremo; ed è perciò che noi possiamo toccare impunemente una bacchetta di legno fino a qualche centimetro dall'estremo rovente, mentre altrettanto non possiamo fare con una bacchetta di ferro o di rame.

Ma anche tra metalli diversi si posson riconoscere delle differenze notevoli. Così nelle due sbarre di ferro e di rame della figura 9, i cui estremi sono scaldati insieme, e lungo le quali sono attaccate con cera delle palline di legno, si vedran cadere, dopo un certo tempo, un maggior numero di palline dal lato del rame, poichè, essendo questo più conduttore del ferro, si raggiunge anche a distanze maggiori la temperatura a cui fonde la cera. E appunto le conducibilità dei diversi metalli sono state confrontate misurando per sbarre di natura diversa, e poste in identiche condizioni, le temperature nei punti corrispondenti. I metalli si presentano allora in quest'ordine di conducibilità decrescente: argento, rame, oro, zinco, stagno, ferro, piombo, platino.



Fig. 9.

Nei liquidi, quando si prendano le precauzioni necessarie per evitare la propagazione del calore per convezione (per esempio scaldandoli dal di sopra) la conducibilità è piccolissima. Per i gas non si potrà impedire il rimescolamento delle varie parti, conseguenza necessaria della teoria cinetica; ma imprigionandoli in piccole cavità come ha luogo nei corpi porosi, nella segatura, nelle stoffe, nelle pellicerie ecc., si ottengono i migliori isolanti pel calore. Di ciò si trae, com'è noto, grande profitto nella vita pratica.

La conducibilità termica dei corpi influisce moltissimo nel determinare il senso di caldo o di freddo che essi producono al contatto della nostra mano. Un pezzo di legno e un pezzo di rame, aventi la stessa temperatura, daranno una sensazione diversa al contatto; e precisamente se la loro temperatura comune è più alta di quella della mano, apparirà più caldo il rame; se invece è più bassa, apparirà meno freddo il legno. Per spiegare queste apparenze si osservi che la sensazione di caldo o di freddo al contatto della mano deve dipendere dalla quantità di calore che viene progressivamente comunicata o sottratta alla mano nel posto ove ha luogo il contatto; ed è evidente che questi scambi di calore si accentueranno al contatto di un corpo buon conduttore, poichè, oltre ai punti direttamente toccati, intervengono anche le regioni vicine.

7. **Dilatazione dei solidi.** — Cominciamo dagli aumenti di lunghezza. Un'asta di platino lunga 1 metro, riscaldata da 0 a 100°, si allunga di mm. 0,89; invece un'asta di zinco di eguale lunghezza si allunga di mm. 2,92. La dilatazione è perciò diversa da metallo a metallo. Per tutti i corpi, però, l'aumento di lunghezza è *sensibilmente* costante nei successivi riscaldamenti di 1°, o per lo meno noi potremo trascurarne le variazioni in uno studio elementare.

Chiameremo *coefficiente di dilatazione lineare* di un corpo l'aumento di lunghezza di una sbarretta lunga un centimetro per il riscaldamento di 1°. Dire perciò che il coefficiente di dilatazione lineare del ferro è $\frac{12}{1000.000}$ significa che una sbarretta di ferro lunga 1 centimetro, riscaldata di 1°, si allunga di $\frac{12}{1000.000}$ di centimetro, cioè di circa $\frac{1}{10}$ di micron.

Ma se la sbarra è lunga l_0 centimetri a 0° , e il coefficiente di dilatazione è α , l'allungamento della sbarra per 1° di riscaldamento sarà $l_0 \alpha$; e per un riscaldamento di t° gradi sarà t volte più grande, cioè $l_0 \alpha t$. Se perciò indichiamo con l_t la lunghezza totale della sbarra a t gradi, avremo

$$l_t = l_0 + l_0 \alpha t = l_0(1 + \alpha t) \quad (1)$$

Il binomio $1 + \alpha t$, che è un numero poco diverso da 1, perchè αt è molto piccolo, in generale, di fronte all'unità, si dice binomio di dilatazione lineare.

Ma la dilatazione ha luogo in tutte le direzioni, e perciò aumenta il volume del corpo. Così un cubo che a 0° ha lo spigolo lungo l_0 , se si dilata egualmente in tutte le direzioni avrà a t_0 come lunghezza dello spigolo l_t . Il suo volume iniziale era

$$V_0 = l_0^3$$

e invece il volume a t gradi sarà per la (1)

$$V_t = l_t^3 = l_0^3(1 + \alpha t)^3$$

Or se si sviluppa con le regole del calcolo algebrico il cubo $(1 + \lambda t)^3$, e si tien conto della piccolezza di λt di fronte all'unità, si può senza errore notevole ritenere che $(1 + \lambda t)^3$ è sensibilmente eguale a

$$1 + 3 \lambda t$$

e perciò

$$V_t = V_0(1 + 3 \lambda t) \quad (2)$$

Ma se si definisce *coefficiente di dilatazione cubica* di una sostanza l'aumento di volume di un centimetro cubico per il riscaldamento di 1°, e lo si indica con β , si potrà dedurre, come si fece per la (1), che

$$V_t = V_0(1 + \beta t) \quad (3)$$

Si vede subito, per confronto con la (2), che

$$\beta = 3 \lambda$$

Cioè il coefficiente di dilatazione cubica è il triplo del coefficiente di dilatazione lineare; e perciò 1 cm.³ di ferro riscaldato di 1° aumenterà di $\frac{36}{1000.000}$ di centimetro cubo.

Aumentando il volume di un corpo per il riscaldamento, e restando costante la massa, ne dovrà diminuire la densità, misurata dalla massa contenuta nell'unità di volume. Così chiamando d_0 la densità a zero gradi, d_t la densità a t° , e M la massa del corpo, sarà

$$d_0 = \frac{M}{V_0}; \quad d_t = \frac{M}{V_t}$$

cioè

$$\frac{d_0}{d_t} = \frac{V_t}{V_0}$$

e per la (3)

$$\frac{d_0}{d_t} = 1 + \beta t$$

ovvero

$$\left. \begin{aligned} d_0 &= d_t(1 + \beta t) \\ d_t &= \frac{d_0}{1 + \beta t} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

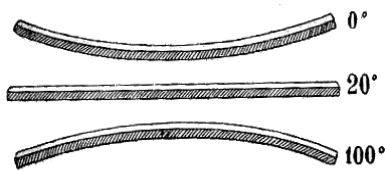


Fig. 10.

Tra le applicazioni della disuguale dilatabilità dei solidi citeremo le proprietà delle cosiddette *lamine bimetalliche*. Se si sovrappongono, in tutta la superficie, due lamine aventi diversi coefficienti di dilatazione, come il ferro e il rame, la lamina doppia s'incurverà per il riscaldamento, presentando nella parte convessa il metallo più dilatabile (fig. 10). Se ne possono costruire degli avvisatori automatici assai sensibili per segnalare un accrescimento anormale di temperatura in un ambiente, come pure dei sistemi compensatori per i bilancieri degli orologi da tasca o per i pendoli degli orologi. Questi, invero, per la dilatazione subita quando la temperatura è più alta, oscillano più lentamente; ma si può fissar loro delle lamine bimetalliche opportunamente disposte, portanti all'estremità delle piccole masse e quali per il riscaldamento e l'incurvamento delle lamine medesime vengono avvicinate al centro del bilanciere (fig. 11) o al punto di sospensione del pendolo, ed esercitano così un'azione acceleratrice atta a stabilire il compenso.

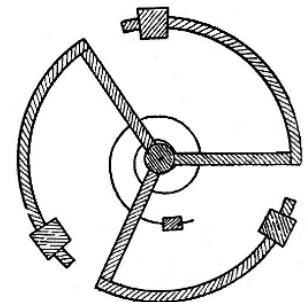


Fig. 11.

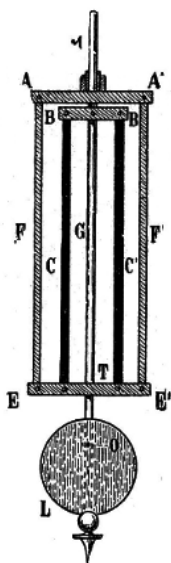


Fig. 12.

Un altro sistema di compensazione nei pendoli è rappresentato dalla fig. 12. Dalla sbarra AA' pendono due asticelle F, F' di acciaio cui è fissata la sbarra EE' ; da questa salgono due asticelle di zinco CC' , dipinte in nero nella figura, che fan capo alla sbarra BB' da cui scende la quinta asticella d'acciaio G , la quale passa liberamente pel foro T e sostiene la lente L del pendolo. Essendo la dilatazione dello zinco più che doppia di quella dell'acciaio, e poichè gli allungamenti di F, F' portano in basso la sbarra EE' , quelli di CC' tendono a portare in alto la sbarra BB' ,

e infine l'allungamento di G tende a portare in basso la lente, in totale si potrà ottenere che il centro d'oscillazione O del pendolo resti a distanza costante dal punto di sospensione.

8. **Dilatazione dei liquidi.** — Occorre distinguere la dilatazione *apparente* dei liquidi, contenuti per necessità in un vaso che aumenta di capacità col riscaldamento, dalla loro dilatazione *assoluta*, corrispondente alla effettiva diminuzione di densità espressa dalle (4).

Ed è chiaro che la dilatazione assoluta è eguale alla dilatazione apparente, aumentata della dilatazione del recipiente.

L'aumento di capacità di quest'ultimo può essere talvolta calcolato, osservando che un solido cavo si dilata come se fosse pieno; e perciò detta V_0 la capacità a 0° , V_t quella a t° e K il coefficiente di dilatazione sarà

$$V_t = V_0(1 + K t)$$

Ma comunemente K non è conosciuto per via diretta; così, se si tratta di vetro, il suo coefficiente di dilatazione è diverso da una qualità all'altra.

Si procede quindi diversamente. Profittando del principio dei vasi comunicanti con liquidi eterogenei (Vol 1°, § 67) e introducendo in due branche verticali mercurio a 0° e mercurio a 100° , si è potuto, dalle altezze raggiunte dal mercurio nelle due branche, avere il rapporto delle sue densità a 0 e a 100° ; e allora, per mezzo della formola (4), si è calcolato il coefficiente di dilatazione assoluta del mercurio; Regnault ottenne, in seguito a esperienze molto accurate:

$$\beta = 0,000181$$

Se adesso si riempie di mercurio un pallone qualsiasi di vetro, munito di un cannello calibrato, e se ne osserva la dilatazione apparente, per es. tra 0 e 100° si può, conoscendo la dilatazione apparente e l'assoluta, calcolare, per differenza, la dilatazione del recipiente. E allora, aggiungendo quest'ultima alla dilatazione apparente osservata con un altro liquido, si può ottenere la dilatazione assoluta di questo.

Segneremo in proposito una importante anomalia dell'acqua. Essa, scaldata progressivamente a partire da 0° , va contraendosi invece di dilatarsi, fino a $+4^\circ$; acquista perciò a questa temperatura il minimo volume e la massima densità, e al di sopra di 4° comincia a dilatarsi come tutti gli altri corpi.

È perciò che in un recipiente che contiene acqua raffreddata dal di sopra gli strati più freddi si portano in principio verso il fondo; ma quando questo è occupato da acqua a 4° , che ha perciò la massima densità, non vien più spostata dall'acqua più fredda che si raccoglie in alto, fino a congelarsi. L'apparecchio della fig. 13 serve per la riproduzione di questa importante esperienza.

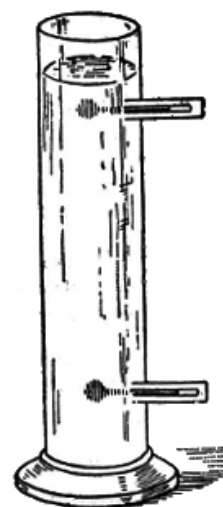


Fig. 13.

9. **Dilatazione dei gas.** — Nel caso dei gas, i più dilatibili tra tutti i corpi, l'aumento di capacità del recipiente costituisce un piccolo termine correttivo, del quale noi possiamo, in questo studio elementare, anche non tener conto.

Ma poichè i gas hanno un volume notevolmente variabile a seconda della pressione cui son sottoposti, per studiare gli effetti del calore noi dovremo precisar bene la pressione alla quale il gas si trova prima e dopo il riscaldamento.

Lo studio della dilatazione può esser fatto in due condizioni particolarmente semplici: si può cioè lasciare invariata la pressione cui il gas soggiace (*dilatazione a pressione costante*) e misurare le variazioni di volume per il riscaldamento; oppure costringere il gas a conservare invariato il volume primitivo, aumentando convenientemente la pressione, e misurare la nuova pressione (*dilatazione a volume costante*).

Nel primo caso vale una legge, detta di Gay-Lussac, per la quale il coefficiente di dilatazione è all'incirca $\frac{1}{273}$ per tutti i gas. Ponendo cioè, come nella (3),

$$V_t = V_0(1 + \alpha t) \quad (5)$$

si ha per tutti i gas, sensibilmente,

$$\alpha = \frac{1}{273} = 0,003655 \quad (5 \text{ bis})$$

In realtà i valori di α si allontanano alquanto dal valore suddetto, specialmente per i gas che possono facilmente liquefarsi, cioè per quei gas che, come vedemmo, si allontanano alquanto dal comportamento richiesto dalla legge di Boyle. Il seguente specchietto serve a dare un'idea di queste deviazioni dalla legge di Gay-Lussac:

	α
<i>Idrogeno</i>	0,003661
<i>Aria</i>	0,003670
<i>Anidr. carbonica</i>	0,003710
<i>Anidr. solforosa</i>	0,003903
<i>Cianogeno</i>	0,003877

Quando il gas è costretto a conservare un volume costante, aumenta di tensione, proporzionalmente alla tensione iniziale e alla temperatura. Chiamando quindi *coefficiente di tensione* l'aumento di tensione dell'unità di tensione per il riscaldamento di 1° , si può dimostrare, con un procedimento analogo a quello seguito per stabilire la formola (1), che tra la pressione H_t a t° e la pressione H_0 a 0° sussiste la relazione

$$H_t = H_0(1 + \alpha' t) \quad (6)$$

ove α' denota il coefficiente di tensione.

Per un gas che segue la legge di Boyle dev'essere

$$\alpha' = \alpha \quad (7)$$

Infatti se dapprima il gas si dilata alla pressione costante H_0 , sarà

$$V_t = V_0(1 + \alpha t)$$

Alla nuova temperatura t , tenuta costante, comprimiamo il gas finchè il volume V_t diventi quello di prima V_0 . Se la legge di Boyle è seguita la nuova pressione H_t sarà tale che

$$\frac{V_t}{V_0} = \frac{H_t}{H_0}$$

cioè si avrà

$$\frac{H_t}{H_0} = 1 + \alpha t$$

ovvero

$$H_t = H_0(1 + \alpha t) \quad (8)$$

E confrontando quest'ultima con la (6), si vede che la (7) dev'essere vera.

In realtà però, per le deviazioni dalla legge di Boyle, i valori di α non sono esattamente uguali ai corrispondenti di α' . Quando però si tratti di un *gas ideale*, che obbedisca cioè alla legge di Boyle e a quella di Gay-Lussac, son valide insieme la (5), la (5 bis), e la (8); si noti però che il gas ideale è una pura concezione teorica, dalla quale si scostano alquanto i gas reali, specialmente i più facilmente liquefacibili.

10. **Temperatura assoluta.** — Se nella (8) si sostituisce ad a il suo valore teorico $\frac{I}{273}$ si ottiene

$$H_t = H_0 \left(1 + \frac{I}{273} t \right) \quad (9)$$

formola valida, per un gas perfetto, a tutte le temperature.

Se noi ce ne serviamo per calcolare la pressione di un gas alla temperatura di -273° , otterremo

$$H_{-273} = H_0 \left[1 + \frac{I}{273} (-273) \right] = H_0 \times [1 - 1] = 0$$

cioè la pressione di un gas perfetto si annulla a -273° , e quindi, per la teoria cinetica dei gas, a quella temperatura cessa il moto delle molecole e gli urti che esse determinano sulle pareti.

Or, come noi vedremo, il calore, che sappiamo già essere una forma di energia, è appunto energia cinetica delle molecole dei corpi; e annullarsi la velocità di queste deve perciò equivalere alla cessazione del calore; se così è, alla temperatura di -273° un gas deve trovarsi in condizioni da non poter raffreddarsi ulteriormente. Ed è ragionevole scegliere questa temperatura, la più bassa di tutte le possibili, come *zero assoluto*, e contare da quel punto i gradi termometrici. Basta a tal fine aggiungere 273 alla indicazione del termometro centigrado: se ne ottengono le cosiddette *temperature assolute*. Così l'acqua, sotto la pressione di un'atmosfera, bolle a 373° assoluti.

Se nella formola (9) si esprimono i gradi centigradi t in gradi assoluti T , essendo

$$T = t + 273$$

e perciò

$$t = T - 273$$

si avrà

$$H_t = H_0 \left[1 + \frac{I}{273} (T - 273) \right] = \frac{H_0}{273} T$$

cioè: la pressione di un gas è proporzionale alla sua temperatura assoluta, quando se ne mantenga costante il volume.

Ed è appunto in questo modo che si misurano le temperature col termometro a gas; si valuta cioè la pressione H_t che è necessaria per ricondurre, alla temperatura ignota t , il volume del gas allo stesso valore che aveva, per es., a zero gradi centigradi; conoscendo allora H_t , e saputo una volta per tutte il valore di H_0 (pressione del gas quando è circondato dal ghiaccio fondente) se ne deduce T e quindi la temperatura centigrada t .

11. **Calore specifico.** — Masse eguali di corpi diversi richiedono, come l'esperienza dimostra, quantità diverse di calore per riscaldarsi di un egual numero di gradi. Cosichè il numero di calorie occorrenti per riscaldare di 1° un grammo di un corpo, che chiamasi *calore specifico* del

corpo, dipende dalla natura di questo. L'acqua, richiedendo una caloria perchè un grammo si scaldi di 1°, avrà per calore specifico *uno*. Tutte le altre sostanze, eccettuato l'idrogeno, hanno un calore specifico più piccolo.

Sia c il calore specifico di un corpo; per riscaldare di 1° non un grammo ma p grammi di esso occorreranno $p c$ calorie; e per riscaldarli di t gradi, occorreranno $p c t$ calorie. Che se il corpo passa dalla temperatura ϑ alla temperatura T , riscaldandosi di $T - \vartheta$ gradi, ci vorranno $p c (T - \vartheta)$ calorie. Un uguale quantità di calore sarà ceduta dal corpo se si raffredda dalla temperatura T alla temperatura ϑ .

Quando poi un corpo caldo viene introdotto in un liquido, per es. acqua, e si rimescola bene in modo che tutto si porti a una stessa temperatura, è chiaro che tante calorie saranno perdute dal corpo quante ne son guadagnate dall'acqua e dal recipiente che la contiene — supposto naturalmente che l'acqua non ne perda all'esterno per irradiazione o per conduzione. Sia p il peso del corpo, T la sua temperatura iniziale e c il suo calore specifico; sia P il peso dell'acqua e t la sua temperatura; finalmente sia ϑ la temperatura dell'insieme dopo l'immersione e il rimescolamento. Trascurando la quantità di calore assorbita dal recipiente, ed eguagliando le quantità di calore cedute e acquistate, noi potremo scrivere

$$p c (T - \vartheta) = P(\vartheta - t)$$

Questa eguaglianza può servire per determinare sperimentalmente c , il calore specifico del corpo, misurando p , T , P , t e ϑ .

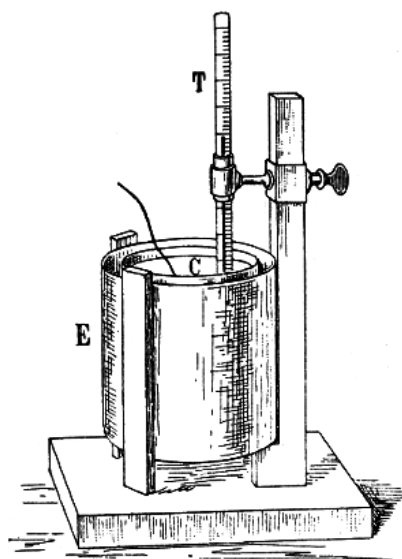


Fig. 14.

L'apparecchio che serve a questo scopo chiamasi *calorimetro* (fig. 14), ed è costituito da un vaso cilindrico C di ottone sottile dorato, introdotto in un altro più grande E internamente dorato, e sostenuto da tre punte di sughero; si evita con ciò la dispersione del calore comunicato all'acqua nell'immersione del corpo. Un termometro ed un agitatore completano l'apparecchio.

Il corpo viene prima riscaldato a una temperatura nota, in una stufa speciale, e poscia immerso bruscamente nel liquido. Molte cautele sono necessarie per eliminare o correggere diverse influenze perturbatrici, ma noi non possiamo addentrarci in questi particolari.

Un risultato interessante delle numerose determinazioni fatte sui calori specifici dei corpi è espresso nella *legge di Dulong e Petit*, per la quale se si prendono dei diversi corpi semplici tanti grammi quant'è il loro peso atomico, occorre per tutti la stessa quantità di calore per riscaldarli di 1°. Cosicchè occorrerà sensibilmente la stessa quantità di calore per scaldare di un grado

7 gr. di litio, 27 g. di alluminio, 56 g. di ferro, 108 g. di argento, 200 g. di mercurio. È chiaro perciò che i corpi aventi un alto peso atomico avranno i più piccoli calori specifici.

Si tenga però presente che la legge di Dulong e Petit si verifica in realtà non molto esattamente.

Del calore specifico degli aeriformi diremo qualche cosa più in là.

Teoria meccanica e sorgenti del calore.

11. **Trasformazione reciproca del lavoro meccanico e del calore.** — Abbiamo visto nella Meccanica (vol. 1° § 55) che l'energia meccanica può talvolta sparire per urti, attriti, imperfezioni elastiche dei corpi, e che in tali casi si manifesta lo sviluppo di una certa quantità di calore.

Una delle più antiche osservazioni in proposito si deve al Rumford, il quale sorpreso della quantità enorme di calore sviluppantesi nei lavori di trapanatura dei cannoni, e che permetteva di

portare ben presto all'ebollizione una rilevante quantità d'acqua, ebbe per primo l'idea, forse presentatasi confusamente anche ad altri, che il lavoro meccanico impiegato nel vincere l'attrito si trasformasse direttamente in calore.

Le idee di Rumford si andarono precisando e concretando nella prima metà del 1800, a misura che si andò sempre meglio assodando che a una *determinata* quantità di lavoro meccanico, che si trasformi in calore per urti o per attriti di qualsiasi specie, corrisponde la produzione di una *costante* quantità di calore, e specialmente quando si poté dimostrare che anche la trasformazione inversa può aver luogo, e che perciò del calore può esser distrutto, producendosi una corrispondente quantità di lavoro meccanico.

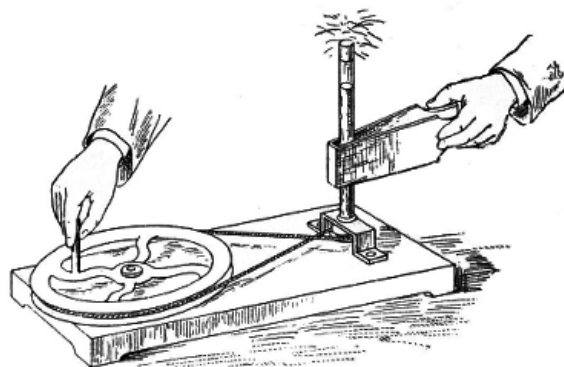


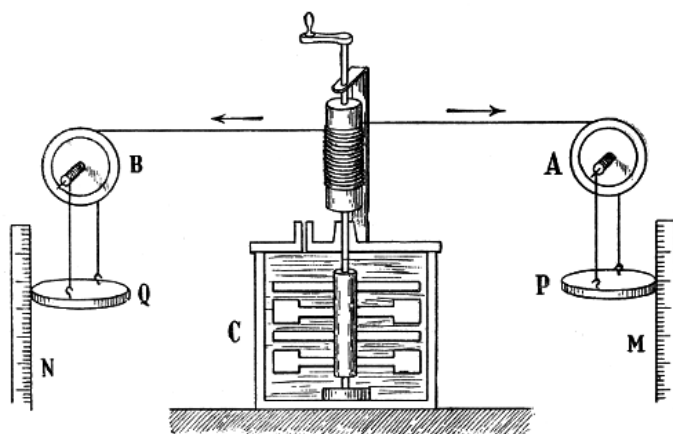
Fig. 15.

La vecchia idea che il calore fosse un fluido speciale trasmissibile da un corpo a un altro annebbiò per molto tempo gli spiriti; e la lentezza con cui le nuove idee sulla immaterialità del calore s'imposero non fa invero molto onore alla perspicacia e all'ingegno umano; ma la scienza se ne rifece entro lo stesso secolo, per opera specialmente di Mayer, Hirn, Joule, Helmholtz, Clausius, e poi di Boltzmann, Lord Kelvin, Gibbs, Planck e tanti altri, i quali edificarono la Termodinamica, le cui leggi dominano i fenomeni naturali più disparati, e che costituisce lo strumento più sicuro e possente che abbia a disposizione la moderna Filosofia Naturale.

La Termodinamica si fonda su due principi, che noi illustreremo nella forma più modesta, e di cui il primo, detto dell'equivalenza, o principio di Mayer, afferma appunto che *nelle trasformazioni reciproche del lavoro in calore, e viceversa, a un determinato lavoro perduto o creato corrisponde una determinata quantità di calore prodotta o distrutta.*

Noi non citeremo nemmeno i fatti più comuni della vita che dimostrano la produzione di calore per impiego di lavoro meccanico. Ci limiteremo a riferire l'elegante esperienza scolastica di Tyndall (fig. 15) nella quale l'attrito che oppone una morsa di legno contro un tubo di ottone, rotante, e pieno di etere, sviluppa presto il calore necessario per portare all'ebollizione il liquido, e far saltare il tappo che chiude il tubo al di sopra.

E di tutte le numerose esperienze di misura destinate a valutare il lavoro meccanico perduto e il calore prodotto, per determinare cioè il cosiddetto *equivalente meccanico del calore*, ovvero il numero di chilogrammetri o di joule necessari per produrre una caloria, citeremo quella eseguita dal Joule.



F.g. 16.

Un sistema di alette (fig. 16) è messo in moto entro l'acqua di un calorimetro C da un albero rotante per virtù di due funicelle, tirate attraverso alle carrucole A, B da due pesi cadenti P, Q. Per accrescere la difficoltà al moto delle alette la rotazione del liquido è impedita da setti provveduti di finestre, che permettono solo il passaggio delle alette.

Il lavoro compiuto dai pesi nella discesa serve in piccola parte a vincere gli attriti esternamente al calorimetro, in parte a comunicare una certa forza viva alle masse P, Q che finiscono col muoversi di moto uniforme, e il resto infine si dissipa per vincere l'attrito nell'interno del liquido.

Valutando con opportune cautele le prime due parti, e conoscendo il lavoro totale compiuto dai pesi cadenti da un'altezza misurata, si può dedurre la quantità di lavoro che si trasforma in calore nel calorimetro; e d'altra parte, coi metodi calorimetrici conosciuti, si può misurare il numero di calorie da esso sviluppate. Così poté il Joule dimostrare che occorrono 425 chilogrammetri per produrre una grande caloria.

Esperienze più precise, eseguite negli ultimi tempi, e coi metodi più svariati di trasformazione del lavoro in calore, hanno di poco modificato il numero ottenuto da Joule; noi riterremo che l'equivalente di una *grande* caloria in lavoro sia 427 chilogrammetri; ovvero, essendo $1 \text{ Kgm.} = 9,8 \text{ joule}$, potremo anche dire che a sviluppare una piccola caloria occorrono 4,18 joule.

12. Calore e moto molecolare. — Impiegando lavoro si può accrescere l'energia visibile di un corpo, cioè la sua forza viva, ovvero comunicargli un'energia potenziale elastica, deformandolo. Se poi si aumenta la temperatura di un corpo, comunicandogli calore o energia termica, con che il corpo aumenta di volume, il calore fornito produrrà in generale tre effetti: anzitutto se il corpo è sottoposto alla sua superficie a delle forze esterne, queste vengono vinte durante la dilatazione, e si ottiene con ciò un *lavoro esterno*; inoltre si modifica la distanza delle particelle del corpo, e si aumenta per ciò la loro energia potenziale mutua, poichè tra le particelle si esercitano le forze molecolari; infine viene accresciuta la forza viva media delle molecole nei movimenti rapidissimi che esse eseguono o intorno a una posizione media, come nei solidi, o nella loro traslazione attraverso alla massa, come negli aeriformi.

Per molte ragioni, che qui non è possibile riferire, si è dovuto riconoscere che la temperatura di un corpo, cioè quel particolare stato per cui il calore passa da un corpo agli altri con maggiore o minore facilità, dipende esclusivamente dalla forza viva media delle particelle del corpo, e che anzi, per lo meno nel caso degli aeriformi, quando due corpi sono alla stessa temperatura, le loro molecole hanno la stessa forza viva media, qualunque sia la loro massa. In quest'ordine d'idee se si batte con un martello contro una campana o contro un blocco di piombo, si ha nel primo caso un *suono*, cioè la forza viva del martello diviene energia vibratoria elastica della campana: mentre nel secondo caso il piombo si riscalda, cioè la forza viva del martello accresce l'energia vibratoria invisibile delle molecole del piombo.

Possiamo adunque dire che l'energia calorifica comunicata a un corpo si trasforma in energia meccanica relativa al lavoro esterno, in energia potenziale corrispondente al lavoro interno, e in forza viva molecolare corrispondente all'elevamento di temperatura. Le ultime due parti, insieme, aumentando l'*energia interna* del corpo, il cui ammontare totale ci è sconosciuto, ma di cui noi possiamo valutare le variazioni.

Nei solidi e nei liquidi, essendo piccola la dilatazione, il lavoro esterno dovuto al riscaldamento è trascurabile. Negli aeriformi poi le molecole sono sensibilmente sottratte a ogni mutua attrazione, cosicchè l'energia interna si riduce praticamente alla loro forza viva molecolare.

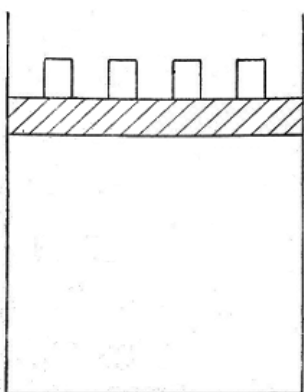


Fig. 17.

Ne risulta una conseguenza notevole riguardo al lavoro che un gas può eseguire nell'espandersi, e al lavoro necessario per comprimerlo. Si immagini un gas rinchiuso in un cilindro e limitato da uno stantuffo perfettamente mobile (fig. 17). La tendenza espansiva dell'aeriforme è compensata dalla pressione esterna, che ci converrà rappresentare con dei pesi disposti sopra lo stantuffo. Diminuendo alquanto i pesi medesimi, il gas si espanderà spingendo lo stantuffo, e solleverà i pesi rimanenti; eseguirà cioè un lavoro esterno. Se il gas fosse assimilabile a una molla compressa, il lavoro ottenuto sarebbe tutto diminuzione dell'energia potenziale elastica posseduta dalla molla. Ma poichè il gas non possiede energia potenziale interna, donde proviene il lavoro

esterno ottenuto? per il principio della conservazione dell'energia esso non può derivare che da una diminuzione dell'energia cinetica interna, cioè della forza viva molecolare, e perciò *il gas si dovrà raffreddare durante l'espansione e il conseguente sollevamento dei pesi*. L'esperienza conferma

questa previsione, e difatti i gas compressi nell'espandersi, con produzione di lavoro esterno, si raffreddano, come si è potuto accertare con mezzi opportuni.

Se, inversamente, aumentiamo i pesi gravanti sullo stantuffo, questo discenderà fino a che, per il diminuito volume, la pressione aumentata del gas faccia equilibrio alla nuova pressione esterna. Ma in questo processo i pesi tutti discendono, cioè la gravità compie un lavoro contro il gas, come farebbe contro una molla: e poichè il gas non possiede e non acquista energia potenziale interna, se ne dovrà aumentare la forza viva molecolare, cioè la temperatura. Ed effettivamente l'esperienza conferma che un gas si riscalda quando venga compresso.

La teoria cinetica dei gas ci permette di penetrare nel meccanismo di queste modificazioni della velocità molecolare per il moto dello stantuffo. E invero, finchè lo stantuffo discende, le molecole che urtano contro di esso rimbalzano con una velocità maggiore di quella con cui gli vennero incontro, mentre quando lo stantuffo si solleva le molecole che lo urtano lo accompagnano alquanto nella salita, cedendogli forza viva, e tornano indietro perciò con minore velocità.

13. I due calori specifici dei gas. — Risulta da quanto precede ancora una conseguenza importante. Se nel cilindro di sopra, che supponiamo contenga 1 gr. di gas, si impedisce allo stantuffo ogni movimento, e si scalda il gas di un grado a volume costante, occorrerà una certa quantità di calore, che sarà il *calore specifico a volume costante*. Ma se invece lo stantuffo è libero di salire, permettendo al gas di dilatarsi sotto una pressione costante, e si vuole ancora riscaldare il gas di 1°, evidentemente il calore richiesto dovrà essere maggiore, poichè oltre che ad accrescere come prima la forza viva molecolare, cioè la temperatura del gas, deve ancora servire a produrre il lavoro esterno di sollevamento dello stantuffo coi pesi sovrapposti. Cioè il *calore specifico a pressione costante* sarà maggiore di quello a *volume costante*, e la differenza deve dar luogo al lavoro esterno, in ragione di 1 caloria per ogni 4,18 joule di lavoro eseguito.

Or i due calori specifici sono effettivamente diversi, e se ne potè determinare il rapporto con dei metodi acustici che non possiamo qui riferire. Inoltre quello a pressione costante può essere misurato direttamente, come fece il Regnault, facendo circolare un peso noto di gas, riscaldato a una temperatura conosciuta, attraverso a un serpentino immerso nell'acqua di un calorimetro, e valutando le calorie a questa cedute. Sapendo il rapporto dei due calori specifici, e il valore di uno di essi, risultano entrambi noti; e quindi è nota la loro differenza, che si trasforma, per quanto si è visto, in lavoro esterno di dilatazione. Ma anche questo lavoro è conosciuto, poichè si sa qual'è la pressione, e qual'è la dilatazione che subisce per il riscaldamento di 1° un grammo di gas; si può quindi dedurre il peso che grava sullo stantuffo, di area nota, e il suo sollevamento per la variazione di temperatura.

Si può quindi calcolare quanti joule vengono prodotti da una caloria. Fu appunto così che Mayer eseguì la più antica determinazione dell'equivalente meccanico del calore, prima ancora delle esperienze del Joule, ottenendo all'incirca lo stesso risultato. Ciò prova che il lavoro si trasforma in calore, e il calore in lavoro, nella stessa misura, e costituisce perciò la giustificazione più soddisfacente del nostro criterio, di considerare cioè il calore come una forma di energia.

14. Il secondo principio o principio di Carnot. L'esperienza suddetta, che chiameremo di Mayer, permette adunque di trasformare il calore in lavoro. Ma è chiaro che essa non potrebbe servire per una trasformazione indefinita, poichè non si può indefinitamente aumentare la temperatura di un gas, e raccogliere il lavoro della indefinita espansione.

Noi potremmo però tenere il cilindro in un bagno ad alta temperatura T , fare espandere il gas col diminuire progressivamente i pesi disposti sullo stantuffo, con che del lavoro si va ricavando all'esterno, mentre il gas assorbe dal bagno calore, che ne conserva costantemente eguale a T la temperatura malgrado l'espansione; quindi portar via il cilindro dal bagno, avvolgerlo di sostanze perfettamente isolanti, e continuare a togliere pesi e a lasciare espandere il gas; con ciò nuovo lavoro sarà ottenuto all'esterno e il gas si raffredderà fino a una temperatura t ; poscia s'immergerà il cilindro in un bagno a temperatura t , e impiegando lavoro dall'esterno lo si comprimerà alquanto, con che sarà ceduto al bagno il calore di compressione; infine si avvolgerà il cilindro dello involucri isolante, si continuerà a comprimere il gas facendo lavoro, che riscalderà il gas; nè sarà difficile fare in modo che quando il gas avrà riacquisito la temperatura T del primo bagno, il suo

volume sia proprio quello iniziale. Queste operazioni potranno essere così indefinitamente proseguite, e si può dimostrare che il lavoro meccanico *ricavato* nelle due prime operazioni è maggiore di quello *impiegato* da noi nelle ultime due, cosicchè in totale, nel ciclo completo di operazioni, si è guadagnato lavoro, e se ne potrà guadagnare indefinitamente, spendendo calore.

A questo ciclo di operazioni, celebre nella storia della Termodinamica, si è dato il nome di *ciclo di Carnot*. Per mezzo di esso il primo bagno cede al gas una quantità di calore Q , mentre il gas ne restituisce al secondo bagno una quantità minore q . La differenza è l'equivalente del lavoro meccanico totale prodotto nel ciclo, in ragione di 1 caloria per ogni 4,18 joule.

Si vede da ciò che il primo bagno, la sorgente, a temperatura T ha ceduto la quantità di calore Q , e questa *non interamente* si è trasformata in lavoro, ma una parte q è rimasta non trasformata e si è dovuta riversare nel *refrigerante* (bagno a temperatura t).

Or per una produzione indefinita di lavoro non si può far a meno di ricorrere a processi analoghi, di cui il ciclo di Carnot, come si può dimostrare, è sempre il più vantaggioso. *Occorre, cioè, la presenza di due sorgenti a diversa temperatura, perchè il calore si trasformi in lavoro in modo indefinito*, e parte del calore che il corpo assorbe alla prima, quella di più alta temperatura, *deve* essere ceduta alla seconda, quella di temperatura più bassa.

Adunque *il calore può trasformarsi in lavoro solo quando una parte di esso discende da una temperatura più alta a una temperatura più bassa, come l'acqua delle cascate può eseguire lavoro solo scendendo di livello*¹. È questo il celebre principio di Carnot-Clausius, la cui portata è vasta almeno quanto quella del principio della conservazione dell'energia, per quanto ciò non possa rendersi evidente in un corso elementare. Esso limita enormemente l'efficacia delle macchine termiche, poichè, nella sua espressione più completa, esso dice ancora che la frazione di calore tolto alla sorgente di temperatura T , e che può convertirsi in lavoro, dipende solo dalle temperature T e t della sorgente e del refrigerante, e, qualunque sia il sistema o il corpo impiegato, non può mai superare un certo rapporto dipendente da quelle temperature.

Ma il 2° principio ha ancora delle conseguenze di maggiore significato. Anzitutto, associato col principio di Mayer, esso permette di prevedere, in tutti i particolari numerici più delicati, una serie estesissima di fenomeni nel campo della Termologia, dell'Elettrologia, della Chimica, e in generale in tutti i casi in cui s'abbia da fare con processi che implicino produzione o assorbimento d'una forma qualunque d'energia.

Non meno importante è il suo significato filosofico. E invero il calore ha una tendenza spontanea a passare dai corpi caldi ai corpi freddi, per conduzione, irradiazione e trasporto; or si è potuto dedurre dal 2° principio che *spontaneamente il passaggio inverso non può mai aver luogo*, e noi possiamo provocarlo solo a condizione di sciupare lavoro per trasformarlo in calore. Ne segue che la tendenza del calore a scendere di livello può essere da noi sfruttata con l'obbligarlo a trasformarsi, in parte, in lavoro; ma il passaggio inverso, per ristabilire il processo indefinitamente, ci costerebbe, in pratica, più lavoro di quanto se ne ricavò nella discesa.

Che se noi non avessimo disponibili sorgenti a temperature diverse, ma regnasse nell'Universo una temperatura uniforme, nessuna trasformazione di calore in lavoro potrebbe aver luogo. E poichè questa trasformazione è sottoposta a tale necessità, mentre la trasformazione inversa del lavoro o delle altre energie in calore avviene integralmente, spontaneamente e senza alcuna restrizione; e poichè ancora, come si è detto essere una conseguenza immediata del secondo principio, mai il calore può passare dai corpi freddi ai corpi caldi spontaneamente, mentre il passaggio inverso ha sempre luogo in modo autonomo e continuo (esiste cioè una tendenza naturale al livellamento delle temperature) ne risulta che i fenomeni naturali hanno in prevalenza un andamento il cui senso è perfettamente determinato; è quel senso, cioè, che facilita il livellamento delle temperature, e che converte tutte le altre energie in quella termica, la quale è la più deteriorabile, per la suddetta tendenza al livellamento, e la meno atta a ulteriori trasformazioni. L'Universo si avvia perciò verso uno stato nel quale le diverse energie esistenti si saranno tutte

¹ Si noti che l'acqua resta invariata, come massa, dopo la caduta, mentre il calore nel discendere di livello termico, si distrugge, in parte, convertendosi in lavoro meccanico.

trasformate in calore, senza dislivelli di temperature; cosicchè le ulteriori trasformazioni d'energia saranno impossibili, e con esse sarà impossibile ciò che potrebbe definirsi la vita della Natura.

È questo il principio della *degradazione* dell'energia, col quale il Genio dell'Uomo ha sentenziato la morte futura del Mondo, studiando le leggi che adesso lo reggono, e supponendone eterna la validità.

15. Sorgenti chimiche. Le reazioni chimiche ci forniscono la massima parte del calore che ci occorre nei bisogni della vita. Si tratta quasi sempre di composti organici, a base di carbonio e d'idrogeno, che portati in un punto alla *temperatura d'ignizione*, si combinano più o meno lentamente con l'ossigeno dell'aria, sviluppando calore a temperatura elevata. L'energia termica ottenuta può attribuirsi a un' *energia potenziale di affinità chimica* posseduta dagli atomi di carbonio o di idrogeno per quelli dell'ossigeno. La quantità di calore svolta nella combustione di un grammo di combustibile, cioè il suo *potere calorifico*, potrà esser misurata esattamente per mezzo di speciali calorimetri. E si son potute dimostrare inoltre le seguenti leggi, che del resto sono una conseguenza del principio della conservazione dell'energia :

I. La quantità di calore totalmente sviluppata in una reazione chimica, alla quale prendon parte pesi determinati di reagenti, è indipendente dalla rapidità con cui la reazione si compie.

Così bruciando 1 gr. di carbonio nell'aria o nell'ossigeno puro, si ottiene nel secondo caso una temperatura più alta, ma la quantità totale di calore svolta è sempre, all'incirca, 8000 calorie.

II. Se il composto ottenuto può in qualche modo esser decomposto, bisogna restituirgli, perchè ciò avvenga, il calore svolto nella sua formazione, o una quantità di energia equivalente.

Così 1 gr. d'idrogeno, bruciando nell'aria, forma 9 gr. d'acqua sviluppando 34000 calorie; ma l'acqua ottenuta può essere decomposta con la corrente elettrica in idrogeno e ossigeno. Per decomporre adunque 9 gr. d'acqua occorrerà impiegare $34000 \times 4,18$ joule di energia elettrica.

I combustibili vegetali o fossili, i soli impiegati nella pratica, rappresentano una grande riserva di energia chimica, da noi sfruttata ogni giorno, ma che ogni giorno si rifà nelle piante che popolano la superficie terrestre. Il carbonio che esse contengono, e che si va perciò lentamente accumulando nel loro accrescimento, ha origine dall'anidride carbonica dell'aria, che viene decomposta dalla luce in presenza della clorofilla. E per quanto si è detto, ogni grammo di carbonio fissato sulle piante deve corrispondere al lavoro di $8000 \times 4,18$ joule compiuto dal Sole.

Or poichè la vita animale alla superficie terrestre si compie solo mercè gli alimenti, che son costituiti da sostanze animali a vegetali, e l'energia animale proviene, come vedremo, dall'energia chimica degli alimenti ingeriti, possiamo concludere che la sorgente della vita alla superficie terrestre è il Sole.

16. Energia animale. Esaminiamo più davvicino la vita animale che è sorgente insieme di calore e di lavoro meccanico (il lavoro muscolare).

Risulta dalle ricerche di fisiologia che il calore animale è dovuto alle lente combustioni compiute dal sangue ricco d'ossigeno, e che irrorata da ogni parte le cellule viventi. I prodotti di questa combustione, l'anidride carbonica e l'acqua, vengono emessi nella respirazione, mentre il sangue si arricchisce di nuovo ossigeno.

Il carbonio e l'idrogeno, che son continuamente bruciati in queste combustioni, provengono dagli alimenti ingeriti, con dei processi su cui non possiamo insistere. Diremo però che con opportune esperienze, eseguite collocando degli animali entro un calorimetro, si è potuto stabilire che il calore svolto è proprio quello che si poteva prevedere tenuto conto delle combustioni che hanno luogo, come può farsi misurando l'anidride carbonica e l'acqua espirate, o anche il peso degli alimenti ingeriti, la variazione di peso dell'animale e il rispettivo potere calorifico. Noi possiamo quindi dà questo punto di vista paragonarci a un fornello, nel quale gli alimenti van bruciando lentissimamente.

Negli animali a temperatura costante, come l'uomo la cui temperatura è sempre 37° qualunque siano le condizioni ambientali, hanno poi luogo altri processi di natura complicata, quali l'evaporazione cutanea, che determinano un raffreddamento continuo; e la regolazione del calore

perduto per evaporazione e per irraggiamento si compie meravigliosamente in modo tale da compensare il calore svolto nelle combustioni chimiche, lasciando inalterata la temperatura.

L'energia muscolare ha la medesima origine del calore animale. Si è potuto invero, in alcune esperienze eseguite a Ginevra, introdurre un uomo in un grande calorimetro, e misurare il calore da lui svolto nelle condizioni di riposo, o durante la produzione di un lavoro meccanico, quale la rotazione di una macchina dinamo-elettrica, che alimentava una lampadina disposta fuori del calorimetro. Anche in tal caso si dimostrò che il lavoro meccanico era prodotto a spese dell'energia chimica, poichè il calore svolto nel calorimetro si trovò inferiore a quello dovuto alle combustioni interne, in ragione appunto di 1 caloria per ogni 4 joule circa di lavoro prodotto. Naturalmente la difficoltà di simili misure non consente una molto rigorosa verifica numerica.

17. Calore solare. Abbiamo visto che la vita alla superficie terrestre, nei fenomeni energetici cui dà luogo, ripete la sua origine dell'energia irradiata dal Sole. Nè diversa provenienza ha l'energia potenziale di gravità delle masse d'acqua che discendono dalle montagne, e che viene utilizzata come energia meccanica nelle ruote ad acqua, o nelle turbine. E in vero è il calore proveniente dal Sole che vaporizza l'acqua del mare; il vapore si ricondensa poi in pioggia o in neve, che si accumula nelle alte montagne, mentre il calore del Sole la ridiscioglie e la gravità riconduce l'acqua al mare.

La quantità di calore che la Terra riceve dal Sole è enorme, e può essere determinata per mezzo di speciali calorimetri, detti *pireliometri*. Si potè con essi stabilire che, un metro quadrato della superficie terrestre, esposto normalmente ai raggi del Sole, riceve circa 400 calorie a ogni minuto secondo, di cui una parte viene assorbita dall'atmosfera. Se questo calore potesse integralmente convertirsi in lavoro, un proprietario di un tratto quadrato di terra, con 10 metri di lato, avrebbe disponibile una sorgente d'energia che raggiungerebbe la potenza di 200 cavalli quando il Sole lo illumina normalmente.

E se si riflette che una tale quantità di calore viene dal Sole irradiata in tutte le direzioni, per ogni metro quadrato disposto alla nostra distanza dal Sole, si riconosce subito come la quantità totale di calore emessa dall'astro supera ogni nostra immaginazione.

Eppure questo fenomeno si compie da un numero sterminato di secoli, nè pare che accenni a diminuire d'intensità, poichè dalle più antiche epoche storiche a oggi non risulta alterata la distribuzione della fauna e della flora alla superficie terrestre, il che si sarebbe certo prodotto se il Sole si fosse alquanto raffreddato, o se la sua emissione fosse per qualsiasi causa diminuita.

Possiamo quindi domandarci qual'è la origine di questa enorme provvista di calore nel sole, e quale la causa che la conserva sensibilmente invariata.

A questo proposito sono state discusse varie ipotesi. Si è dovuta intanto scartare l'idea che nel Sole abbia luogo una colossale combustione, poichè se ne conosce la massa, e anche se questa fosse costituita solo di idrogeno e di ossigeno nelle proporzioni necessarie alla combustione, il Sole sarebbe già spento da un pezzo.

Noi riferiremo solo la teoria di Helmholtz che attribuisce l'origine del calore solare a una condensazione di un'enorme massa caotica gravante verso un centro, con la conseguente trasformazione dell'energia potenziale in calore. Ammettendo che questa condensazione continui tuttora lentamente, e che perciò il Sole si vada sempre più riducendo di diametro, la produzione di calore sarebbe continua, com'è continua la diminuzione d'energia potenziale interna della massa solare; per compensare le perdite, dovute alla emissione sensibilmente costante di calore, la diminuzione progressiva del diametro solare calcolata risulta tanto piccola da non potersi mettere in evidenza coi nostri mezzi astronomici.

Fusione e solidificazione.

18. Temperatura di fusione. — Alcune sostanze, come la cera, riscaldate progressivamente, cominciano col divenire pastose, e poi semifluidi, finchè si liquefanno del tutto. Altre passano direttamente, col calore, dallo stato solido allo stato liquido.

Questo passaggio si chiama *fusione*; invece la *solidificazione* ha luogo quando un liquido, convenientemente raffreddato, assume lo stato solido.



Fig. 18.

La fusione avviene, per ciascuna sostanza, a una temperatura determinata, detta *temperatura di fusione*, che resta costante finchè tutta la sostanza presente si è liquefatta; il calore comunicato in questo intervallo alla sostanza, che serve solo a fonderla e non ne eleva la temperatura, dicesi *calore di fusione*, e va impiegato a eseguire il lavoro interno di disgregamento molecolare. Se si immerge perciò un termometro in una miscela di ghiaccio e acqua, e si comunica ad essa calore, del ghiaccio fonderà; se si sottrae invece calore, parte dell'acqua si solidificherà; ma finchè ghiaccio e acqua sono insieme presenti, la temperatura sarà costantemente di zero gradi. Lo stesso ha luogo per tutti i corpi che, passando bruscamente dallo stato solido al liquido, hanno una ben definita temperatura di fusione.

La quantità di calore richiesta dal ghiaccio a 0° per convertirsi in acqua a 0° è molto grande, circa 80 calorie per ogni grammo; la stessa quantità di calore basterebbe per portare all'ebollizione, dalla temperatura di 20°, un egual peso d'acqua. E così per abbassare da 20° a 0° la temperatura di 1 Kg. d'acqua basteranno 250 gr. di ghiaccio a zero gradi.

La temperatura di fusione d'una sostanza coincide con la sua temperatura di solidificazione. Ma si verifica talvolta un'anomalia, per cui raffreddando un liquido lentamente fuori il contatto dell'aria e senza scosse, si può oltrepassare alquanto la temperatura di solidificazione, senza che questa abbia luogo; il fenomeno si chiama *soprafusione*. Per mezzo di una scossa brusca, o dell'introduzione di un pezzetto del solido, si provoca la solidificazione, e allora il calore di fusione svolto dalla sostanza solidificata eleva la temperatura della massa, naturalmente non al di là della temperatura di fusione. Serve bene per la dimostrazione del fenomeno l'apparecchio della fig. 18 nel quale il bulbo di un termometro a mercurio è circondato da un ampolla in parte piena d'acqua che fu fatta bollire prima della chiusura dell'ampolla medesima, in modo da cacciar via l'aria. Introducendo l'apparecchio in un miscuglio di sale e neve si raggiunge facilmente una temperatura inferiore a zero. Portando via l'apparecchio dal miscuglio si

trova appunto che l'acqua è ancora liquida ma dandogli una scossa si solidifica in parte, e la temperatura rimonta a 0°.

Nello specchio che segue sono registrati i punti di fusione di alcune sostanze

<i>Platino</i>	1775°	<i>Stagno</i>	223
<i>Ferro</i>	1600	<i>Zolfo</i>	113
<i>Acciaio</i>	1350	<i>Cera bianca</i>	63
<i>Rame</i>	1054	<i>Burro</i>	31
<i>Oro</i>	1045	<i>Ghiaccio</i>	0
<i>Argento</i>	954	<i>Mercurio</i>	— 39,4
<i>Zinco</i>	412	<i>Anidr. carbonica</i>	— 57,5
<i>Piombo</i>	322	<i>Alcool ass.</i>	— 130

19. Variazioni di volume nella fusione. Rigelo. — Il ghiaccio galleggia nell'acqua; ciò prova che ha minore densità e che perciò l'acqua nel solidificare aumenta di volume. L'opposto avviene per quasi tutti gli altri corpi, come lo zolfo, la cera, la paraffina, il piombo, ecc.

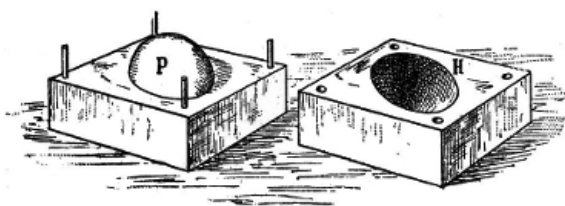


Fig. 19.

Applicando i principii della termodinamica a questo fenomeno della variazione di volume nella fusione, i fratelli Thomson poterono prevedere e dimostrare sperimentalmente che sotto forti pressioni la temperatura di fusione deve essere più bassa per le sostanze come il ghiaccio, e più alta per le altre. Così per l'acqua la teoria prevede, e

l'esperienza confermò, che l'abbassamento del punto di fusione è di circa 74 diecimillesimi di grado per ogni atmosfera di pressione esercitata. A mille atmosfere l'acqua sarà perciò ancora liquida a 7° sotto zero; Mousson è riuscito ad averla liquida fino a -18°, comprimendola sufficientemente. Queste enormi pressioni si esercitano da sé in un recipiente robusto ermeticamente chiuso e pieno d'acqua, qualora lo si esponga a un freddo intenso, poichè la congelazione non può avvenire che con un forte aumento di volume (circa l'otto per cento), cosicchè l'acqua eserciterà, per la tendenza a solidificare e per l'impossibilità di trovare lo spazio necessario, una enorme pressione sulle pareti e resterà liquida anche a temperature molto basse, quando non riesca a fendere il recipiente, nel qual caso si solidifica solo all'atto della consentita espansione.

L'apparente plasticità del ghiaccio, per cui questo corpo si lascia modellare in una forma di bosso sottoposta a forti pressioni (fig. 19) e si lascia tagliare da un filo metallico tirato da pesi, risaldandosi dopo il passaggio del filo (fig. 20) si spiegano con l'influenza della pressione sul punto di fusione. Nei punti direttamente premuti, ove la forza per unità di superficie è molto grande, il ghiaccio a 0° si liquefa, poichè si trova a temperatura superiore a quella di fusione relativa alla pressione cui è sottoposto. L'acqua prodotta sfugge alla compressione passando al di sopra del filo (fig. 20) o nelle cavità, della fig. 19, ove rigela.

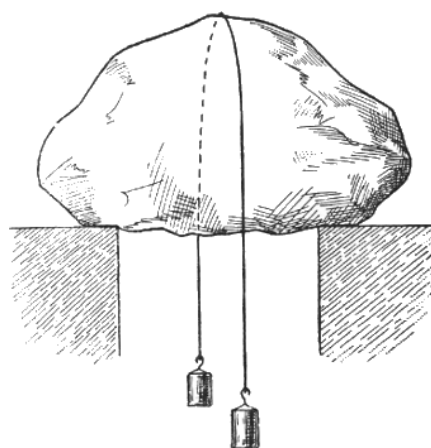


Fig. 20.

20. Soluzione. — Miscugli frigoriferi. — Abbiamo detto, a proposito della pressione osmotica, che le particelle del corpo sciolto possono considerarsi, in seno alla soluzione, liberamente vaganti come le molecole di un gas.

La soluzione di un solido deve quindi determinare il rallentamento dei legami tra le sue molecole, e richiedere la spesa di una certa quantità di energia, o di calore, come la fusione.

In realtà il calore è sottratto al solvente, cosicchè la soluzione è in generale accompagnata da un abbassamento di temperatura, a meno che il calore svolto da un'eventuale azione chimica tra i due corpi non determini un fenomeno inverso. È interessante in proposito il comportamento della neve introdotta nell'acido solforico; se la prima è in piccola quantità, il calore prodotto dalla idratazione dell'acido predomina sul calore sottratto dalla fusione della neve, e il miscuglio si riscalda notevolmente; l'opposto avviene se si versa poco acido, già alquanto annacquato, in molta neve; si possono allora ottenere delle temperature molto al di sotto di 0°. Qualcosa di analogo avviene mescolando due solidi, come il ghiaccio e il sale, che han la tendenza a sciogliersi l'uno nell'altro; si ha allora la fusione rapida di una parte del miscuglio, e la miscela dei due solidi e della soluzione ottenuta si porta a una temperatura notevolmente bassa.

Ma perchè questo avvenga è indispensabile che una parte dei solidi in presenza si sia fusa, cioè che la soluzione si formi, e allo stato liquido. Nè dobbiamo sorprenderci che una soluzione liquida di acqua e sale possa esser presente alle basse temperature raggiunte col miscuglio dei due solidi, poichè *la presenza della sostanza disciolta abbassa il punto di congelamento del solvente, e tanto più quanto più concentrata è la soluzione.* E poichè appena comincia il congelamento, *si solidifica il solo solvente*, la soluzione che resta si va facendo sempre più concentrata, e il suo punto di congelamento si va perciò sempre più abbassando, fino a che, raggiunta la saturazione, se si congela ancora del solvente, si precipita insieme il soluto; la massa cioè precipita con composizione costante, e la soluzione residua è pure di costante concentrazione. Per una soluzione di acqua e nitrato ammonico questa solidificazione concomitante del solvente e del soluto ha luogo a $-17^{\circ},5$.

Una legge importante sull'abbassamento della temperatura di congelamento delle soluzioni è quella che lega gli effetti dovuti a sostanze diverse sciolte nello stesso solvente. Si ha cioè che le soluzioni contenenti per litro ugual numero di molecole del soluto hanno la stessa temperatura di congelamento.

Sono in queste condizioni le soluzioni contenenti un peso di sostanza sciolta proporzionale al peso molecolare della sostanza medesima (Vol. I, § 94). E così sciogliendo in un litro d'acqua M grammi di una sostanza che ha il peso molecolare M , si ha l'abbassamento di $1^{\circ},85$ nel punto di solidificazione, qualunque sia la sostanza disciolta.

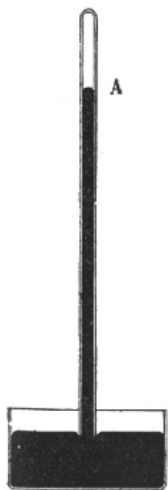


Fig. 21.

21. **Leghe metalliche.** — Possono essere considerate come soluzioni solide di un metallo in un altro; il loro punto di fusione è più basso di quello dei metalli che le compongono, e così si possono formare delle leghe di bismuto, stagno, piombo e cadmio che fondono a circa 70° , mentre fra questi metalli lo stagno, che ha la temperatura di fusione meno elevata, non fonde che a 226° .

Evaporazione e liquefazione.

22. **Vapori saturi.** — La trasformazione dallo stato liquido allo stato aeriforme avviene a tutte le temperature e dicesi *evaporazione*. Ci converrà studiarla, in principio, nel vuoto, o meglio fuori della presenza dell'aria. E a tal fine converrà ricorrere a una canna torricelliana piuttosto larga, disposta come nell'esperienza per la misura della pressione atmosferica (fig. 21), e far pervenire una piccola goccia di un liquido, per es. alcool, sotto l'estremo inferiore aperto

pescante nel mercurio. La bollicina, monterà su fino alla superficie libera del mercurio nella canna, si trasformerà in vapore invisibile, e determinerà un piccolo abbassamento della colonna di mercurio, cioè eserciterà una pressione sul mercurio stesso, eguale all'abbassamento osservato. Se ora, sollevando o abbassando la canna immersa in un pozzetto profondo, si fa variare il volume concesso al vapore, si troverà che ne varia insieme la pressione, come per un gas, seguendosi all'incirca la legge di Boyle.

Facendo pervenire nuove bollicine di alcool entro la camera torricelliana, la depressione della colonna aumenta ancora, fino a che raggiunge un valore costante e allora il nuovo liquido introdotto non si evapora più, ma forma uno strato al di sopra del mercurio entro la canna. Si dice allora che il vapore della camera è *saturo*. Esso è caratterizzato da questa proprietà fondamentale: *finchè il vapore è in presenza del suo liquido, la sua pressione è costante, qualunque sia il volume che gli è consentito di occupare*. Cosicché portando in alto o in basso la canna, per quanto lo consente la forma del pozzetto, il dislivello del mercurio interno sull'esterno resta costante; all'aumentare del volume una parte del liquido si vaporizzerà, al diminuire del volume parte del vapore si condenserà, mentre il vapore che resta conserva la stessa pressione. Solo quando la canna potesse tanto sollevarsi da trasformare in vapore tutto il liquido presente, per un ulteriore aumento di volume il vapore diverrebbe *non saturo*, e d'allora in poi la sua pressione diminuirebbe al crescere del volume, come per un gas.

Nell'apparecchio della fig. 22 le tre canne B , C , D son preparate come nell'esperienza precedente, ma con liquidi diversi: acqua, alcool, etere. I vapori saturi di questi liquidi hanno *tensioni massime* diverse, e difatti le depressioni rispettive, valutate al di sotto del piano orizzontale Q relativo alla canna A che fa da barometro, cioè le lunghezze QP , QN , QM che rappresentano quelle tensioni, son molto diverse.

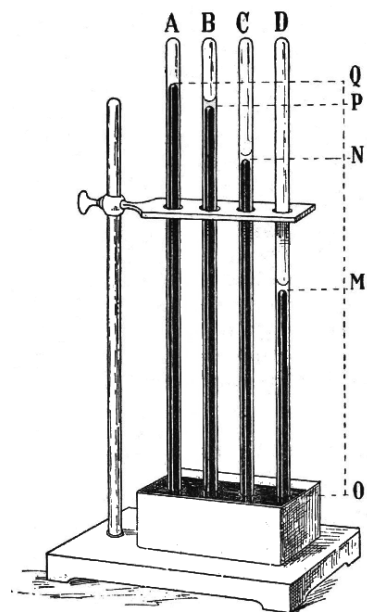


Fig. 22.

23. Influenza della temperatura. — *La tensione massima dei vapori saturi aumenta rapidamente con la temperatura.* Le misure sono state fatte con l'apparecchio della fig. 23, nel quale le due canne *B* e *D*, di cui la prima fa da barometro e la seconda contiene il vapore saturo, sono circondate da un manicotto *A* contenente un liquido riscaldato dal di sotto. Quando la pressione del vapore raggiunge la pressione atmosferica, sparisce la colonna di mercurio nella canna *D*; e se si vuole studiare il fenomeno a temperature più alte, e quindi misurare le pressioni superiori a quella atmosferica, si può ricorrere all'apparecchio della fig. 24, che si introduce in un bagno capace di produrre le temperature volute; in tal caso il dislivello del mercurio nei due rami, *accresciuto* della pressione atmosferica, dà la tensione del vapore. Con metodi analoghi sono state ottenute per l'acqua le tensioni registrate nella tabella seguente:

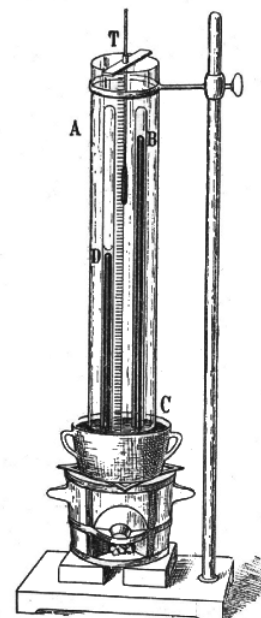


Fig. 23.



Fig. 24.

TENSIONE MASSIMA DEL VAPORE ACQUEO IN CENTIMETRI DI MERCURIO

Temp.	Tens.	Temp.	Tens.	Temp.	Tens.	Temp.	Tens.
- 30°	0,0320	11	0,9792	26	2,4988	85	40,304
- 20	0,0927	12	1,0457	27	2,6505	90	52,545
- 10	0,1400	13	1,1162	28	2,8101	95	63,378
- 5	0,3113	14	1,1908	29	2,9782	100	76,000
0	0,4600	15	1,2699	30	3,1548	105	90,641
1	0,4940	16	1,3536	35	4,1827	110	107,537
2	0,5302	17	1,4421	40	5,4906	115	126,941
3	0,5687	18	1,5357	45	7,1391	120	149,128
4	0,6097	19	1,6346	50	9,1982	125	174,388
5	0,6534	20	1,7391	55	11,7478	130	203,028
6	0,6998	21	1,8495	60	14,8791	140	271,763
7	0,7492	22	1,9659	65	18,6945	150	358,123
8	0,8017	23	2,0888	70	23,3093	160	465,162
9	0,8574	24	2,2184	75	28,8517	170	596,166
10	0,9165	25	2,3550	80	34,4643	180	754,639

24. Principio della parete fredda. — I recipienti *A* e *B* della figura 25, comunicanti per mezzo di un tubo nella parte superiore, contengano lo stesso liquido: e lo spazio restante, come anche il tubo, siano privi d'aria. La temperatura del liquido sia diversa nei due recipienti, per es. di 50° in *A*, di 10° in *B*. Intercettando la comunicazione tra i due recipienti, il vapore sarà saturo in *A* e in *B*, ma nei due recipienti regnerà una pressione diversa: così se il liquido è acqua, si avrà vapore alla pressione di circa 9 cm. in *A*, e di circa 1 cm. in *B*. Se ora si stabilisce la comunicazione attraverso al tubo interposto, per le

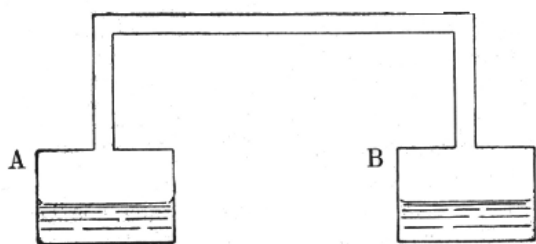


Fig. 25.

proprietà note dei fluidi una corrente continua di vapore si stabilirà nel tubo da *A* verso *B*; e se le temperature dei due liquidi son mantenute costanti, avverrà una continua evaporazione in *A* e una continua condensazione o liquefazione in *B*, fino a che tutto il liquido di *A* si troverà in *B*, e la pressione abbia in entrambi i recipienti il valore che corrisponde alla temperatura della parte più fredda. L'equilibrio è adunque raggiunto quando in tutti i punti il vapore ha la pressione che spetta alle sue parti più fredde.

Incontreremo in seguito delle importanti applicazioni di questo principio, detto della *parete fredda*.

25. **Caso in cui son presenti insieme un gas e un vapore.** — Quando nell'ambiente ove il vapore si forma è presente anche un gas, come l'aria, l'evaporazione ha luogo più lentamente; ma alla fine la pressione esercitata dal miscuglio è la somma di quelle che il vapore e il gas eserciterebbero separatamente, se da soli occupassero l'intero volume della miscela. Se adesso si fa variare il volume della miscela, e il vapore è sempre in presenza del suo liquido, la pressione totale diverrà differente, perchè resta costante la parte dovuta al vapore, mentre varia, secondo la legge di Boyle, quella dovuta al gas. Questa *legge dei miscugli* vale solo se tra il gas e il vapore, o anche tra i due vapori, non si esercitano azioni chimiche.

26. **Meccanismo dell'evaporazione. Calore di vaporizzazione.** — Si immagini un cilindro chiuso da uno stantuffo mobile, e contenente un liquido e il suo vapore (fig. 26); questo premerà sulla faccia inferiore dello stantuffo con una forza eguale alla pressione massima corrispondente alla temperatura del vapore.

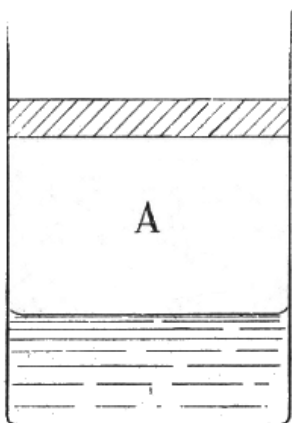


Fig. 26.

Come nel caso dei gas la pressione del vapore si potrà attribuire al movimento delle molecole contro le pareti; inoltre per spiegare la formazione del vapore si può ammettere che le molecole del liquido, dotate anch'esse di movimento, giungendo alla superficie libera sfuggano in parte all'attrazione del liquido, e invadano lo spazio soprastante *A*. Inversamente le molecole del vapore liberamente vaganti in questo spazio, quando vengono a battere contro la superficie del liquido, potranno tornare a far parte di questo, e il regime di saturazione sarà raggiunto quando un egual numero di molecole passa nello stesso tempo dal liquido al vapore, e viceversa. Se ora si solleva lo stantuffo, aumentando con ciò il volume concesso al vapore, gli urti delle molecole di questo contro il liquido saranno, per poco, meno frequenti; e perciò prevarrà il numero delle molecole che passano dal liquido al vapore, finchè l'equilibrio sarà nuovamente raggiunto quando il numero di molecole per centimetro cubico nello spazio *A* sarà divenuto lo stesso di prima. Dovrà quindi essere costante la pressione esercitata dal vapore, qualunque sia il suo volume, come appunto si trova con l'esperienza.

Se ora prendiamo a considerare i fenomeni energetici che hanno luogo quando, per il sollevamento dello stantuffo, altro liquido si vaporizza, dovremo osservare che il vapore compie un lavoro, accompagnando con la sua pressione lo stantuffo che si solleva; e che inoltre, perchè il liquido si trasformi in vapore, deve anche essere compiuto un lavoro interno per liberare le molecole dai legami di coesione che nei liquidi sono ancora sensibili. *L'energia necessaria viene sottratta al liquido, che nell'evaporazione si va progressivamente raffreddando.*

In realtà, se si tengono per qualche tempo in una stanza ventilata un recipiente chiuso e una bacinella, entrambi con acqua comune, si potrà constatare che l'acqua della bacinella è più fredda, poichè l'evaporazione ha luogo in modo continuo, l'aria non giungendo a saturarsi per la ventilazione. La temperatura dell'acqua nella bacinella sarà tale che il calore che essa riceve dall'ambiente compensi quello che perde nell'evaporazione.

Per la stessa ragione versando sul bulbo di un termometro un liquido facilmente volatile, come l'etere, la colonna di mercurio si abbassa rapidamente; il freddo prodotto in simili condizioni può esser facilmente avvertito anche versando l'etere sulla nostra mano.

Se poi si facilita l'evaporazione col vuoto della macchina pneumatica, il raffreddamento diviene intenso anche con l'acqua, specialmente se si ha cura di assorbire rapidamente i vapori che si van formando, per mezzo di una sostanza essiccante come l'acido solforico. Si può ottenere in tal modo perfino la solidificazione dell'acqua.

Il calore assorbito nella vaporizzazione dei liquidi è stato misurato con appositi metodi calorimetrici; esso dipende dalla temperatura alla quale ha luogo la trasformazione. Si è trovato così che per vaporizzare un grammo d'acqua occorrono a zero gradi 606 calorie e a 100 gradi 537 calorie. Dato il valore molto grande del calore di vaporizzazione, si capisce subito come, avendo sotto la macchina pneumatica 1000 gr. d'acqua a zero gradi, basta teoricamente che se ne vaporizzino circa 117 gr. perchè gli altri 883 gr. congelino.

La fabbricazione industriale del ghiaccio utilizza appunto il freddo prodotto dalla evaporazione di liquidi facilmente volatili. Il calore restituito dal vapor d'acqua nella condensazione è poi utilizzato nei caloriferi a vapore.

27. **Ebollizione.** Nelle pareti di un recipiente che contiene un liquido son sempre presenti delle minutissime bollicine d'aria, ove si troverà pure il vapore saturo del liquido. Col comunicargli calore, le bollicine andranno aumentando di volume, poichè cresce la pressione del vapore, e la bolla deve dilatarsi tanto che la diminuzione della pressione parziale dell'aria, per l'aumento di volume, compensi l'accrescimento della pressione del vapore; e invero la pressione totale deve essere sensibilmente eguale alla pressione dominante alla superficie del liquido, e da questo trasmessa. Tenendo conto di ciò si può facilmente calcolare, (in base ai valori della pressione massima del vapor d'acqua), che una bollicina sottoposta alla pressione di 76 cm. reagisce ad essa, a 20°: per 1,7 cm. con la pressione del vapore, e per 758,3 cm. con la pressione dell'aria. Se adesso si eleva la temperatura fino al valore 99°.5, la pressione del vapore diviene 74,6 cm., qualunque sia il volume della bolla; e quindi quella dell'aria deve diventare solo 1,4 cm. Perchè questo avvenga la bollicina deve acquistare un volume circa 700 volte maggiore, tenuto conto dell'accrescimento di temperatura. Che se si riscalda l'acqua fino alla temperatura di 100°, con che la tensione del vapore eguaglia *da sola* la pressione esterna di 76 cm, la bolla si gonfierà senza limite, a spese del vapore che si va in essa formando, e allora l'adesione non basterà più a trattenerla sulla parete del vaso, ma essa sarà trascinata verso l'alto, dalla spinta voluta dal principio d'Archimede, fino ad aprirsi all'aria libera. Lo stesso avverrà di tutte le bollicine di cui è cosparsa la parete del vaso: il liquido presenterà quello svolgimento tumultuoso che noi esprimiamo dicendo che esso *bolle*.

Nè la temperatura potrà ulteriormente montare, poichè la grande quantità di vapore che si va formando sottrae continuamente il calore che il fornello comunica al liquido; secondo che questo ne riceve più o meno, la vaporizzazione si compirà più o meno rapidamente.

Siamo così riusciti a prevedere le due importanti leggi dell'ebollizione, che l'esperienza conferma:

1. *Ogni liquido bolle a quella temperatura alla quale la pressione del suo vapore saturo uguaglia la pressione esterna.*

2. *Durante l'ebollizione la temperatura resta costante.*

A conferma della interpretazione data del fenomeno dell'ebollizione citeremo il fenomeno del *soprariscaldamento* dei liquidi, per cui quando in seguito a una prolungata ebollizione in un vaso *si è scacciata via l'aria aderente*, e, sospeso per poco il riscaldamento, lo si ricomincia di nuovo cautamente, può *oltrepassarsi la temperatura di ebollizione* senza che questa abbia luogo; mentre essa si determina improvvisamente, e in modo tumultuoso, appena si porti in seno al liquido un corpo poroso, ove siano perciò annidate molte bollicine di aria. La temperatura ridiscende subito al suo valore normale.

Che poi la temperatura d'ebollizione dipenda dalla pressione, si suole dimostrare con svariatissime esperienze. Noi citeremo quella per cui sotto la campana della macchina pneumatica si può facilmente veder bollire dell'acqua anche alla temperatura di 50°, e dell'etere a temperatura ordinaria. Viceversa sotto pressioni superiori all'atmosferica l'acqua bolle al di sopra di 100°; così nelle caldaie delle macchine a vapore, funzionanti alla pressione (per es.) di 10 atmosfere, l'acqua bolle a una temperatura alquanto superiore a 180°.

È perciò che nella determinazione del punto 100 dei termometri bisogna tener conto della pressione atmosferica; un centimetro di variazione in questa richiede una correzione di circa 4 decimi di grado nell'indicazione del termometro. Per la stessa ragione sulle alte montagne, ove la pressione atmosferica è notevolmente inferiore a 76 cm, l'acqua bolle a una temperatura alquanto al di sotto di 100°; così sul Monte Bianco, ove la pressione è di circa 42 cm, l'ebollizione ha luogo a 84°.

Infine la temperatura di ebollizione si innalza per la presenza di sostanze disciolte, poichè queste abbassano la tensione di vapore del solvente. Così una soluzione di sal marino in acqua, al 40 %, bolle a 108°.

28. **Igrometria.** — L'aria atmosferica, per l'evaporazione delle acque del mare e dei corpi umidi esistenti alla superficie terrestre, contiene sempre una certa quantità di vapore, essenzialmente variabile. Si indichi con A la quantità di vapore contenuta in un certo volume e con B la quantità che dovrebbe esservi contenuta nello stato di saturazione: il rapporto $\frac{A}{B}$ dicesi *umidità relativa* nelle condizioni considerate. Si può dimostrare poi, sulla base delle proprietà dei vapori, che quel rapporto è uguale al rapporto $\frac{f}{F}$ della tensione attuale f del vapore per la tensione massima F relativa alla temperatura dell'ambiente. Si chiamano *igrometri* alcuni strumenti che servono a misurare quel rapporto, cioè l'umidità relativa o lo *stato igrometrico* dell'aria.

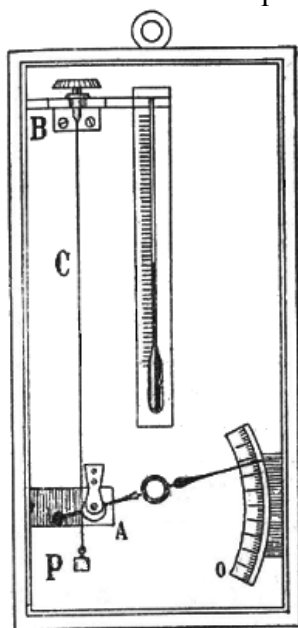


Fig. 27.

Ce n'è degli empirici, come l'igrometro a capello (fig. 27), fondato sugli allungamenti o le contrazioni che subisce un capello disteso a seconda dell'umidità atmosferica, e che si traducono, per l'avvolgimento del filo su una carrucola A , in spostamenti d'un indice su un arco graduato. Questo apparecchio è più un igroscopio che un igrometro; poichè non c'è alcuna relazione semplice tra le sue indicazioni e l'umidità relativa.

È invece molto esatto l'*igrometro a condensazione* perfezionato dal Prof. Chistoni. In esso una sottile lamina di ottone dorato chiude verticalmente una scatola metallica più piccola, ove dell'etere si evapora, più o meno rapidamente, sotto l'azione di una corrente d'aria, raffreddando così la lamina e il termometro che ne segna la temperatura.

La quantità di vapore esistente nella stanza non basta a saturare l'ambiente, ma basterebbe se la temperatura fosse sufficientemente abbassata. Questo avviene appunto dell'aria in contatto con la lamina che si va progressivamente raffreddando: si raggiunge cioè la saturazione, e il vapore, per il principio della parte fredda, si condensa sulla lamina appannandola lievemente. Se in quell'istante si legge l'indicazione del termometro, T , e si trova per es. 15° , mentre un altro termometro immerso

nell'ambiente segna per es. 20° , ciò vorrà dire che la forza elastica del vapore coincide con la forza elastica massima del vapore a 15° ; ed è quindi (V. tabella a pag. 25) 1,27 cm; mentre la forza elastica massima relativa alla saturazione a 20° sarebbe 1,74 cm. Si ha perciò come valore dell'umidità relativa all'atto dell'esperienza.

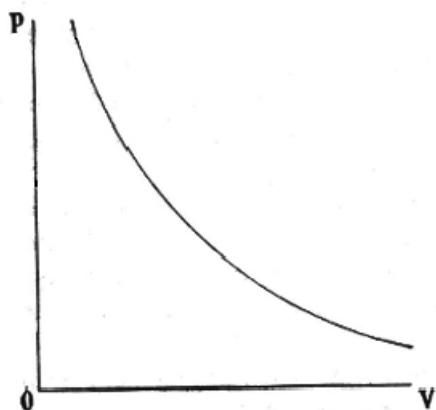


Fig. 28.

$$u = \frac{f}{F} = \frac{1,27}{1,74} = 73 \text{ per cento}$$

29. **Isoterma di un gas e di un vapore.** — A temperatura costante il prodotto del volume per la pressione di una determinata quantità di gas è, come sappiamo, costante. Se perciò rappresentiamo con un diagramma le diverse pressioni occorrenti per far acquistare successivamente al gas volumi decrescenti, si otterrà una curva come quella della fig. 28, che chiamasi *isoterma* del gas.

Supponiamo adesso di andar comprimendo a temperatura costante un vapore non saturo in un cilindro molto lungo munito di stantuffo; e misuriamo i volumi acquistati dal vapore e le corrispondenti pressioni, riportandoli su un nuovo diagramma. In principio il volume sia OA , fig. 29, e la pressione AB ; al diminuire del volume, essendo il vapore non saturo, aumenterà la pressione come in un gas; e il tratto BN del diagramma somiglierà a quello della fig. 29.

Ma quando il volume sarà abbastanza ridotto, il vapore diverrà saturo, e da allora in poi, continuando a far diminuire il volume, la pressione resterà costantemente eguale alla pressione massima di saturazione CN . Quindi il diagramma BN si proseguirà con un tratto rettilineo orizzontale NP , durante il quale alla diminuzione di volume corrisponde la condensazione del vapore in liquido, e i due stati, liquido e aeriforme, saranno nettamente separati come nella fig. 26.

Quando il volume sarà divenuto OD e tutto il vapore si sarà trasformato in liquido, lo stantuffo verrà in contatto con questo, e per ottenere ulteriori diminuzioni di volume s'incontrerà l'ostacolo della piccola compressibilità dei liquidi; cosicchè pressioni enormi dovranno essere esercitate per far variare il volume. Si ha allora il tratto PQ del diagramma, quasi parallelo all'asse delle ordinate.

La curva $MNPQ$ dicesi *isoterma* del vapore: il tratto MN corrisponde al vapore non saturo, il tratto NP al vapore in condensazione, il tratto PQ al vapore già tutto liquido. Simili curve furono studiate sistematicamente da Andrews, con apparecchi adatti, e per diverse temperature.

Naturalmente a ciascuna temperatura corrisponde un diagramma diverso; la fig. 30 riproduce le isoterme dell'anidride carbonica a temperature crescenti; esse mettono bene in chiaro un fenomeno importante scoperto appunto da Andrews.

Quando, cioè, la temperatura dell'anidride carbonica oltrepassa 31° , nelle isoterme corrispondenti, situate al di là di CC' , viene a sparire il tratto orizzontale, e le curve si accostano all'andamento della fig. 28, propria dei gas. La mancanza del tratto orizzontale AS , $A'B$ ecc., cui corrisponde la liquefazione progressiva dell'aeriforme, separato nettamente del liquido sottostante, indica che al di sopra di 31° l'anidride carbonica può diminuire di volume aumentando la pressione, ma non si condensa in liquido, restando allo stato di *gas compresso*.

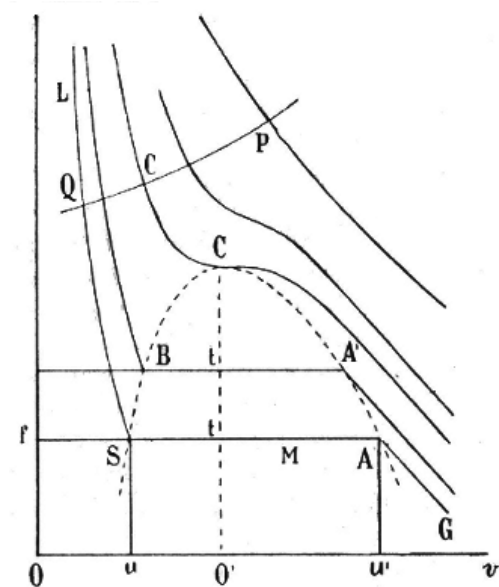


Fig. 30.

l'azoto, l'idrogeno, ecc.) si ottiene come isoterma la curva della fig. 28, se perciò essi furono dapprima ritenuti non suscettibili di liquefazione (*incoercibili*), ciò si deve al fatto che le temperature ordinarie sono per quei gas molto al di sopra della temperatura critica; mentre se si raffredda, per es., l'ossigeno alquanto al di sotto di -118° , la sua isoterma diviene simile a quella di un vapore; e, comprimendolo progressivamente, a un certo punto si separeranno nettamente lo stato liquido da quello aeriforme.

Adunque tutti i gas si potranno liquefare, quando se ne abbassi la temperatura al di sotto della temperatura critica. Ma questo è, molto spesso, assai difficile. Si è trovato invero che i gas più comuni hanno le seguenti temperature critiche:

<i>Idrogeno</i>	— 234,5	<i>Anidride carbonica</i>	30,9
<i>Azoto</i>	— 146	<i>Acetilene</i>	37,

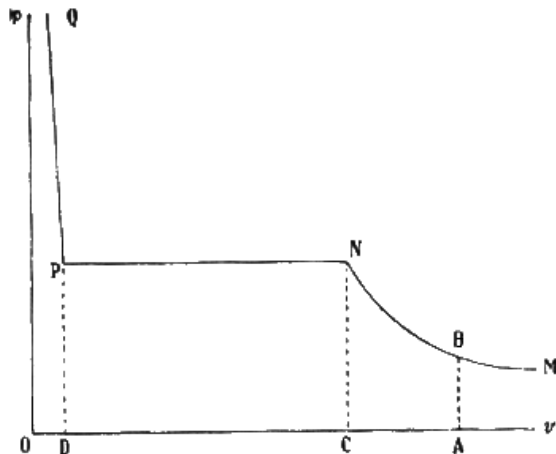


Fig. 29.

Ossido di carbonio	— 141,1	Ammoniaca	130
Ossigeno	— 118	Cloro	146
Metano	— 99,5	Anidr. solforosa	155,4
Etilene	+ 10,1	Acqua	364,3

Cosicchè alla temperatura ordinaria, per esempio a 25°, si potranno liquefare solo i corpi della seconda colonna; mentre per liquefare l'idrogeno si dovrà, oltre che comprimerlo, raffreddarlo alquanto al di sotto di —234,5, cioè a una temperatura straordinariamente bassa.

Eppure tutti questi gas sono stati liquefatti, per opera di Faraday, Pictet, Cailletet, Wroblewski, Olzewski e Dewar. Resisteva soltanto, finora, il gas *elio*, di cui la liquefazione era stata più volte annunciata e smentita; ma anchesso fu ottenuto allo stato liquido permanente, il 10 luglio 1908, da Kamerling Onnes, nel grande Laboratorio per le basse temperature di Leyda.

La descrizione degli apparecchi e degli artifici impiegati per raggiungere temperature così basse uscirebbe dai limiti che ci siamo imposti. Diremo soltanto che il freddo necessario fu ottenuto, nelle esperienze meno recenti, con la brusca evaporazione di un gas di più facile liquefacibilità; cosicchè con la rapida ebollizione, per es., dell'etilene liquido si può liquefare il metano; con l'ebollizione di questo si raggiunge la temperatura sufficiente per liquefare l'ossigeno, e così di seguito.

31. Ma non possiamo tacere del geniale **metodo di Linde** per la liquefazione dell'aria, che ha rivoluzionato la tecnica delle basse temperature, e che ha reso possibile la fabbricazione *industriale* dell'aria liquida in quantità rilevanti, mentre prima era difficilissimo, e concesso solo a pochi laboratori speciali, prepararne quantità minime. Con lo stesso procedimento si è potuto recentemente, partendo da temperature già molto basse, liquefare l'idrogeno e l'elio.

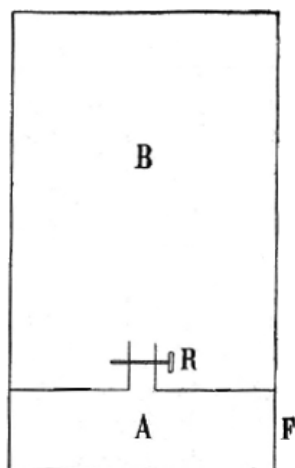


Fig. 31.

Per intendere il principio su cui si fonda la macchina di Linde ricordiamo che se un gas compresso si espande sollevando uno stantuffo con pesi, esso si raffredda per il lavoro esterno eseguito; mentre se, come nella fig. 31, si espande dallo spazio *A* attraverso il rubinetto *B*, nello spazio *vuoto* *B*, senza eseguire perciò il lavoro di sollevamento dello stantuffo, la sua temperatura rimane inalterata.

Ciò è rigorosamente vero per un gas perfetto, che obbedisca cioè esattamente alla legge di Boyle. Invece i gas reali, che si allontanano alquanto da questo comportamento teorico, *cambiano un po' di temperatura espandendosi attraverso al rubinetto S, anche senza eseguire lavoro esterno.*

Ciò fu dimostrato da Joule e Lord Kelvin, i quali provarono che per l'aria si ha un raffreddamento proporzionale alla differenza di pressione che si verifica durante l'espansione. Precisamente a ogni atmosfera di diminuzione nella pressione corrisponde, per l'aria, un raffreddamento di 0°,28.

Mentre il raffreddamento dipende dalla differenza tra le pressioni iniziale e finale in *A*, il lavoro che noi dovremmo eseguire per ristabilire in *A* la pressione primitiva si dimostra che dipende dal rapporto tra quelle pressioni. Se adunque le due pressioni sono 200 e 1 atmosfera, il lavoro da noi compiuto sarà proporzionale al numero $200 = \frac{200}{1}$ e il raffreddamento nell'espansione sarà proporzionale al numero $199 = 200 - 1$; invece se il fenomeno si compie tra 200 e 20 atmosfere, il lavoro compiuto sarà solo come $10 = \frac{200}{20}$, mentre il raffreddamento sarà poco diverso da quello di prima: $180 = 200 - 20$.

Adunque nel secondo caso noi otterremo circa lo stesso raffreddamento, eseguendo un lavoro *venti volte* più piccolo.

Si immagini adesso (fig. 32) che dal tubo *B*, attraverso un foro sottile, aria a 200 atmosfere si espanda nel vaso *A*, ove trovasi aria a 20 atmosfere; mentre la pompa *P* aspira l'aria che si accumula in *A*, la comprime a 200 atmosfere e la ricaccia nel tubo *B*. Per un funzionamento conveniente della pompa la circolazione dell'aria nel senso delle frecce avverrà in modo continuo, e potrà la pressione conservarsi di 20 atmosfere in *A* e di 200 atmosfere al di là della pompa e nel tubo *B*. L'aria proveniente dalla pompa sarà molto calda per la compressione subita; ma il refrigerante *B*, ove circola sempre acqua fredda, la riporta alla temperatura di questa: giungendo in *B*, ed effluendo dal foro si raffredda un poco per quanto si è detto, e lambendo così dall'esterno il tubo *B*, raffredderà alquanto l'aria che sopravviene, cosicchè nella nuova espansione di questa l'aria in *A* sarà ancora più fredda, e lo sarà pure la nuova che discende in *B*. Si intende così che il raffreddamento progredirà sempre più, fino a che nel fondo di *A* si andrà raccogliendo dell'aria già liquefatta.

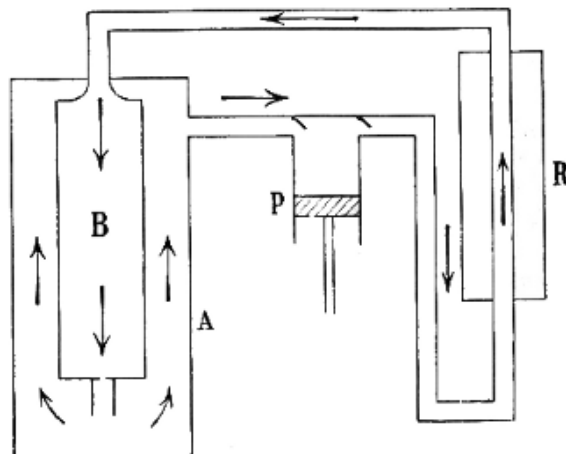


Fig. 32.

Naturalmente la fig. 32 è solo uno schizzo schematico per illustrare il principio della macchina di Linde, la quale ne differisce molto nei particolari costruttivi. Così il vaso *A* è formato da un lungo serpentino entro il quale se ne svolge un altro corrispondente al tubo *B*; una seconda pompa supplisce dall'atmosfera l'aria che si va condensando in *A*; e infine l'aria liquida ottenuta può esser portata via con un dispositivo analogo a quello dei sifoni d'acqua di Seltz.

Si può, con questi mezzi, produrre da 4 a 5 litri d'aria liquida ogni ora, impiegando un motore da 7 cavalli.

L'aria liquida ottenuta si può raccogliere e conservare in alcuni recipienti speciali, detti vasi del Dewar, costituiti da un doppio o triplo involucro, in vetro argentato, privo assolutamente d'aria nello spazio interposto tra le pareti successive. Viene con ciò diminuita molto la penetrazione del calore, cosicchè l'aria liquida vi si può conservare per parecchie settimane, alla temperatura di ebollizione sotto la pressione atmosferica [circa 190° sotto zero], compensandosi col freddo prodotto dalla lenta evaporazione il poco calore che il liquido riceve dall'ambiente.

Le esperienze eseguibili con l'aria liquida sono di grandissimo effetto, poichè le proprietà dei corpi sono profondamente modificate dalle temperature molto basse. Ma le applicazioni utili sono per adesso ben poche; merita di esser segnalata la fabbricazione dell'ossigeno, il quale si ottiene profittando del fatto che l'azoto è più facilmente volatile, e quindi può esser cacciato via dall'aria liquida per distillazione, come l'alcool dal vino.

Macchine termiche.

32. **Macchina a vapore.** — Gli organi essenziali di una macchina a vapore sono la *caldaia*, il *cilindro* e il *condensatore*. Nella prima si vaporizza dell'acqua sotto una pressione elevata; il vapore ottenuto passa al cilindro, spinge lo stantuffo, che trasmette il suo moto all'albero della macchina, e si liquefa, infine, nel condensatore, dal quale una pompa riporta l'acqua ottenuta nella caldaia.

Per esaminare più davvicino il funzionamento della macchina consideriamo la fig. 33, che ne dà un modello schematico.

La caldaia *C*, ove l'acqua bolle a temperatura elevata *T* e il vapore ha una pressione di alcune atmosfere, comunica coi due estremi del cilindro, attraverso i rubinetti *a* e *c*. E così il refrigerante *R*, ove l'acqua è tenuta a una bassa temperatura *t*, comunica pure col cilindro per mezzo dei tubi portanti i rubinetti *b* e *d*.

Quando, come nella figura, sono aperte le comunicazioni *a* e *b* e chiuse le *c* e *d*, sulle due facce dello stantuffo *S* si eserciteranno le pressioni *H* e *h* eguali alle tensioni massime del vapor d'acqua alle temperature *T* e *t*; e in totale lo stantuffo sarà spinto verso destra. Quando lo stantuffo è

giunto all'estremo della sua corsa, chiudiamo *a e b* e apriamo *c e d*. Il vapore, che aveva invaso il cilindro a sinistra di *S*, si condenserà, attraverso *d*, in *R*, e acquisterà subito la pressione *h* per il principio della parete fredda; mentre il vapore proveniente dalla caldaia eserciterà la pressione *H* sulla faccia a destra di *S*; quindi lo stantuffo si sposterà verso sinistra con forza costante. Si potrà

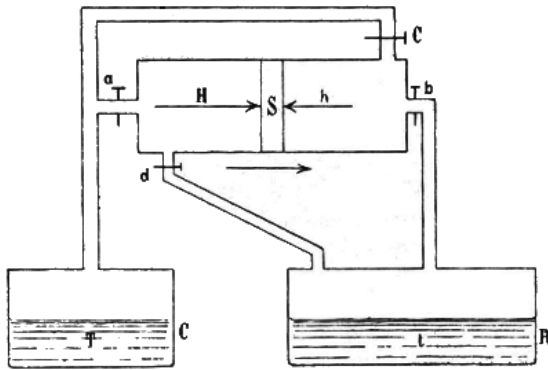


Fig. 33.

quindi, con la manovra descritta, produrre un moto alternativo dello stantuffo, che, per mezzo di opportune trasmissioni articolate, potrà divenire moto rotatorio di un asse, ed essere così utilizzato come sorgente di lavoro meccanico.

Nella macchina descritta il vapore che ha accompagnato lo stantuffo fino all'estremo della sua corsa, e che ha la pressione elevata *H*, si precipita nel refrigerante alla successiva manovra dei rubinetti; ma è chiaro che se, nella posizione della figura, noi chiudiamo il rubinetto *a* mentre lo stantuffo è a metà della corsa, il vapore accumulato alla sua sinistra

continuerà a espandersi, raffreddandosi, e fornendo del lavoro che era prima inutilizzato. La forza propulsiva del vapore sarà minore nella seconda metà della corsa, rispetto al caso precedente; ma se anche fosse, in media, solo la metà, il lavoro totale nell'intera corsa sarà i tre quarti di prima, mentre il consumo di vapore sarà divenuto metà. E poichè la produzione del vapore richiede il consumo di combustibile, il secondo procedimento sarà *più economico*. Questo avviene appunto nelle macchine *a espansione*.

La massima economia si otterrebbe se il vapore, prima di condensarsi in *R*, si espandesse tanto da acquistare la temperatura e la pressione del condensatore. Ma anche in tal caso, nel moto retrogrado dello stantuffo, si liqueferebbe sempre in *R*, perdendo così le calorie di vaporizzazione, che dovrà poi riprendere in *C*. Adunque il calore fornito da noi alla caldaia non può in nessun caso essere interamente utilizzato, ma una parte sarà sempre ceduta al refrigerante *R* di temperatura più bassa, come richiede il secondo principio della Termodinamica [§ 14].

33. Il rendimento della macchina, cioè il rapporto tra il calore trasformato in lavoro e il calore totale impiegato, è dato, nelle condizioni ideali sopra indicate, da

$$\alpha = \frac{T - t}{T}$$

ove *T* e *t* sono le temperature assolute della caldaia e del condensatore; non può superare perciò questo limite, comunque si perfezioni la macchina.

Se, per es., come in una macchina ideale a 10 atmosfere, le temperature centigrade della caldaia e del refrigerante sono 180° e 40°, sarà

$$\alpha = \frac{140}{180 + 273} = \text{circa } 31 \%$$

e non più del 31 % del calore impiegato si potrà trasformare in lavoro.

In realtà nelle migliori macchine a vapore si deve impiegare circa 1 Kg. di carbone per ottenere un cavallo-vapore di potenza durante un'ora, cioè $3600 \times 75 = 270000$ chilogrammetri; eppure le 8000 grandi calorie svolte dalla combustione avrebbero dovuto fornire, per la loro integrale trasformazione in lavoro, $8000 \times 427 = 3.416.000$ Kgm. Adunque il *rendimento effettivo* non supera l'8 %.

La differenza tra il rendimento teorico e il rendimento effettivo è dovuta alle inevitabili imperfezioni della macchina, quali la incompleta utilizzazione del calore nel fornello, il raffreddamento del vapore nelle tubulature e nel cilindro, l'incompleta espansione, ecc. E quando si pensi che, per es., nei motori elettrici si riesce a trasformare in energia meccanica fino al 92 %

dell'energia elettrica impiegata, bisogna concludere che la macchina a vapore, per le esigenze del 2° principio della termodinamica, e per le imperfezioni pratiche, non si presenta bene al confronto. La colpa è da attribuire non all'opera dell'uomo, che per una serie di trasformazioni durata un secolo ha fatto della macchina a vapore il più ammirevole dei meccanismi, ma all'energia termica utilizzata che, come abbiamo detto, è di *cattiva qualità*, nel senso che si presta poco alle trasformazioni.

È appunto per la grande complicazione dei particolari costruttivi della macchina a vapore che noi ci asteniamo dal darne la descrizione dettagliata; limitandoci solo a dire che le manovre di scambio delle comunicazioni del cilindro sono affidate alla stessa macchina per mezzo del *cassetto di distribuzione*, o di altri dispositivi; e che talvolta manca il refrigerante *R*, e il vapore, dopo compiuto il lavoro, passa direttamente dal cilindro all'aria libera. Altri organi molto ingegnosi permettono di regolare quantitativamente l'immissione del vapore secondo il bisogno, qualora la macchina debba sviluppare una quantità variabile di lavoro.

34. Motori a gas. — Per i piccoli impianti di forza motrice la macchina a vapore è stata sostituita, negli ultimi tempi, dai motori a gas, i quali presentano la prospettiva di un grande avvenire industriale, e forse finiranno, a lungo andare, col soppiantare del tutto la vecchia e gloriosa rivale.

Nei motori a gas lo stantuffo viene direttamente spinto dalla forza elastica di una miscela di gas e di aria, che prende fuoco alla base stessa del cilindro.

Ordinariamente la manovra si compie in quattro tempi; lo stantuffo aspira dietro di sé, in una prima corsa, l'aria e il gas nelle proporzioni necessarie per una combustione completa; nel ritorno dello stantuffo la miscela viene compressa in un piccolo volume, e all'istante della massima compressione viene infiammata da una scintilla elettrica, o da un altro artificio. Il calore svolto nell'esplosione riscalda i prodotti gassosi a una temperatura elevata, ed essi spingono avanti lo stantuffo con una grande pressione; mentre, al nuovo ritorno dello stantuffo, vengono cacciati, attraverso al tubo di scarico, nell'atmosfera.

Il gas impiegato può essere o quello d'illuminazione o il cosiddetto *gas povero*, che si ottiene facendo passare una corrente di aria umida sul carbone rovente; esso è una miscela di gas infiammabili, in prevalenza idrogeno e ossido di carbonio.

Per la elevata temperatura iniziale del gas che si espande, dopo l'esplosione, dietro lo stantuffo (temperatura prossima ai 2000 gradi assoluti), il rendimento teorico è molto superiore a quello della macchina a vapore. E per quanto le imperfezioni meccaniche siano per adesso maggiori che nella macchina a vapore, pure si ha un vantaggio rilevante su questa, poichè anche in motori di non grande potenza si può avere il consumo di soli 400 gr. di carbone per ogni cavallo-ora di lavoro prodotto.

OTTICA

OTTICA GEOMETRICA

Propagazione della Luce. – Fotometria. – Riflessione

35. **Corpi luminosi e illuminati. — Raggi luminosi.** — I fenomeni di cui ci occuperemo nell'ottica geometrica possono essere considerati indipendentemente da ogni ipotesi sulla natura della luce, e dedotti da alcune proprietà dei raggi luminosi, che noi apprenderemo direttamente dall'esperienza.

Ricorderemo, anzitutto, come i fenomeni più comuni della vita ci suggeriscano subito la distinzione tra corpi *luminosi* e corpi *illuminati*, tali cioè da riuscir visibili solo in presenza dei primi, detti anche sorgenti di luce. Si tratti della luce prodotta nelle combustioni, o della luce elettrica, o delle altre sorgenti terrestri più comuni, è facile riconoscere in tutte la presenza di *un corpo solido a temperatura molto elevata*. Le fiamme, come quella dell'idrogeno, in cui i corpi in presenza prima e dopo la reazione sono gassosi, non emettono luce visibile, come è provato dalla fiamma del becco Bunsen. Invece un corpo solido, come un filo di platino o un bastoncino di sostanza refrattaria, riscaldato ad alta temperatura dalla fiamma stessa, o da quella più calda del cannello ossidrico, splendono di viva luce; non diversa è la origine della luce emessa da un becco Auer, per la presenza nella fiamma Bunsen della sottile reticella di ossido di torio e di cerio. E così un filo di metallo difficilmente fusibile o di carbone, portato ad alta temperatura per il passaggio di una corrente elettrica, emette pure una viva luce, di cui si trae profitto nelle lampade a incandescenza.

Al di sotto della temperatura di 400° nessun corpo è luminoso, fatta esclusione di quelli detti *fosforescenti*. Al di là di quella temperatura comincia a esser visibile una luce di color rosso, che si va facendo più viva e più tendente al bianco a misura che la temperatura aumenta.

Così una lampada elettrica nuova a filamento di carbone dà una luce meno rossastra di una lampada usata per molto tempo, perchè il suo filamento si porta a temperatura più elevata, che può oltrepassare 1800° .

La luce emessa dai corpi luminosi è ricevuta da tutti i corpi circostanti, che riescon visibili perchè in parte la ricacciano indietro. Per renderci esatto conto di questo fenomeno, chiudiamo le aperture della stanza, e pratichiamo un foro in una parete di essa, investita dalla luce solare. Un *fascetto cilindrico di luce* penetrerà nella stanza e illuminerà lievemente nel suo percorso, disegnandoli, i minuti granellini di polvere vaganti nell'aria, cioè il pulviscolo atmosferico. Se questo fascio si fa cadere sopra una superficie piana metallica ben levigata, vedremo che esso cambia bruscamente di direzione, conservando la forma cilindrica che aveva. Si dice che il fascio ha subito la *riflessione* da parte della superficie metallica. Interponiamo invece una lastra piana di vetro; troveremo che il fascio *in parte* si riflette, ma in parte traversa la lamina e continua il suo cammino al di là; a questo fenomeno per cui la luce penetra nel vetro, e in altri corpi trasparenti, si dà il nome di *rifrazione*. Riceviamo adesso il fascio su una lamina annerita con uno spesso strato di nero fumo; troveremo che il fascio di luce si estingue senza che se ne veda traccia; esso è stato *assorbito*. Infine interponiamo un foglio di carta bianca; la parte di esso colpita dai raggi riuscirà *visibile* da tutte le parti della sala, e guardandola da vicino vi si potran riconoscere, in qualunque direzione, le differenze più o meno lievi dei vari punti della superficie, o i segni in essi tracciati con una sostanza assorbente come l'inchiostro. Si dice che la carta *diffonde* la luce ricevuta.

Le quattro sostanze impiegate [metallo speculare, vetro, nero fumo, carta bianca] presentano ciascuna in prevalenza i fenomeni della *riflessione*, della *rifrazione*, dell'*assorbimento* e della *diffusione*. Ma in realtà alla superficie di qualunque corpo i quattro fenomeni avvengono insieme, in misura diversa da corpo a corpo.

La visibilità dei corpi illuminati è dovuta alla diffusione della luce da parte della loro superficie; ogni punto di questa diviene un nuovo centro di luce, come ogni punto del foglio di carta

nell'esperienza di sopra. E ciò che noi *vediamo* nei corpi, e ce ne permette il riconoscimento, è appunto la differenza di diffusione dei punti superficiali.

Il fascio penetrante nella sala attraverso al foro può esser reso molto sottile restringendo il foro sempre più; se noi *immaginiamo* il foro ridotto a un punto, il fascio si ridurrà a una linea retta, che diremo *raggio luminoso*. Un raggio luminoso conserva adunque la sua forma rettilinea, e la riprende in diversa direzione dopo la riflessione e la rifrazione. Ricevuto da una superficie diffondente, come un foglio di carta, si converte in un fascio di raggi rettilinei che partono, dal punto colpito, in tutte le direzioni. Or *quando un fascio di raggi rettilinei, partenti da un punto, colpisce il nostro occhio*, per ragioni che giustificheremo in seguito ma che assumeremo adesso come un risultato dell'esperienza, *noi giudichiamo che in quel punto esista un punto luminoso o illuminato*.

36. **Camera oscura.** — Supponiamo adesso che avanti a un foro sottile, praticato in una parete di una stanza buia, sia disposto un oggetto luminoso o illuminato, per es. il triangolo ABC (fig. 34); la parete opposta sia invece tappezzata con un foglio di tela o di carta bianca. Ciascun

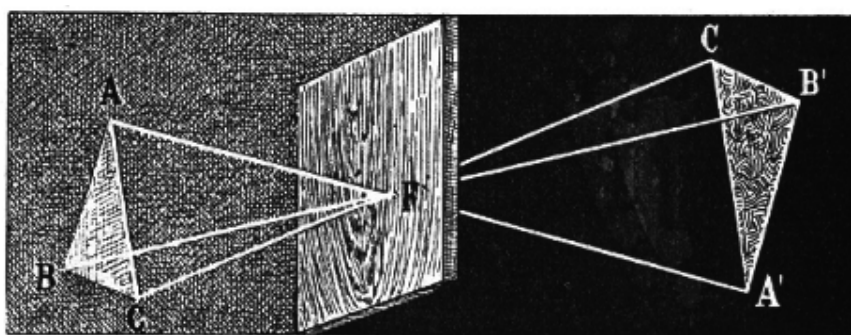


Fig. 34.

punto dell'oggetto, come A , manda raggi in tutte le direzioni, ma nella stanza buia penetra attraverso il foro solo un fascetto conico che ha per vertice A , e illumina una porzione ellittica A' della parete opposta, lasciando al buio tutto il resto: il punto B farà lo stesso in B' , il punto C in C' , cosicchè sullo schermo

si vedranno delle macchiette ellittiche luminose, in corrispondenza dei punti A, B, C , e disposte in modo da riprodurre la successione dei punti luminosi ABC . Si avrà un'immagine $A'B'C'$, capovolta, composta di tante piccole ellissi quanti sono i punti luminosi dell'oggetto ABC . Così se un punto del triangolo è nero, mancherà in $A'B'C'$ la piccola ellisse corrispondente; e si vedrà perciò un pezzetto dell'immagine non illuminata, come se vi fosse un punto nero. L'immagine sarà tanto più netta quanto più il foro è sottile, come è facile intendere, nè la forma del foro avrà alcuna influenza, poichè se essa fosse, ad esempio, quadrata o triangolare, l'immagine sarebbe ancora riconoscibile, pur essendo formata da tanti piccoli quadrilateri o triangoli, che a distanza appariranno sempre come punti; così come noi riconosciamo la forma delle lettere nelle grandi iscrizioni delle *réclames* luminose, qualunque sia la forma di ciascuna delle lampadine il cui insieme rappresenta le lettere.

37. **Ombra e penombra.** — Un'altra conseguenza della propagazione rettilinea della luce si ha nella formazione delle ombre. Disponendo un oggetto *opaco* M avanti a un punto luminoso O

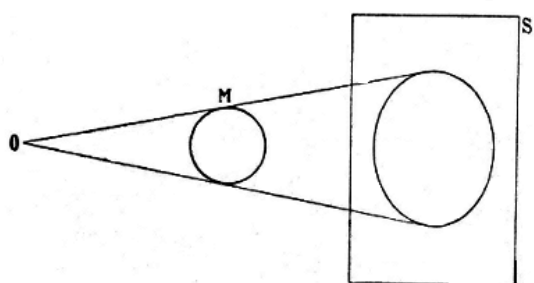


Fig. 35.

(fig. 35), si formerà un'ombra dietro di esso, determinata dal cono che ha per vertice il punto e le cui generatrici si appoggiano sul contorno dell'oggetto opaco; in questo cono, al di là dell'oggetto, la luce sensibilmente non penetra, cosicchè sullo schermo S si disegnerà una regione non illuminata (*ombra*), e limitata dall'intersezione del cono.

In tal caso i punti dello schermo sono in piena luce o in piena oscurità; ma se i punti luminosi fossero due, anzichè uno, avremmo due ombre distinte, che in certe condizioni possono sovrapporsi in parte. Dei punti di S alcuni riceveranno luce da tutte e due le sorgenti; altri, contenuti nella parte comune alle due ombre, saranno in piena oscurità, altri infine contenuti nella parte non comune di esse, riceveranno luce da una sola sorgente.

Se si moltiplica il numero dei punti luminosi, e se questi formano un insieme continuo, cioè una sorgente luminosa di una certa estensione, sullo schermo disposto a non troppo grande distanza si avrà una regione di oscurità assoluta, contornata da una regione (*penombra*) ove giunge la luce proveniente da una parte della sorgente, e che separa con una sfumatura continua la regione interna di ombra assoluta dalla regione di piena luce da cui l'intera della sorgente è visibile.

Le ombre saranno perciò tanto più nette quanto più piccole sono le dimensioni della sorgente.

38. La luce trasporta energia. — Nell'esperienza del § 35 riceviamo il fascio di luce solare sul bulbo affumicato di un termometro sensibile; si avrà l'assorbimento della luce, e insieme si constaterà un riscaldamento del termometro. Adunque la luce, nell'estinguersi, sviluppa calore, e trasporta perciò energia.

Noi avevamo già riferito, del resto, che dal Sole giunge a noi una rilevante quantità di energia, convertibile in calore nei corpi assorbenti la irradiazione solare.

Misurando con opportune cautele l'energia totale di un fascio di luce, cioè il calore svolto nell'unità di tempo per il suo assorbimento completo, e l'energia dei fasci riflesso, rifratto e diffuso da una superficie qualsiasi, si è constatato, come richiede il principio della conservazione dell'energia, che l'energia *incidente* è eguale alla somma delle energie riflessa, rifratta, diffusa e assorbita dal corpo.

D'altra parte se si vuole che un corpo emetta luce in modo continuo, occorre restituirgli tutta la energia che si ritrova poi nella luce emessa. Ciò avviene, per es., nelle lampade elettriche in virtù dello sviluppo continuo di calore che ha luogo nel filamento da parte della corrente elettrica che l'attraversa, e ne conserva costante la temperatura, malgrado l'irradiazione; che se si interrompe la corrente, la temperatura del filamento si abbassa tosto fino alla temperatura dell'ambiente.

Ma se noi riduciamo la produzione di calore nel filo, in modo da non fargli oltrepassare la temperatura di 400°, dell'energia sarà ancora irradiata, *sotto forma di raggi invisibili*, che, come vedremo, si riflettono, si rifrangono e si diffondono, seguendo le stesse leggi geometriche dei raggi luminosi, *dai quali non li distingue che la loro invisibilità*; e che possono egualmente venire studiati sostituendo all'occhio un ricevitore termometrico abbastanza sensibile.

Vedremo pure che in un fascio di luce bianca, come quella proveniente dal Sole, o dal becco Auer, o da una lampada elettrica, si trovano commisti ai raggi luminosi dei raggi invisibili, i quali prendono una parte notevole nel riscaldamento del bulbo del termometro, che li assorbe tutti; ma riconosceremo pure che i raggi visibili son anch'essi capaci di sviluppare calore, quando siano assorbiti da un corpo.

39. Velocità della luce. — La luce impiega un tempo piccolissimo, ma misurabile, per percorrere distanze anche grandi.

Le prime misure furono fatte da Roemer, impiegando un metodo astronomico fondato sulla osservazione dei satelliti di Giove. Questi girando intorno al pianeta con velocità costante, sono da esso periodicamente occultati, ma l'intervallo di tempo tra due occultazioni consecutive apparisce a noi di diversa durata secondo che la Terra, nella rivoluzione annua intorno al Sole, si avvicina o si allontana da Giove. La causa di queste variazioni *apparenti* nell'intervallo di tempo che intercede tra due occultazioni è analoga a quella che produce, in Acustica, le variazioni del numero di vibrazioni ricevute da un osservatore che si allontana o si avvicina alla sorgente sonora; se ne può dedurre la velocità della luce, conoscendo la velocità con cui la Terra si avvicina o si allontana da Giove.

Ma le esperienze per la misura della velocità della luce poterono anche essere eseguite alla superficie terrestre, con due metodi ingegnosi messi in opera da Fizeau e da Foucault nella stessa epoca. Noi daremo un cenno del primo.

Un fascio di luce partente da P (fig. 36) è periodicamente intercettato dai denti di una ruota R che gira con grande velocità: esso si propaga fino a uno specchio M, disposto alla distanza di circa 8 chilometri. Il fascio viene riflesso dallo specchio nuovamente in P; ma se nel tempo che la luce impiega per andare e tornare da M, per percorrere cioè 16 km, essa trova sul suo cammino un dente della ruota girante, anziché il vuoto come all'istante in cui partì, sarà arrestata da quello e non sarà

più vista al di là. Raddoppiando la velocità della ruota, nello stesso tempo impiegato dalla luce per andare e tornare, a un vuoto avanti a P si sostituirà un altro vuoto, e la luce potrà essere riveduta da un occhio collocato vicino a P. Conoscendo esattamente il tempo impiegato nei due casi perchè un dente pieno si sostituisca a una cavità, o perchè a questa se ne sostituisca un'altra, si saprà il tempo impiegato dalla luce per andare e tornare da M. Si potè così stabilire, con esperienze delicatissime, che la luce percorre 300 mila chilometri a ogni minuto secondo.

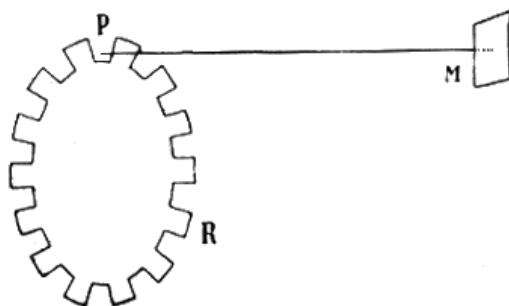


Fig. 36.

Dato il valore enorme della velocità della luce, il tempo da essa impiegato per percorrere le comuni distanze terrestri è estremamente piccolo. Invece quel tempo è rilevante nel caso delle distanze enormi che ci separano dagli astri; così la luce impiega circa 8 minuti per giungere a noi dal Sole, percorrendo una distanza che richiederebbe tre secoli di marcia continua per esser coperta da un treno con la velocità di 60 km. all'ora. Si è potuto, con dei processi astronomici molto delicati, calcolare la distanza tra la Terra e alcune stelle fisse; essa è tale che da una delle stelle più vicine (α del Centauro) la luce impiega 4 anni per giungere a noi, e ne impiega 50 per giungere dalla Stella Polare. Per altre stelle questo tempo è ancora molto più grande, cosicchè l'aspetto del cielo, quale noi lo vediamo, non corrisponde al suo stato attuale, ma ogni stella ci appare nelle condizioni in cui si trovava molti anni o molti secoli prima; alcune stelle potrebbero perciò essere spente da un pezzo, o altre nuove potrebbero essersi formate, e di tutto ciò noi avremo notizia solo con immenso ritardo.

40. Fotometria. — La fotometria ha per oggetto di confrontare l'illuminamento prodotto da una sorgente, in una direzione determinata, con quello prodotto da una sorgente che si assume come unità di misura.

A questo scopo, praticamente importantissimo, corrisponde purtroppo una grande incertezza nelle definizioni fondamentali e nei metodi di misura. Per semplificarne l'esposizione ammetteremo che l'occhio sia in grado di riconoscere l'uguaglianza degli illuminamenti prodotti separatamente da due sorgenti su due metà di un unico schermo; una delle sorgenti, A, sia l'unità di misura; se l'altra B produce, alla stessa distanza, un illuminamento eguale, diremo che B ha l'*intensità luminosa* 1; se invece per avere l'eguaglianza d'illuminamento con B bisogna ricorrere a 2, 3, 4 sorgenti eguali ad A, diremo che B ha l'intensità di 2, 3, 4 unità. Diremo anche che B produce un illuminamento 2, 3, 4 volte maggiore di quello di A.

L'illuminamento di una superficie esposta a una data sorgente dipende dalla loro mutua distanza; e in modo tale che, come si può dimostrare sperimentalmente, per avere lo stesso illuminamento a distanza doppia occorre quadruplicare l'intensità luminosa della sorgente, a distanza tripla occorre invece moltiplicarla per nove e così via. Cioè: *le intensità luminose di diverse sorgenti, capaci di produrre lo stesso illuminamento a diverse distanze dallo schermo, sono proporzionali al quadrato della rispettiva distanza. O anche: gli illuminamenti prodotti da una stessa sorgente a diverse distanze sono in ragione inversa del quadrato della distanza.*

Se la luce emessa viene assorbita da uno stesso corpo assorbente a diverse distanze e trasformata in calore, il calore ottenuto è pure in ragione inversa del quadrato della distanza. E invero lo stesso cono di raggi che investe a una data distanza una superficie di 1 cm², e trasporta una determinata quantità di energia, coprirà a distanza doppia una superficie di 4 centimetri quadrati, ciascuno dei quali assorbirà, perciò, un quarto dell'energia ricevuta alla primitiva distanza.

Anche l'inclinazione dello schermo sui raggi avrà influenza sull'illuminamento; riesce evidente invero dalla fig. 37 che la superficie inclinata AC riceve solo la quantità di luce che, nella posizione AB normale ai raggi, colpirebbe la sua proiezione AD.

La scelta di una sorgente unitaria di luce ha formato oggetto di molte contestazioni, per la difficoltà di trovarne una veramente costante ed esattamente riproducibile.

In Francia si adottò come campione di unità d'intensità una lampada a olio di colza, costruita da Carcel, e osservata in direzione orizzontale; la lampada campione deve avere determinate dimensioni e consumare 42 gr. d'olio all'ora. In Inghilterra e in Germania si adottarono speciali candele di bianco di balena e di paraffina.

Un'altra unità molto usata è la luce emessa dalla lampada Hefner ad acetato di amile; ma fu adottata come unità internazionale, nel Congresso degli Eletttrici del 1881, l'unità *Violle*, cioè la luce emessa normalmente da un centimetro quadrato di platino alla temperatura di fusione. Per gli usi pratici s'introdusse la *candela decimale*, che è però un *ventesimo* dell'unità *Violle*.

Esprese, in candele decimali, le altre unità valgono: Unità *Violle* 20; Hefner 0,885; Carcel 9,62; Candela inglese 1,14.

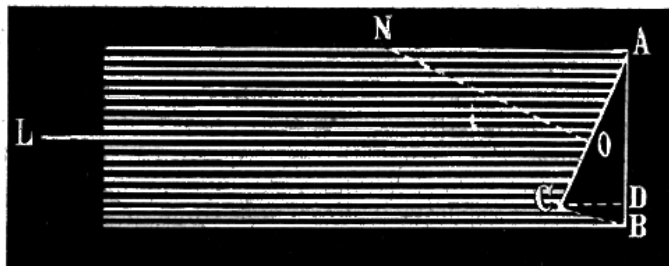


Fig. 37.

L'illuminamento prodotto da una candela decimale su una superficie normale ai raggi e distante 1 metro si prende come unità degli illuminamenti, e si chiama *1 lux*. Si è trovato, per es., che l'illuminamento di una superficie esposta al Sole, a mezzogiorno, è di 70000 lux; quello di un bel chiaro di luna è 0,15 lux; quello di un ambiente ben esposto in una bella giornata è da 100 a 400 lux; e che infine il minimo illuminamento necessario, per l'igiene, alla lettura è di 10 lux.

Si noti però che mentre l'occhio può con sufficiente esattezza decidere dell'eguaglianza, o meno, di due illuminamenti, la sensazione non può affatto servire per riconoscere se uno dei due è, per es., doppio, o triplo d'un altro.

È perciò che nelle misure fotometriche, come processo generale, s'illuminano con le due sorgenti da confrontare due regioni contigue d'uno schermo, e si varia in modo *misurabile* l'illuminamento prodotto da una di esse finchè le due regioni adiacenti appaiano egualmente illuminate.

La variazione misurabile dell'illuminamento prodotto da una delle sorgenti può ottenersi nel modo più semplice facendo variare la distanza tra la sorgente e lo schermo; ma l'uguaglianza può essere stimata con sufficiente sensibilità ed esattezza a condizione che gl'illuminamenti non siano nè troppo deboli nè troppo forti, che le due regioni siano osservate con lo stesso occhio, e infine che le due sorgenti non siano diversamente colorate. Se quest'ultima condizione non è soddisfatta, i risultati perdono ogni sicurezza, a causa di alcuni fenomeni psicologici molto complessi che mettono in difetto i principii fondamentali della fotometria stessa.

Nel fotometro di Foucault le due sorgenti illuminano le due metà di uno schermo in vetro smerigliato, che si osservano dall'altra parte; l'eguaglianza è ottenuta spostando sopra un regolo graduato la sorgente di cui si cerca l'intensità; la legge delle distanze permette di dedurre facilmente il valore di questa rispetto all'altra che può essere l'unità di misura.

Altri fotometri utilizzano le disposizioni più svariate; segnaliamo quelli di Bunsen, di Weber, di Lummer.

41. Riflessione della luce. — Una superficie piana speculare, disposta orizzontalmente, abbia per traccia, sul piano della fig. 38, la retta MM'; e dal punto luminoso A cadano sullo specchio raggi in tutte le direzioni. L'esperienza dimostra che ognuno di essi, come AB, dà luogo a un raggio riflesso come BD, tale che le tre rette AB, BD e BN (quest'ultima perpendicolare o normale allo specchio nel *punto d'incidenza* B), si trovano in unico piano, detto piano d'incidenza; e che l'*angolo d'incidenza* ABN, formato dal raggio incidente con la normale, è eguale all'*angolo di riflessione* NBD formato con la stessa normale dal raggio riflesso.

A un altro raggio incidente AB' corrisponderà un altro raggio riflesso B'D', che obbedisce alle medesime leggi, ed è facile dimostrare che due raggi riflessi qualsiasi, come BD e B'D', prolungati al di là dello specchio, s'incontrano in un punto A', situato sulla normale allo specchio condotta da A, e tale che A e A' sono ad eguale distanza dallo specchio MM'. Infatti scegliendo un raggio qualunque come AB, e il corrispondente raggio riflesso BD, il prolungamento di BD

incontrerà la normale allo specchio condotta per A, poichè AA' e BN sono in un piano che contiene AB e BD; e perciò anche AA' e BD sono in un piano. Sia A' il punto d'incontro e P l'intersezione di AA' con MM'.

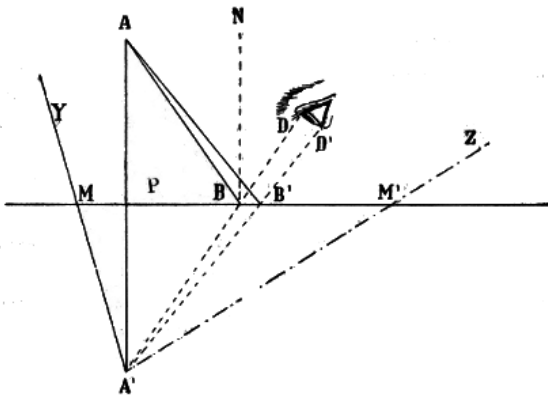


Fig. 38.

simmetrica con A rispetto allo specchio.

Se invece di un punto solo A si dispone avanti allo specchio un oggetto luminoso o illuminato, si avranno tante immagini dei vari punti disposte come nell'oggetto (fig. 39); si avrà cioè un'immagine virtuale dell'oggetto.

Al cono di raggi AMM' che investe lo specchio (fig. 38) corrisponde il cono di raggi riflessi A'MM'; l'occhio vedrà l'immagine A' solo se è compreso in quel cono, se riceve cioè i raggi riflessi.

Come abbiamo già detto la luce incidente viene solo parzialmente riflessa; il *potere riflettente*, cioè il rapporto tra l'intensità del raggio riflesso e quella del raggio incidente, cambia con la natura dei corpi, con lo stato della loro superficie, secondo cioè che son levigati più o meno, e anche col valore dell'angolo d'incidenza, specialmente nei corpi trasparenti come il vetro — Quest'ultimo, sotto l'incidenza normale, riflette solo in minima parte i raggi incidenti, mentre riflette quasi per intero i raggi che formano con la normale un angolo vicino a 90° — L'argento ha fra tutti i metalli il più elevato potere riflettente, che può raggiungere per la luce solare il valore del 97 %.

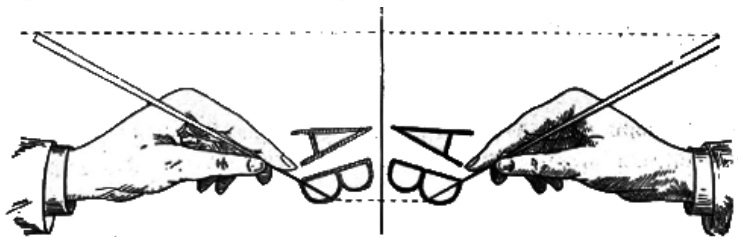


Fig. 39.

I migliori specchi son quindi quelli di argento; e allo scopo di averne strati sottili, di forma ben piana e levigata, si deposita il metallo, con processi speciali, alla superficie di una lastra di vetro. — Negli specchi comuni si deposita invece sul vetro un'amalgama di stagno, per risparmio di spesa — Naturalmente in questi casi si ha una doppia riflessione; la prima, debole, sulla faccia vitrea anteriore della lamina, la seconda sulla faccia metallica posteriore; la luce riflessa da questa torna in gran parte nell'aria, e il resto subisce ancora una o più riflessioni tra il vetro e il metallo. — Si hanno quindi, insieme alla immagine più intensa prodotta dal metallo, diverse altre immagini più deboli, le quali si possono osservare facilmente, avvicinando un fiammifero a uno specchio spesso, e guardando in direzione inclinata. — Esse sono evitate negli specchi destinati alle ricerche fisiche o astronomiche, argentandoli anteriormente.

Noteremo infine che la luce diffusa è da attribuire alle riflessioni irregolari che la luce incidente subisce sulla superficie scabra dei corpi, la quale può essere considerata come risultante da un numero grandissimo di microscopiche superfici piane, diversamente orientate, e che riflettono perciò in direzioni diverse i raggi incidenti.

42. **Specchi concavi.** Rendiamo speculari la superficie interna di una calotta sferica MN (fig.

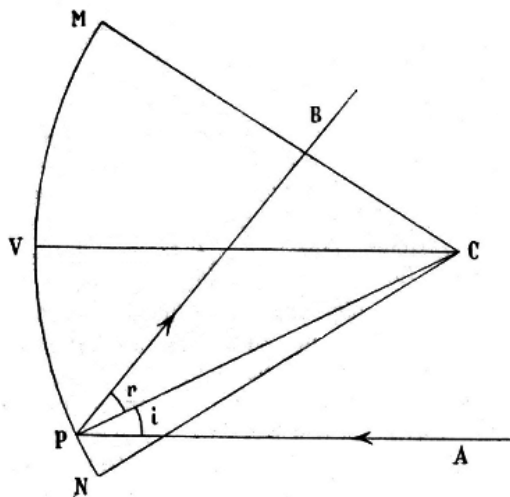


Fig. 40.

40) appartenente a una sfera il cui centro è in C; questo punto chiamasi *centro di curvatura* dello specchio *concavo* ottenuto — Il centro V della calotta dicesi *vertice* dello specchio; la congiungente V C *asse principale*, qualunque retta come CP, passante per C, *asse secondario*; e infine l'angolo MCN sotto il quale dal centro C si vede il diametro MN del cerchio limitante la calotta chiamasi *angolo di apertura* dello specchio.

Lo specchio sferico può essere considerato come risultante da infiniti specchietti piani piccolissimi, di cui le normali passano tutte per il centro, C, poichè il raggio della sfera es. CP, è in ogni punto normale al piano tangente in quel punto. Se perciò un raggio luminoso AP cade in P, esso si rifletterà secondo PB, in modo che siano eguali gli angoli APC,CPB che rappresentano

l'angolo d'incidenza e quello di riflessione. — Si può quindi graficamente costruire, raggio per raggio, l'insieme dei raggi riflessi corrispondenti a un dato fascio di raggi incidenti. — Ma le costruzioni si semplificano negli specchi per cui l'angolo d'apertura MCN è molto piccolo, e quando i raggi incidenti sono *omocentrici* cioè provengono da un unico punto luminoso. Si dimostra allora che anche i raggi riflessi sono omocentrici, cioè passano per un altro punto che si chiama *fuoco coniugato* del primo. — Per es. sono fuochi coniugati i punti P e P' della fig. 41, o anche della fig. 42 nella quale i due punti coniugati non sono sull'asse principale.

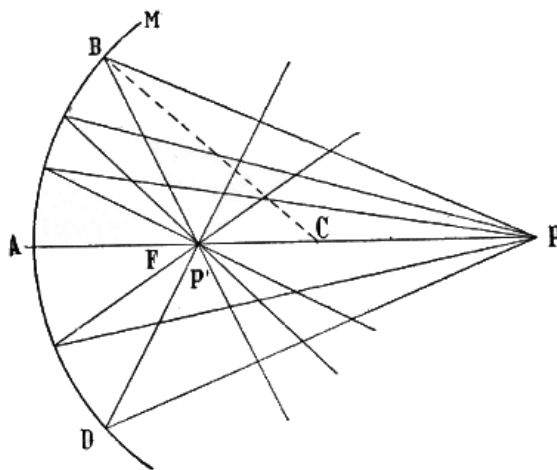


Fig. 41.

Ne segue una conseguenza importante. — Poichè il cono di raggi divergenti PBD (fig. 41) vien

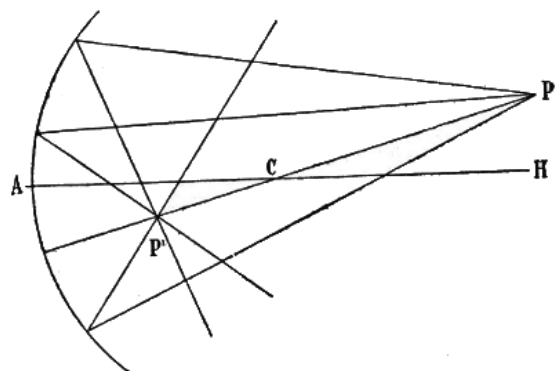


Fig. 42.

trasformato dallo specchio in un cono di raggi convergenti BDP' si concentrerà nel punto P tutta la luce riflessa dallo specchio; e perciò disponendo un foglio di carta bianca un poco avanti di P' il cono dei raggi riflessi ne illuminerà una porzione circolare che si andrà restringendo, fino a ridursi a un punto vivamente illuminato quando il foglio contiene il punto P'. Si vedrà in tal caso sul foglio un punto luminoso che si può considerare come *immagine* del punto P. Lo si chiama, nel caso della figura, *immagine reale* del punto P, poichè nel punto P' i raggi luminosi effettivamente convergono, e tornano

poscia a divergere, come se P' fosse un vero punto luminoso.

Se poi i raggi incidenti sono paralleli tra loro e all'asse principale, come avviene praticamente quando il punto P dell'asse da cui essi provengono è a distanza molto grande, i raggi riflessi concorreranno ancora in un punto F, detto fuoco principale dello specchio, e che coincide col punto di mezzo del segmento AC.

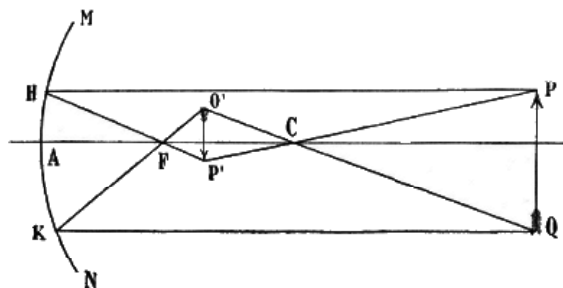


Fig. 43.

Per trovare il coniugato di un punto luminoso qualsiasi ci possiamo servire adunque delle seguenti regole grafiche :

1°. Il coniugato di un punto A si ottiene dall'incontro di due qualsiasi raggi riflessi provenienti inizialmente da A.

2°. Esso si trova perciò sull'asse *secondario* che passa per A, poichè un raggio passante per C cade normalmente sullo specchio e si riflette su sè stesso.

3° Un raggio qualsiasi parallelo all'asse principale si riflette passando pel fuoco principale.

Se si vuole, perciò, il coniugato di un punto luminoso P (fig. 43) basta guidare da P il raggio PH parallelo all'asse principale, che si rifletterà secondo HF; un altro raggio come PC si riflette su

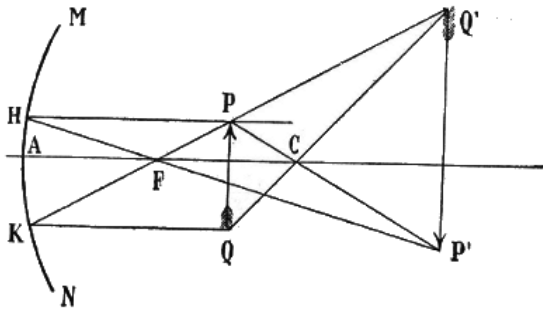


Fig. 44.

sè stesso, quindi tutti i raggi riflessi devono passare per P', punto d'incontro di HF con PC, e P' sarà il coniugato di P. Se si procede egualmente per tutti i punti luminosi dell'oggetto PQ, si troverà che i loro coniugati si dispongono in P'Q', dando luogo a una successione di punti-immagine distribuiti come nell'oggetto. Se perciò si colloca un foglio di carta in P'Q', vi si dipingeranno, come nella camera oscura, dei punti-immagine disposti come nella sorgente, riproducendo un'immagine *reale* e capovolta

dell'oggetto.

L'immagine sul foglio è netta solo quando il foglio è posto in P'Q'; al di qua o al di là a ogni

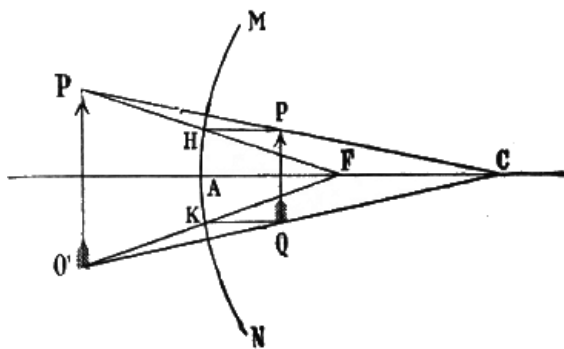


Fig. 45.

punto dell'oggetto corrisponde un cerchio nell'immagine; e questa diviene più e più sfumata fino a divenire irricognoscibile. Ma la posizione di P'Q' dipende dalla posizione dell'oggetto PQ; e si può dimostrare con le regole grafiche date, e verificare con l'esperienza, che:

1°. Avvicinando l'oggetto da distanza grandissima fino al centro di curvatura C, l'immagine, sempre reale, impiccolita e capovolta, si porta dal fuoco principale fino al centro C.

2°. Spostando l'oggetto dal centro C fino al fuoco (fig. 44) l'immagine si forma al di là del centro, ed è sempre reale, e capovolta, ma ingrandita.

3°. Finalmente quando l'oggetto si trova tra il fuoco e lo specchio, come nella fig. 45, ovunque si porti il foglio non vi si troverà mai l'immagine, e il foglio risulterà uniformemente illuminato. — Ciò è dovuto al fatto che i raggi divergenti che partono, per es., da P, dopo la riflessione *restano divergenti*, cosicchè il coniugato di P è adesso un punto P' situato dietro lo specchio, e dell'oggetto PQ si ha un'immagine come P'Q', diritta e ingrandita visibile

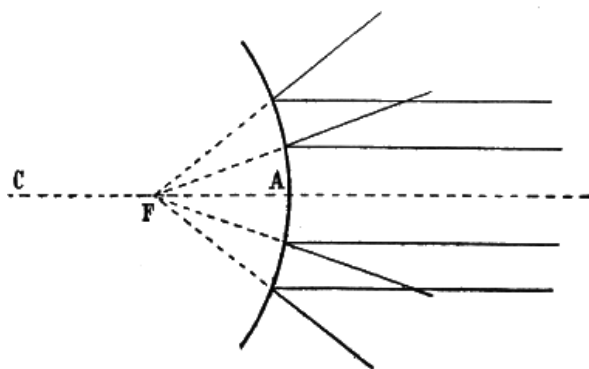


Fig. 46.

direttamente con gli occhi (ma non ottenibile sul foglio di carta), come negli specchi piani. Si ha cioè un'immagine virtuale.

43. Specchi convessi. — Argentando esternamente una calotta sferica si ottiene uno specchio sferico convesso. In questo caso i raggi omocentrici restano ancora omocentrici, ma se sono inizialmente divergenti, dopo la riflessione restano tali, anzi aumentano la loro divergenza. Così a un fascio di raggi paralleli (fig. 46) all'asse principale corrisponde un fascio di raggi divergenti, *come se* partissero da un *fuoco virtuale* F situato ancora a metà del raggio di curvatura.

Le immagini di un oggetto non potranno perciò mai essere reali, ma si può trovare per via grafica e dimostrare con l'esperienza che si hanno sempre immagini virtuali, diritte e impiccolite, e situate al di là dello specchio.

Rifrazione e dispersione della luce.

44. **Leggi della rifrazione.** — Un raggio di luce, incontrando obliquamente la superficie di separazione di due mezzi trasparenti come l'aria e il vetro, devia bruscamente, conservando sempre nel secondo mezzo il suo andamento rettilineo. È questo il fenomeno della *rifrazione*; esso riesce ben visibile quando uno stretto fascio di luce solare, in una stanza oscura, investe l'acqua contenuta in una vasca di vetro (fig. 47); si osserva allora che alla superficie di separazione il fascio incidente si divide in due parti: un fascio riflesso secondo le note leggi, e un altro penetrante nell'acqua, che si può rendere visibile aggiungendo all'acqua delle gocce di latte o di una soluzione di fluoresceina.

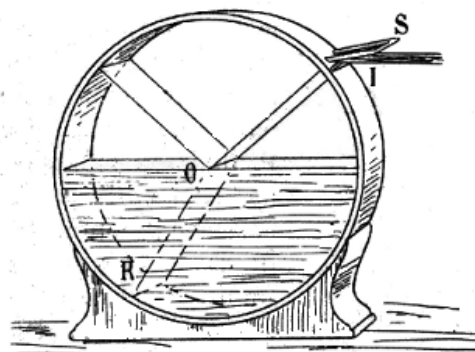


Fig. 47.

Si chiama *angolo d'incidenza*, come nel caso della riflessione, l'angolo ISP (fig. 48) del raggio incidente con la normale SP nel punto d'incidenza; *angolo di rifrazione* quello RSP' formato con la normale dal raggio rifratto SR. Nel caso della figura l'angolo di rifrazione è minore di quello d'incidenza, cioè il raggio rifratto si *accosta* alla normale; quando questo avviene il secondo mezzo, es. l'acqua, si dice *più rifrangente* del primo. —

Ma se dal di sotto provenisse il raggio RS, esso si rifrangerebbe nell'aria, come l'esperienza dimostra, secondo SI, *allontanandosi* dalla normale.

Le leggi della rifrazione, dimostrate con le più scrupolose misure, sono:

1° Il raggio incidente, il raggio rifratto e la normale sono in un medesimo piano.

2° Il rapporto del seno dell'angolo d'incidenza per il seno dell'angolo di rifrazione, è costante al variare di entrambi. — Così nella fig. 48, descritta una circonferenza di

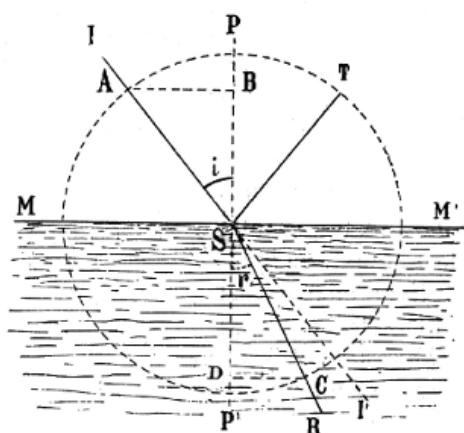


Fig. 48.

centro S e di raggio eguale a 1, si ha che il rapporto $\frac{AB}{CD}$ delle perpendicolari abbassate da A e C su PP' è sempre lo stesso, comunque si vari l'inclinazione del raggio incidente

IS.

Questo rapporto si chiama *indice di rifrazione* del secondo mezzo rispetto al primo; esso dipende dalla natura dei due mezzi in presenza, e anche dal *colore* della luce impiegata. La *deviazione* del raggio, cioè l'angolo I'SR, è maggiore per la luce violetta che per la luce rossa; e a ogni colore corrisponde un diverso indice di rifrazione, e quindi una diversa deviazione; ne risulta che se il raggio incidente è di luce *bianca*, siccome questa è costituita (e lo vedremo bene più in là) dalla sovrapposizione d'infiniti raggi diversamente colorati, dopo la rifrazione i diversi raggi, prima sovrapposti, seguono ognuno la propria via, e perciò si separano alquanto, restando i rossi meno e i violetti più deviati. — Per semplicità però in questo primo studio della rifrazione non terremo conto di questo fenomeno, detto *dispersione*, cioè della disuguale rifrazione dei raggi diversamente colorati; e a ogni raggio incidente faremo corrispondere un solo raggio rifratto. Le nostre deduzioni saranno quindi esatte se la luce incidente è d'un sol colore, come quella, ad es., che emana da una fiamma Bunsen in cui sia disposta una perla di cloruro di sodio, che la colora di un bel giallo-aranciato.

45. **Riflessione totale.** — L'indice di rifrazione n è dato adunque da

$$n = \frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} \quad (1)$$

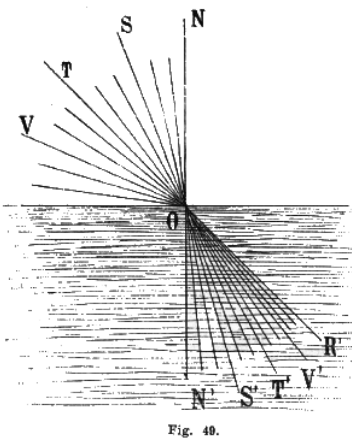


Fig. 49.

ove i ed r denotano l'angolo d'incidenza e l'angolo di rifrazione — Esso è maggiore di 1 quando i è maggiore di r ; e in tal caso per $i = 90^\circ$, cioè per un raggio incidente che investe la superficie di separazione con la maggiore inclinazione possibile, rispetto alla normale, si ha un raggio rifratto come OR' (fig. 49), e perciò ai diversi raggi incidenti come NO, SO, TO, VO ecc., compresi in un angolo retto, corrispondono i raggi rifratti ON', OS', OT', OV', ecc. compresi nell'angolo R'ON', minore di un retto, e chiamato *angolo limite*. Inversamente, se i raggi provengono dal secondo mezzo, devieranno allontanandosi dalla normale; ma se l'incidenza è maggiore dell'angolo limite, non c'è posto per il raggio rifratto tra i raggi contenuti, nell'aria, in un angolo retto, poichè ognuno di questi

dà nell'acqua un raggio *compreso* nell'angolo limite. — L'esperienza dimostra che mentre il raggio incidente, in generale, in parte si riflette e in parte si rifrange, quando l'angolo d'incidenza supera l'angolo limite (fig. 50) il raggio incidente si *riflette totalmente* e nessuna parte ne esce nel primo mezzo.

Noi possiamo osservare il fenomeno della riflessione totale con un prisma di vetro avente per sezione un triangolo isoscele rettangolo ABC (fig. 51). — Si fa cadere sulla faccia AB, con incidenza normale, un raggio S, che penetrerà perciò senza deviazione entro il prisma; giunto in E dovrebbe uscire nell'aria; ma formando con la normale EN alla nuova superficie rifrangente un angolo di 45° , ed essendo per il vetro

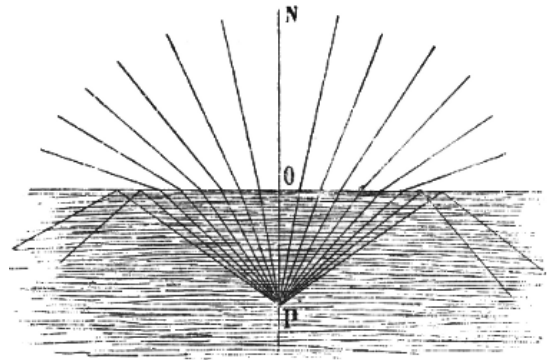


Fig. 50.

l'angolo limite eguale a circa 42° , il raggio si rifletterà *totalmente* in AC, e uscirà secondo ER, come se la faccia AG, anzichè di aria, fosse coperta dal più perfetto dei metalli speculari.

L'angolo limite, per quanto si è detto, è l'angolo di rifrazione corrispondente a un'incidenza di 90° ; chiamandolo α la formola (1) ci dà:

$$n = \frac{\text{sen } 90}{\text{sen } \alpha} = \frac{1}{\text{sen } \alpha}$$

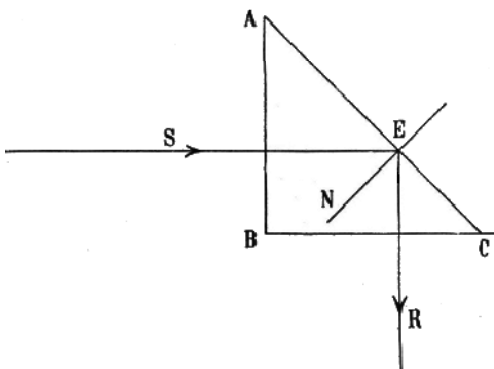


Fig. 51.

da cui

$$\text{sen } \alpha = \frac{1}{n}$$

questa formola permette di calcolare α quando si conosca l'indice di rifrazione n .

46. Rifrazione attraverso a un prisma. — Un mezzo rifrangente limitato da due facce piane AB, AG (fig. 52), e da una superficie qualsiasi BG, dicesi in Ottica *prisma*. Un raggio luminoso come SI, di un sol colore, devia alla prima faccia, prendendo la direzione

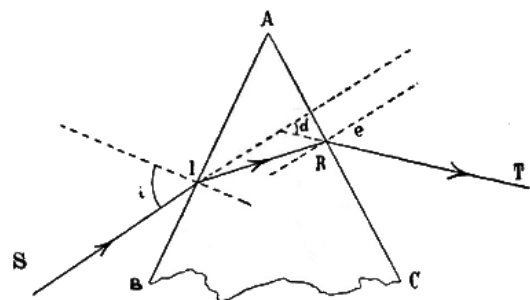


Fig. 52.

IR; e uscendo dalla seconda faccia subisce una nuova deviazione secondo RT che, come la prima, lo allontana dal vertice A. La deviazione totale del raggio è misurata dall'angolo d ; l'angolo i dicesi di incidenza, l'angolo e di emergenza.

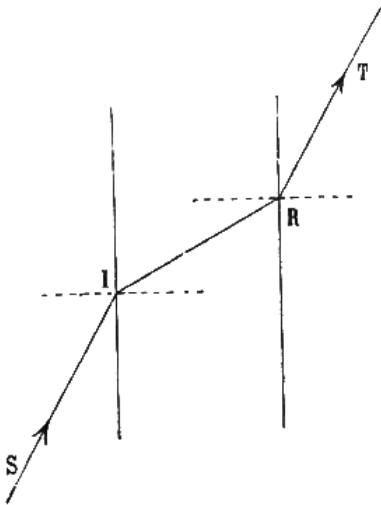


Fig. 53.

La deviazione d muta inclinando diversamente, rispetto alla faccia AB, il raggio incidente SI; e si dimostra che essa acquista il più piccolo valore quando l'angolo i è eguale all'angolo e , e perciò quando il raggio IR entro il prisma è normale alla bisettrice dell'angolo A, ovvero il triangolo AIR è isoscele. In conseguenza, lasciando fermo il raggio incidente SI e ruotando in modo continuo il prisma, ruota pure il raggio rifratto; e questo per una conveniente posizione del prisma si allontana meno dalla primitiva direzione, e se ne allontana più per tutte le altre.

La deviazione diminuisce impiccolendo l'angolo rifrangente A del prisma; e per un angolo zero, cioè per due facce parallele (fig. 53), il raggio RT diviene parallelo al raggio incidente SI, subendo solo uno spostamento laterale.

47. **Lenti sferiche.** — Una lente sferica è una porzione di sostanza trasparente limitata da due calotte sferiche. Un fascio di raggi paralleli che l'attraversi diviene convergente o divergente secondo che si tratti di una lente più spessa o meno spessa nel mezzo; sono lenti convergenti le A, B, C della fig. 54; divergenti le D, E, F, della fig. 55; le A, B, D, E si dicono anche, rispettivamente, biconvessa, piano-convessa, biconcava e piano-concava; le C e F menischi convergente e divergente.

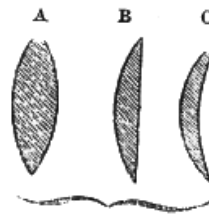


Fig. 54.

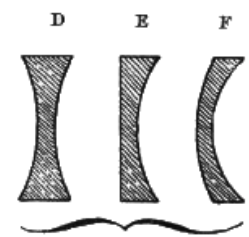


Fig. 55.

In generale si osservi che ogni raggio, penetrando nella lente, subirà una prima deviazione che lo avvicina alla normale nel punto di incidenza, cioè al raggio di curvatura condotto per il punto medesimo. Una nuova deviazione subirà il raggio all'uscita dal vetro nell'aria; e le due rifrazioni, all'incirca come nel prisma, devieranno il raggio incidente verso le parti più spesse della lente. Il problema di determinare l'insieme dei raggi rifratti, corrispondenti a un dato fascio di raggi incidenti, sarà perciò molto complicato. Ma esso si semplifica molto qualora si tratti di lenti molto sottili, come quelle usate negli occhiali comuni, e i raggi di curvatura delle calotte terminali siano molto grandi rispetto alla superficie utilizzata della lente. Noi enunceremo, senza dimostrarle, le proprietà di queste lenti, e dei risultati ottenuti ci potremo, fino a un certo punto, servire per le lenti alquanto più spesse.

Chiameremo, in ogni caso, *asse principale* di una lente la congiungente i centri delle sfere cui le calotte superficiali appartengono; e *centro ottico* di una lente sottile il suo punto di mezzo.

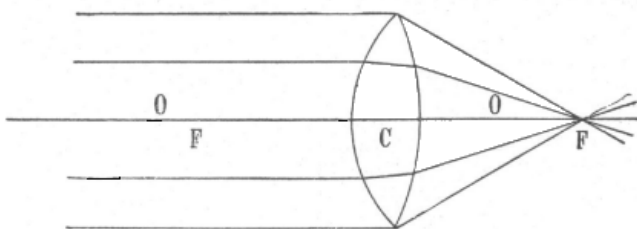


Fig. 56.

(fig. 56). Ci saranno perciò due fuochi dalle due parti della lente, e a eguale distanza da questa nelle lenti sottili.

48. **Lenti convergenti.** — Con le restrizioni suddette si dimostrano per le lenti convergenti le seguenti proprietà, analoghe a quelle trovate per gli specchi.

1°. Un fascio di raggi paralleli all'asse principale converge dopo la rifrazione in un punto F dell'asse chiamato *fuoco principale*

2°. Un fascio di raggi, partenti da un punto, dopo la rifrazione passa ancora per un altro punto, detto fuoco coniugato del primo.

3°. Un raggio passante pel centro ottico prosegue il suo cammino come se la lente non esistesse.

4°. Un raggio passante pel fuoco emerge parallelamente all'asse principale.

In base a queste regole si può trovare (fig. 57) facilmente il punto coniugato del punto luminoso B; il raggio BM si rifrangerà per la regola 1^a in MF'; il raggio BO proseguirà indisturbato per la regola 3^a; e tutti i raggi partiti da B concorreranno nel punto B' d'incontro di MF' e BO, per la regola 2^a. Come riprova il raggio BF che, per la regola 4^a, emerge parallelamente all'asse principale, incontra gli altri due nello stesso punto B'. La lente adunque trasforma il cono divergente BMON in un cono convergente in B'; e se il punto B è vivamente luminoso, e si dispone al di là della lente un foglio di carta, questa taglierà il cono dei raggi emergenti in una regione illuminata, che diverrà più stretta e più luminosa quando il foglio si avvicina a B'; e se il foglio è in B'A', si avrà su di esso un punto vivamente illuminato, *immagine reale* del punto B. Ai diversi punti più o meno luminosi di un oggetto AB corrisponderanno dei punti immagine similmente disposti sul foglio, e su questo si dipingerà una *immagine reale capovolta* dell'oggetto stesso.

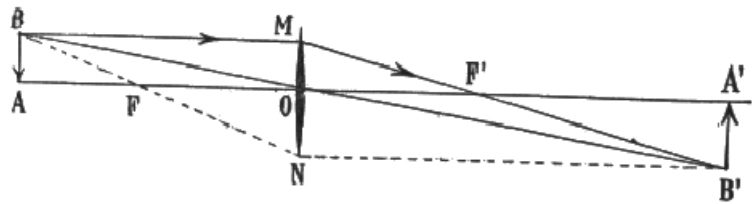


Fig. 57.

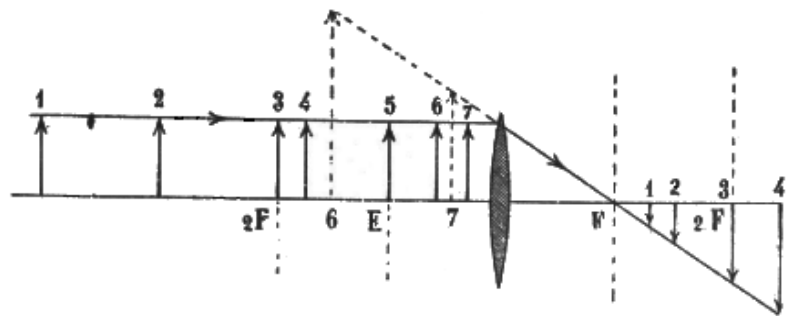


Fig. 58.

La posizione dell'immagine cambia, come negli specchi, portando l'oggetto a diverse distanze dalla lente. Si possono prevedere con le regole grafiche e ritrovare con l'esperienza le seguenti proprietà, rappresentate nella fig. 58.

1. Quando l'oggetto si sposta da una distanza grandissima fino a una distanza doppia di quella focale l'immagine è reale, capovolta e impiccolita, e si sposta dal fuoco fino al doppio della distanza focale. Funzionano in queste condizioni gli *obbiettivi* delle macchine fotografiche.

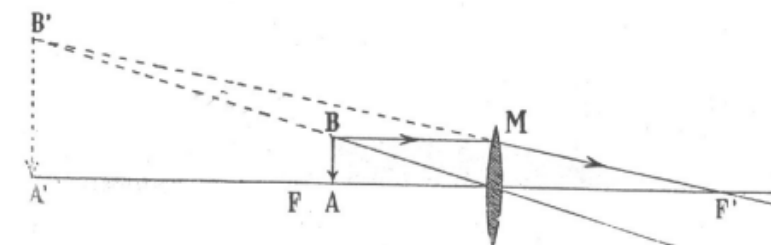


Fig. 59.

2. Quando l'oggetto si porta dal doppio della distanza focale fino al fuoco, l'immagine è reale, capovolta, ingrandita e si porta dal doppio della distanza focale fino a distanza grandissima. Funzionano in tal modo gli *obbiettivi* da proiezione; ed è chiaro che lo stesso obiettivo può servire in questo e nel 1° caso.

3. Finalmente quando l'oggetto è disposto tra il fuoco e la lente (fig. 59) i raggi che partono da ogni punto provano una diminuzione di divergenza traversando la lente, ma restano ancora divergenti. Si hanno allora immagini *virtuali*, come nel caso analogo incontrato negli specchi concavi; e l'immagine A'B', osservabile direttamente col ricevere i raggi nell'occhio, è ingrandita e diretta. Funzionano in tal modo gli *oculari* o le *lenti d'ingrandimento*.

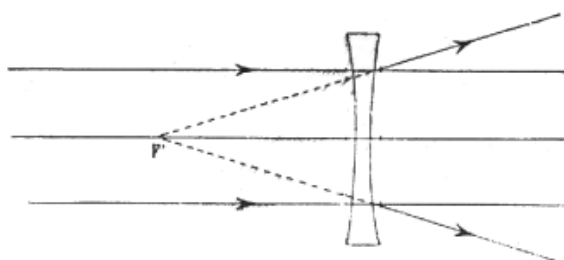


Fig. 60.

49. **Lenti divergenti.** — Una lente divergente fa corrispondere, come nella fig. 60 a un fascio di raggi paralleli all'asse un fascio di raggi divergenti da un *fuoco virtuale* F'. Valgono per esse, del

resto, le regole 2 e 3 date per la costruzione dei raggi rifratti dalle lenti convergenti; e se ne può dedurre la regola per la costruzione della immagine di un punto.

Così nella fig. 61 il raggio BM si rifrange in modo che il suo prolungamento MB' passa per il fuoco F'; il raggio BO prosegue indisturbato, e perciò dalla lente verrà fuori un cono di raggi divergenti da B', e all'oggetto BA corrisponderà l'immagine virtuale B'A' diritta, impiccolita e più vicina alla lente.

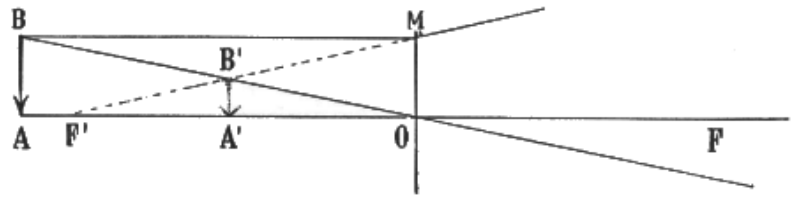


Fig. 61.

In generale, per le lenti convergenti e divergenti, l'oggetto e l'immagine sono viste sotto angolo eguale dal centro ottico della lente; e perciò le loro grandezze saranno proporzionali alle loro distanze dal centro.

50. **L'occhio umano** ridotto alle sue parti essenziali, è costituito da un globo contenente una successione di mezzi trasparenti limitata esternamente (fig. 62) dalla cornea KK', cui segue l'umor acqueo, poi un diaframma forato II' che è l'iride con la pupilla P, indi la lente cristallina L e la camera V piena dell'umor vitreo. In fondo è disposta la retina, ove si espandono le estremità del nervo ottico M. Tutta la serie dei mezzi trasparenti citati ha il solo scopo di produrre, come una lente convergente, un'immagine reale, degli oggetti sulla retina M; la funzione visiva si compie poi con un meccanismo psicologico di cui noi non dobbiamo occuparci.

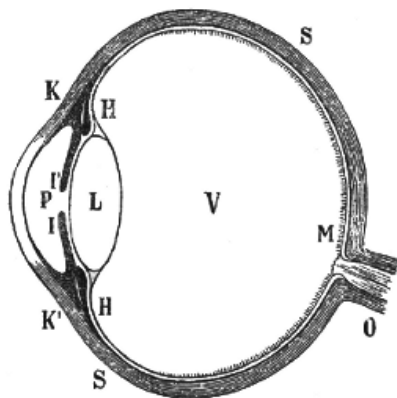


Fig. 62.

Se l'occhio fosse un sistema ottico rigido, le immagini degli oggetti situati a distanze diverse si formerebbero, come nella fig. 58, anch'esse a distanze diverse; invece l'occhio normale fornisce sempre un'immagine netta sulla retina, anche spostando l'oggetto da distanza grandissima fino a circa 15 centimetri. Questa facoltà, detta *accomodazione* dell'occhio, è dovuta alla *deformabilità* del cristallino, per cui in maniera istintiva, guardando un oggetto collocato entro quei limiti, il cristallino acquista tale grado di convergenza da portare sempre sulla retina l'immagine netta. L'occhio nelle condizioni di riposo è adattato alla visione di oggetti lontanissimi; nel guardare gli oggetti vicini il cristallino subisce una diminuzione del raggio di curvatura, e un relativo aumento di convergenza.

Ma questa facoltà di accomodamento non è così ampia negli occhi anormali. I miopi, ad esempio, posson vedere nettamente oggetti disposti a distanza anche minore di 15 cm, ma non gli oggetti lontani; il loro occhio è, perciò, troppo convergente. Si corregge questo difetto per mezzo di una lente divergente, che produce degli oggetti lontani immagini virtuali più piccole, ma vicine alla lente. Così una lente biconcava, la quale abbia a distanza focale virtuale di 1 m, produce degli oggetti a distanza infinita una immagine virtuale situata nel *piano focale*, cioè a 1 m di distanza dalla lente; permetterà quindi la visione netta degli oggetti lontani a un miope che non riesca a veder nettamente al di là di 1 metro.

Esiste anche il difetto opposto, la *ipermetropia*, per cui l'occhio è *poco* convergente, e perciò, anche nel massimo sforzo di accomodazione, non riesce a vedere nettamente gli oggetti troppo vicini. Si corregge questo difetto con le lenti convergenti, che danno, degli oggetti vicini, immagini virtuali più lontane (fig. 60). Se ad esempio si vuol render normale un occhio ipermetrope che non veda bene al di qua di 1 metro, e rendergli netta la visione per gli oggetti situati fino a 25 cm, occorrerà una lente tale che di un oggetto a 25 cm. dia un'immagine virtuale a 1 metro di distanza.

Basta a tal uopo una lente che abbia $\frac{1}{3}$ di metro come distanza focale.

L'ampiezza dell'accomodazione, legata alle variazioni di curvatura del cristallino, diminuisce con l'età, a misura che esso si va irrigidendo. Non è più possibile, allora, dare al cristallino la sua

massima convergenza, e quindi non si riesce a veder bene gli oggetti molto vicini. Si sente in tal caso il bisogno delle lenti convergenti, come nella ipermetropia, per render netta la visione a piccola distanza.

51. Dispersione della luce bianca. — Tutto ciò che abbiamo esposto riguardo ai prismi e alle lenti presuppone che la luce adoperata sia d'un solo colore, poichè, come si è detto, ai diversi colori corrisponde una rifrangibilità differente, e perciò una diversa deviazione nel prisma, e una diversa convergenza nelle lenti.

Inversamente noi ci possiamo servire della loro diversa refrangibilità per separare i colori componenti una luce complessa. L'esperienza che segue, dovuta a Newton, serve a questo scopo; essa permise di eseguire l'analisi della luce bianca, come quella del Sole.

La fenditura F (fig. 63) è illuminata con luce solare, e una lente L ne produce un'immagine netta F' sullo schermo M. Interponendo nel tragitto dei raggi il prisma di vetro P, i raggi vengono deviati, e sullo schermo si disegna un bel rettangolo colorato da R a V, che presenta tutta la serie dei colori dell'iride. Questi colori sono un'infinità, degradanti dall'uno all'altro in modo continuo con le tonalità più delicate. A ognuno di questi colori corrisponde un valore speciale dell'indice di rifrazione, e quindi una particolare deviazione; e il rettangolo RV può esser considerato come la giusta posizione di infinite immagini della fenditura F diversamente colorate, che senza il prisma si sovrapponevano in B, mentre per l'inuguale deviazione prodotta dal prisma si dispongono l'una sotto l'altra da R a V. L'intero spettro (V. Tavola a colori a pag. 96) si suole dividere in sette regioni tipiche, cui corrispondono, in massima, i colori seguenti, a partire da R: rosso, aranciato, giallo, verde, azzurro, indaco, violetto.

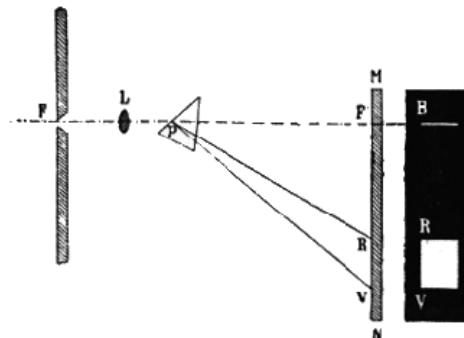


Fig. 63.

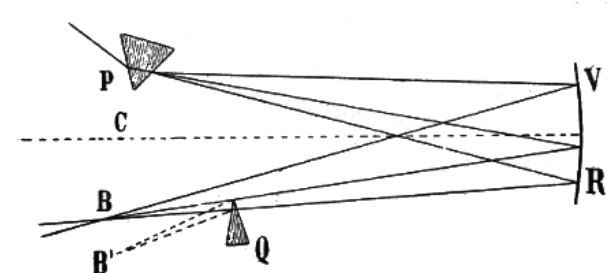


Fig. 64.

ottengono allora due immagini B, B' *colorate*; in una concorreranno, per es., il rosso e i colori prossimi ad esso, nell'altra i rimanenti, e fondendosi insieme, come nella tavolozza d'un pittore, produrranno tinte diverse. E poichè la loro sovrapposizione ricostituirebbe la luce bianca, le tinte di B e B' si dicono *complementari*.

La *sintesi* della luce bianca, per la ricomposizione dei colori spettrali, può anche essere ottenuta facendo pervenire i colori medesimi sull'occhio in una successione molto rapida, e approfittando della proprietà, detta *persistenza delle immagini nella retina*, per la quale la sensazione luminosa perdura per $\frac{1}{10}$ di secondo dopo cessato lo stimolo. Se si riceve, ad esempio, lo spettro su uno specchio rotante, questo rinvierà tutti i colori uno dopo l'altro nello stesso posto di uno schermo, e l'occhio vedrà sullo schermo una fascia bianca.

52. Colori dei corpi. — I corpi ci appaiono per lo più colorati; i più per diffusione, come un foglio di carta verde, altri per trasparenza, come un vetro giallo o le soluzioni di sostanze coloranti.

L'origine di questi colori può esser facilmente spiegata riproducendo in condizioni opportune l'esperienza dello spettro solare. Distendendo sullo schermo un foglio di carta bianca, lo spettro vi apparisce nelle condizioni descritte; se lo schermo è invece di carta nera, lo spettro sparisce interamente, poichè la carta assorbe tutti i colori egualmente; con un foglio di carta colorata

spariranno alcune parti dello spettro, e saranno visibili le altre. Adunque le sostanze colorate per diffusione assorbono alcuni colori e diffondono gli altri; e questi fondendosi insieme danno appunto il colore apparente della sostanza. Analogamente se si interpone, dopo il prisma, un vetro rosso o giallo, o una vaschetta con una soluzione colorata, si osserverà che sullo schermo bianco M mancano alcuni colori, che sono stati assorbiti dal corpo interposto; e ricomponendo i colori che restano, come nella fig. 65, si ottiene appunto la tinta che il corpo presenta per trasparenza.

I colori dei corpi rivelano adunque che essi hanno un *assorbimento selettivo*, o disuguale per le luci di diversa refrangibilità. Noi ci occuperemo più a lungo di questo fenomeno nel capitolo della Spettroscopia. Ma vogliamo notare sin d'adesso che il colore *apparente* dei corpi per diffusione o per trasparenza, per quanto somigli a quello di una parte dello spettro, non è mai un colore *puro*, cioè un colore indecomponibile, come quelli dello spettro. Possono invero due colori spettrali puri, sovrapponendosi, dare una tinta che l'occhio giudicherà eguale a una tinta intermedia dello spettro, ma che, decomposta col prisma, apparisce costituita da due luci diverse. Si può avere, cioè, la stessa tinta *apparente* con un colore puro preso dallo spettro, o con due colori puri anche molto diversi tra loro. Così il verde è un colore puro dello spettro; ma si può ottenere un verde *fisiologicamente* eguale, sovrapponendo del rosso e dell'azzurro puri.

53. Acromatismo nelle lenti. — La distanza focale f di una lente dipende dal valore dell'indice di rifrazione n secondo la seguente formola, ove r denota il raggio di curvatura, supposto eguale per le due faccie:

$$f = \frac{r}{2(n-1)}$$

La distanza focale sarà quindi minore per i raggi di maggiore rifrangibilità, come i violetti, cui corrisponde un indice di rifrazione maggiore. A un fascio parallelo di luce bianca (fig. 65) corrisponderanno diversi coni convergenti per i vari colori; tra i quali sarà meno convergente quello

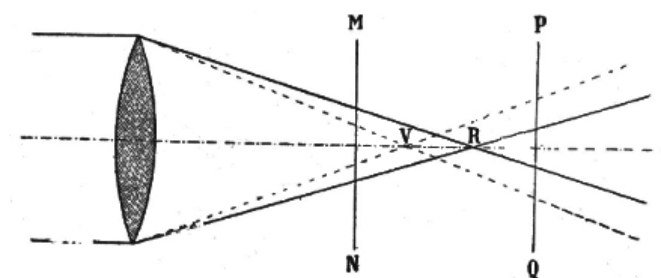


Fig. 65.

dei raggi rossi col vertice in R; i diversi fuochi saranno distribuiti da R a V.

È impossibile adunque che l'immagine di un punto bianco sia un punto bianco, poichè collocando lo schermo nella posizione MN si avrà un cerchio bordato di rosso; nella posizione PQ un cerchio bordato di violetto, e in nessuna posizione si avrà un punto ove tutti i colori convergono insieme.

Queste imperfezioni cromatiche delle immagini si aggiungono alle altre dovute al fatto che le lenti si allontanano alquanto dalle condizioni ideali di estrema sottigliezza, di piccolissima apertura, ecc. che son necessarie perchè l'immagine di un punto, anche monocromatico, sia un altro punto geometrico. Ne risulta una certa indecisione nei contorni e nei particolari minuti delle immagini, a evitare la quale si è rivolta per molto tempo l'attenzione degli ottici.

Noi non possiamo entrare nei particolari di questi studi così fecondi di pratici risultati; ci limiteremo a dire che col sostituire a una lente sola un *sistema* di lenti di diverse curvature, e costruite con qualità speciali di vetri, cui corrispondono proprietà ottiche *compensatrici*, si è riusciti a ottenere degli obbiettivi praticamente perfetti, nei quali son sensibilmente eliminate le *aberrazioni* di rifrazione e quelle di dispersione. Per intendere come si possano attenuare queste ultime, si noti che lo spettro ottenuto (V. fig. 64), usando prismi geometricamente uguali e costituiti di sostanze diverse, presentano

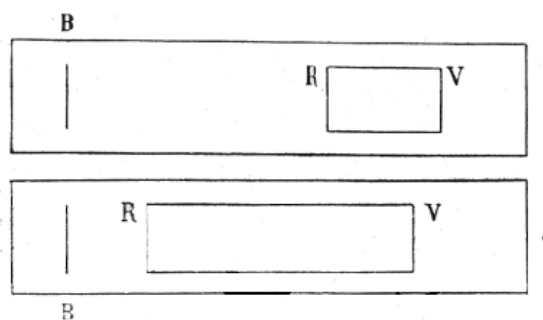


Fig. 66.

qualitativamente la stessa successione di colori, ma mentre con alcune sostanze lo spettro RV è assai stretto (nel senso RV) e molto deviato (fig. 66, 1) da B, con altre i primi colori son pochissimo deviati, e assai prossimi a B, e gli altri se ne allontanano molto (fig. 67, 2).

Le prime sostanze son dette debolmente dispersive, le seconde fortemente dispersive; citeremo come tipo delle prime il vetro crown; e come tipo delle seconde il vetro flint e il solfuro di carbonio. S'intende subito allora che associando una lente convergente di crown, e una lente *poco* divergente di flint si potrà con quest'ultima compensare la piccola dispersione prodotta dalla prima, senza annullarne la grande convergenza; si otterrà così una lente convergente *presso a poco acromatica*; che ha cioè sensibilmente la stessa distanza focale per i colori più importanti dello spettro.

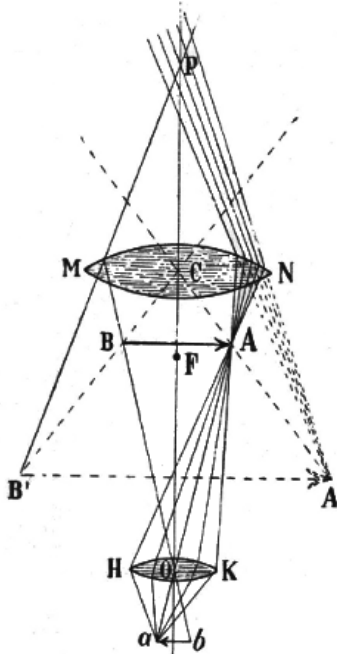


Fig. 67.

54. Strumenti ottici. — Abbiamo già fatto cenno al § 48, degli obbiettivi fotografici, degli obbiettivi per proiezione e delle lenti d'ingrandimento; che son tutte applicazioni della proprietà delle lenti convergenti di fornire immagini reali o virtuali, impiccolite o ingrandite.

Daremo un cenno adesso di altri strumenti ottici più complicati, risultanti cioè dalla combinazione di diverse lenti.

Il *microscopio composto* serve all'osservazione di oggetti vicini molto piccoli, e risulta essenzialmente dall'*obbiettivo* e dall'*oculare*, che sono, ciascuno, un sistema di lenti il cui effetto equivale a quello di una lente convergente. La fig. 67 ne dà l'aspetto schematico.

L'obbiettivo HK ha una piccolissima distanza focale; poco al di là del fuoco è disposto l'oggetto *ab* fortemente illuminato, e l'obbiettivo ne produce una immagine reale rovesciata e ingrandita AB. Questa viene a trovarsi tra l'oculare MN e il suo fuoco F; si formerà perciò una nuova immagine virtuale A'B' ancora ingrandita, osservabile direttamente con l'occhio da P.

Nel *cannocchiale astronomico* si ha pure un obbiettivo e un oculare entrambi convergenti. Il primo produce degli oggetti lontani un'immagine impiccolita, reale e capovolta, nel suo piano focale. Questa immagine viene osservata con l'oculare, che funziona, come nel microscopio, da lente d'ingrandimento.

Il microscopio e il cannocchiale astronomico danno un'immagine rovesciata degli oggetti, il che non produce inconvenienti per lo scopo cui tali apparecchi son destinati.

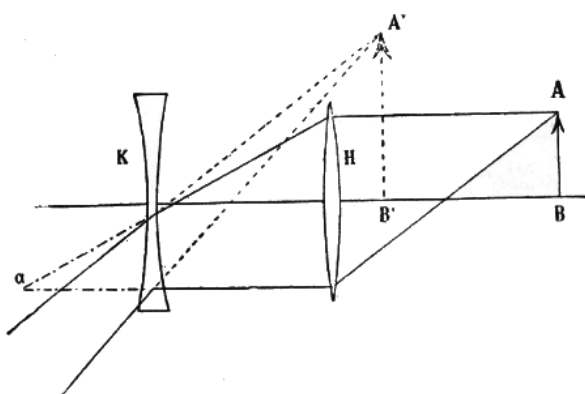


Fig. 68.

Ma è più comoda la disposizione del cannocchiale di Galileo, usata nei binocoli comuni.

I raggi, provenienti dall'obbiettivo K (fig. 68), formerebbero in *a* un'immagine reale del punto A dell'oggetto; ma investono, prima d'incontrarsi, l'oculare divergente K che li rende divergenti, come se provenissero da A'; si ottiene così dell'oggetto AB l'immagine virtuale, ingrandita e diritta A'B'.

OTTICA FISICA.

Teoria ondulatoria. — Diffrazione. — Interferenza. — Polarizzazione.

53. **Teoria dell'emissione e delle ondulazioni.** — I fenomeni ottici che finora abbiamo passato in rassegna possono venire spiegati con la *teoria dell'emissione*, la quale ebbe il suo massimo sviluppo per opera di Newton. Dai corpi luminosi partirebbero incessantemente dei corpuscoli imponderabili, ma dotati d'inerzia, lanciati con enorme velocità, e propagantisi in linea retta; passando da un mezzo a un altro alcuni rimbalzerebbero nel primo mezzo, seguendo le leggi della riflessione, altri penetrerebbero nel secondo mezzo, subendo talune forze speciali in prossimità della superficie di separazione, che avrebbero per effetto una deviazione dal primitivo cammino, secondo le leggi della rifrazione.

Le particelle sarebbero di tante specie quanti sono i colori dello spettro; e a ciascuna specie corrisponderebbe un valore diverso della velocità nei mezzi dispersivi; alla diversa velocità sarebbe dovuta la diversa rifrangibilità, mentre tutte si propagherebbero senza separarsi nel vuoto, ove hanno la medesima velocità.

Le grandi risorse del genio di Newton permisero di adattare la teoria, complicandola sempre più, alla spiegazione di tutti i fenomeni noti al suo tempo, dando ragione perfino del brillante fenomeno degli anelli di Newton, da lui stesso scoperti e sottoposti ad acutissime indagini, e che hanno la stessa origine dei colori delle bolle di sapone. Ma proprio da quel tempo una nuova serie di fenomeni interessantissimi, quali le interferenze, la diffrazione, la doppia rifrazione, la polarizzazione, di cui daremo tra poco un breve cenno, misero a duro cimento la teoria newtoniana; mentre un'altra ne sorgeva per opera di Huyghens, la *teoria delle ondulazioni*, che tutti i fatti osservati riusciva invece a spiegare nel modo più semplice, e che costituì nelle mani del grande fisico francese Fresnel uno strumento potente e completo di sintesi e di previsione per una serie illimitata di antichi e nuovi fenomeni.

Secondo questa teoria nei corpi luminosi si compiono da ciascuna particella delle vibrazioni rapidissime, in numero di alcune centinaia di triloni a ogni minuto secondo; le vibrazioni si propagano per onde, come il suono, in un mezzo che riempie tutto lo spazio, anche dove non c'è materia, e cui si diede il nome di *etere cosmico*. Ma, a differenza delle onde sonore, le onde luminose nell'etere sono *trasversali*, cioè si compiono perpendicolarmente alla direzione di propagazione, come avviene delle vibrazioni elastiche in un tubo di caoutchouc indefinito. Ai raggi di diversa rifrangibilità, e quindi di diverso colore, compete un diverso numero di vibrazioni, maggiore per i raggi violetti, più rifrangibili, minore per i rossi; essi avrebbero una diversa *lunghezza d'onda*, definita come lo spazio percorso dalla luce nella durata di una vibrazione. La lunghezza d'onda è molto piccola, malgrado la grande velocità della luce, per la piccolissima durata di una vibrazione; così i raggi rossi avrebbero una lunghezza d'onda di circa 0,78 micron, e i violetti la lunghezza d'onda di 0,40 micron.

Noi non possiamo che dare una tenuissima idea dei fenomeni studiati in questa parte dell'ottica, e della spiegazione, fondata sulla teoria ondulatoria che ne rende conto nei minimi particolari. E cominceremo con l'illustrare il principio d'Huyghens-Fresnel da cui si prendon le mosse per spiegare la propagazione, la riflessione e la rifrazione della luce.

56. **Principio d'Huyghens-Fresnel.** — Immaginiamo una superficie d'acqua tranquilla sulla quale si faccia cadere una pietra; dal punto colpito un'onda circolare si estenderà tutto in giro, e in virtù di quest'onda ogni particella della superficie, quando è raggiunta da quella, esegue un'oscillazione verticale isolata e torna in quiete. L'onda è appunto costituita dall'insieme delle particelle che ad un dato istante sono in movimento: avanti e dietro di essa il liquido è in riposo.

Sia O il centro ove ebbe luogo lo scuotimento (fig. 69) e l'onda abbia a un dato istante la posizione A. Noi sappiamo che l'onda passerà fra poco per B; ma intanto O è già in quiete, e anche in quiete si trovano le parti del liquido che son fuori dell'onda A. Adunque *il moto futuro di B non potrà aver altra causa che il moto attuale di A*, e noi potremo ritenere il moto di B come l'effetto

delle perturbazioni che si propagano alla superficie del liquido per il moto attuale dei punti di A, considerati come nuovi centri di scuotimento.

Questo risultato non è più così evidente quando invece di un'onda sola si propaga una *continua serie di onde* dovute a una serie periodica di scuotimenti in O. In tal caso tutta la superficie sarà coperta da onde di diverso diametro che si inseguono con moto uniforme; e *tutti* i punti della superficie dovranno considerarsi come centri degli scuotimenti che agiscono, con un ritardo dipendente dalla distanza, sul punto B.

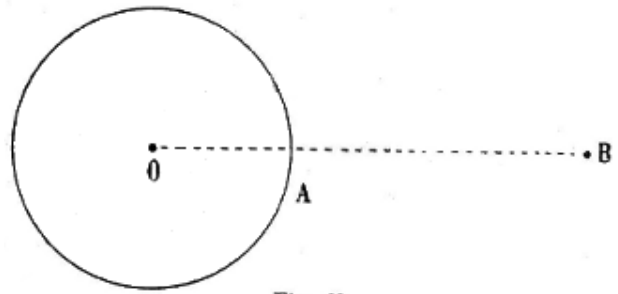


Fig. 69.

In ciò consiste appunto la grande efficacia di semplificazione apportata dal principio di Huyghens-Fresnel; esso ci dice che anche nel caso di onde continue (di qualunque natura) che invadano, rincorrendosi, tutto lo spazio, noi possiamo prevedere il moto attuale di B dimenticando la sorgente O, e tutti i punti vibranti dello spazio rilegati con B elasticamente; e tenendo conto solo delle vibrazioni che giungono in B, in quell'istante, dai vari punti di una superficie come A, tutti nella stessa fase vibratoria. Si dovrà in questo calcolo tener conto di ciò, che i vari punti della superficie A sono a diversa distanza da B; e perciò le loro onde parziali raggiungono B con fasi diverse, pure avendo la stessa fase all'origine; esse *interferiranno* in B, seguendo le regole da noi enunciate in Acustica, ma dando luogo a complicazioni maggiori, poichè le vibrazioni interferenti sono in numero infinito, anzichè due come nel caso allora esaminato.

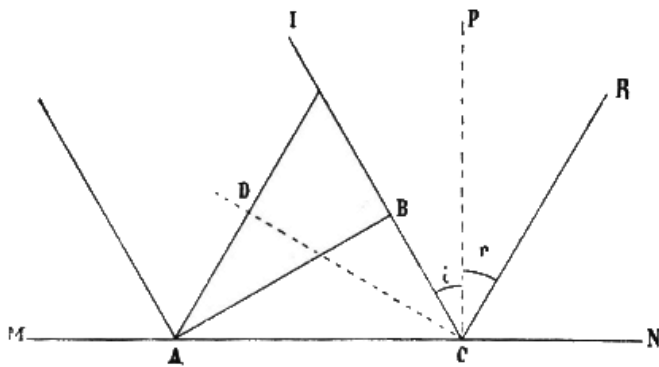


Fig. 70.

Il principio può estendersi ancora: si può cioè circoscrivere intorno a O una superficie *qualsiasi*, i cui punti non siano perciò nella stessa fase, considerare questi come i *sol*i centri di scuotimento, e calcolarne l'effetto in B, tenuto conto della *diversa* fase all'origine e della diversa distanza che le singole ondulazioni devon percorrere per giungere in B.

Come in Acustica, tutti i punti di una sfera che circonda il centro luminoso si troveranno nella medesima fase vibratoria, formeranno cioè una *superficie d'onda*; se il centro è abbastanza lontano, una parte della superficie medesima potrà considerarsi come piana, e le congiungenti col centro, cioè gli antichi raggi luminosi, che chiameremo *raggi dell'onda*, potranno considerarsi come paralleli. Se una tale onda piana AB investe la superficie di separazione di due mezzi MN (fig. 70), i punti di MN saranno colpiti dall'onda uno dopo l'altro, e quindi A diverrà centro di un'onda parziale con anticipo sui punti di AC, o, ciò che è lo stesso, i punti di AC son *contemporaneamente* centri di emissione di onde con fase diversa; le diverse onde parziali si sovrappongono nel primo mezzo, e se si cercano i punti che hanno, come risultato, egual fase, si trova che questi punti son disposti su una superficie piana CD, la quale forma con MN un angolo eguale a quello formato da AB. Si ottiene cioè *un'onda riflessa* CD, i cui raggi CR formano con la normale CP un angolo r eguale all'angolo d'incidenza i .

Come in Acustica, tutti i punti di una sfera che circonda il centro luminoso si

Per spiegare la rifrazione, considerando sempre i punti di AC come centri di emissione di onde con fase diversa, basta ammettere che nel secondo mezzo la velocità di propagazione dei raggi sia differente; e precisamente *minore* se il secondo mezzo è più rifrangente del primo. Si deduce allora la *legge dei seni*; e l'indice di rifrazione n del secondo mezzo rispetto al primo acquista un significato importante: esso è il rapporto tra la velocità della luce V_1 nel primo mezzo e quella V_2 nel secondo mezzo:

$$n = \frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{V_1}{V_2}$$

Nei mezzi più rifrangenti la velocità della luce deve essere quindi *minore* che nell'aria o nel vuoto: e ciò fu appunto dimostrato in modo diretto da Foucault, dando così l'ultimo crollo alla teoria dell'emissione che prevedeva proprio un risultato opposto.

57. Ma una conseguenza più importante del principio d'Huyghens-Fresnel riguarda la spiegazione del fenomeno della **diffrazione**. Quando la luce proveniente da un punto O è inviata attraverso a un foro sottile AB, praticato su uno schermo opaco (fig. 71), la propagazione rettilinea da noi enunciata nell'ottica geometrica richiederebbe che dello schermo S venisse illuminata solo la parte A'B' tagliata dal cono illuminante OAB, comunque sia piccolo il foro.

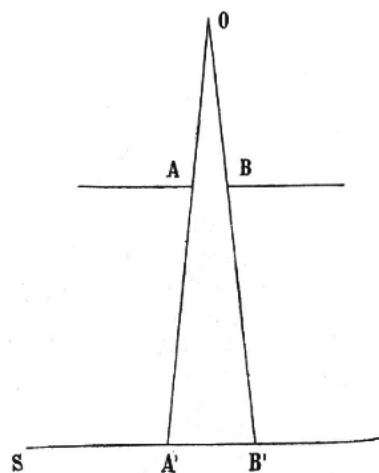


Fig. 71.

Orbene: quando la sorgente O è puntiforme, e il foro AB molto sottile, si manifestano dei fenomeni singolari, scoperti dal nostro Padre Grimaldi, e per cui la parte illuminata su S è molto più ampia di quello che consentirebbe la grandezza del foro, e *si allarga a misura che quello si restringe*: inoltre la macchia che sostituisce A'B' è circondata da una serie di anelli oscuri e luminosi, se la luce di O è monocromatica, o da una serie di anelli colorati se O invia luce bianca. Questo fenomeno, e gli altri svariati che si ottengono tutte le volte che la luce incontra diaframmi molto piccoli o fenditure sottili di qualunque forma, o una serie di aperture strettissime molto vicine ecc. ecc. (fenomeni di *diffrazione*), furono completamente spiegati da Fresnel, calcolando l'effetto nei vari punti dello schermo S delle vibrazioni inviate dalle porzioni d'onda che lo schermo forato non arresta.

58. **Esperienza di Young - Specchi di Fresnel.** — L'esperienza più semplice che permette di illustrare il principio dell'*interferenza dei raggi luminosi* è quella di Young, alla quale si sono poi

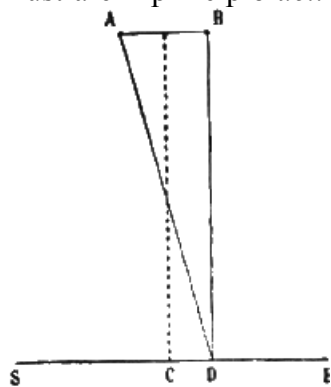


Fig. 72.

date diverse forme, e che diede modo a Fresnel, per primo, di calcolare il valore della lunghezza d'onda delle luci di diverso colore.

Due punti luminosi A e B (fig. 72) emettono vibrazioni esattamente concordanti (vedremo come ciò si possa ottenere), che giungono sullo schermo S. Nel punto C, situato ad eguale distanza da A e B, le vibrazioni che partirono da questi punti in concordanza di fase, e han percorso eguale cammino, giungono ancora concordanti, sommandosi perciò nei loro effetti.

Ma negli altri punti dello schermo, per es. in D, il cammino percorso dai raggi AD e BD è disuguale, e la differenza si va accentuando quanto più D è lontano da C; finché, quando quella differenza è eguale a mezza lunghezza d'onda, le vibrazioni

giungeranno in opposizione di fase, e produrranno l'oscurità. Se questo avviene in D, considerando un punto E situato ancora più a destra, e a distanza conveniente, la differenza dei cammini percorsi AE, BE diverrà eguale a un'intera lunghezza d'onda, le vibrazioni giungeranno perciò nella stessa fase, e si rinforzeranno come in C. Si riconosce così che lungo la retta CE si avranno, a destra e a sinistra di C, dei punti oscuri, e dei punti luminosi, o meglio che

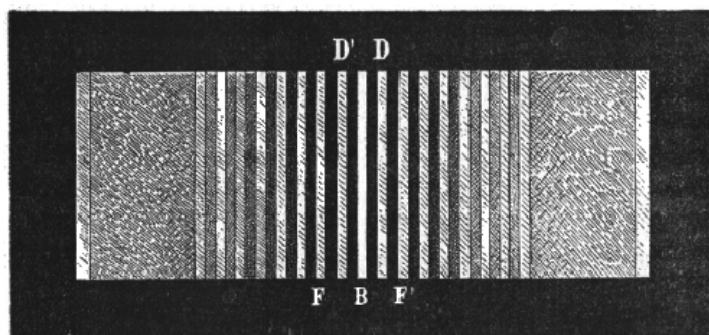


Fig. 73.

l'intensità luminosa varierà, in modo continuo e periodico, da un massimo a un minimo eguale a zero. Quello che si è detto per la retta CE dello schermo vale per tutte le altre dello schermo medesimo, parallele a CE, e che son fuori del piano della figura; cosicchè guardando lo schermo lo si vedrà solcato da *frange* oscure e luminose, dette appunto *frange d'interferenza*, che presentano all'incirca l'aspetto della fig. 73.

La larghezza delle frange, o la distanza tra due successive, dipende dalla distanza AB delle sorgenti, dalla distanza tra AB e lo schermo, e infine, a parità delle altre circostanze, *dalla lunghezza d'onda della luce impiegata*. È chiaro infatti che adoperando luce di lunghezza d'onda minore, basterà spostarsi *meno* sullo schermo, a partire da C, perchè la differenza delle distanze AD, BD eguagli mezza lunghezza d'onda, perchè s'incontri cioè il centro della prima frangia nera. Adunque con luce rossa le frange saranno più distanti, con luce violetta più rinserrate, e con luce bianca i diversi sistemi si sovrapporranno solo nelle immediate vicinanze di C, e al di là si confonderanno, dando luogo anzichè a frange oscure, a frange colorate.

Per realizzare questa esperienza fondamentale, occorre avere due sorgenti A e B che vibrino identicamente; il modo più semplice di ottenerle consiste nel praticare due fori A e B, molto vicini, su uno schermo (fig. 74) e illuminarli con la luce emergente da un altro foro O. Sullo schermo bianco S situato a una certa distanza si potranno osservare le frange, ovvero si può vederle direttamente collocando in C un buon oculare. Il fenomeno riesce più visibile ricorrendo a una fenditura stretta, perpendicolare al piano della figura, O, al posto del foro e sostituendo ai fori A e B due altre fenditure esattamente parallele alla prima. Un altro artificio, dovuto a Fresnel, consiste nel produrre della fenditura O due immagini molto vicine, per mezzo di due specchi formanti un angolo ottuso vicinissimo a due retti.

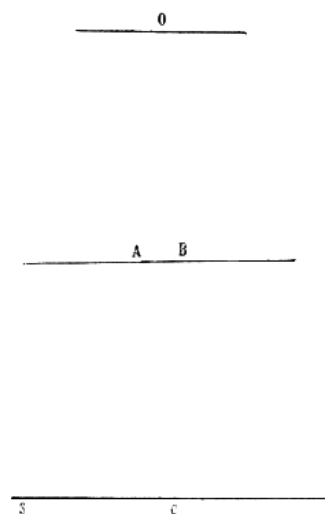


Fig. 74.

Misurando, con queste disposizioni, l'intervallo tra due frange, si può dedurre, quando si conosca l'intervallo AB e la distanza dello schermo, il valore della lunghezza d'onda dei raggi impiegati. Furono così trovati da Fresnel i valori seguenti: rosso estremo, 0,78 micron; aranciato $0,59\mu$; giallo $0,55\mu$; verde $0,50\mu$; azzurro $0,45\mu$; indaco $0,41\mu$; violetto estremo $0,39\mu$. Si è potuto poi con altri metodi precisare le lunghezze d'onda delle luci monocromatiche assai meglio definite di quel che non si possa con l'indicazione incerta del colore; ci sono invero delle sostanze che, rese incandescenti, emettono luce di uno o più periodi ben determinati, e le loro lunghezze d'onda sono state misurate con esattezza relativa almeno eguale a quella con cui si determina la lunghezza del metro campione.

59. Colori delle lamine sottili. — Queste bellissime colorazioni, così caratteristiche nelle bolle di sapone, sono state spiegate nei più minuti particolari con la teoria delle onde, considerandole come l'effetto dell'estinzione di alcuni colori, per l'interferenza tra la luce riflessa alla prima faccia della lamina e quella che rifratta alla prima, e riflessa dalla seconda faccia, ritorna nell'aria, sovrapponendosi alla precedente dopo aver percorso in più un certo cammino.

In luce monocromatica il fenomeno si manifesta con la presenza di zone oscure e luminose, visibili sulla lamina. Queste zone disegnano, con luce incidente parallela, i posti dove la lamina ha lo stesso spessore; ed hanno perciò la forma di anelli (anelli di Newton) quando lo spessore della lamina è continuamente crescente dal centro alla periferia, come avviene della lamina d'aria interposta tra una lente convessa e una lastra piana di vetro.

Colori più tenui si ottengono nelle lamine sottili anche per trasparenza; e se ne dà una spiegazione analoga.

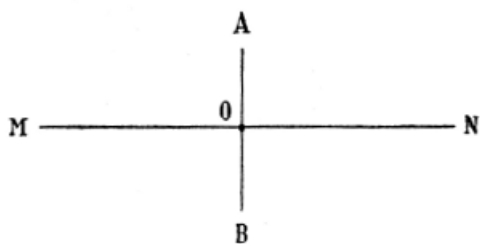


Fig. 75.

60. Forma delle vibrazioni luminose. Polarizzazione. — Si deve a Fresnel la dimostrazione che le vibrazioni della luce sono trasversali, si compiono cioè

perpendicolarmente al raggio luminoso; è questo il solo modo con cui si possano spiegare i meravigliosi fenomeni della *doppia rifrazione* e della *polarizzazione*, di cui daremo un brevissimo cenno.

Ma prima ci converrà riferire quali sono le conseguenze immediate della trasversalità delle vibrazioni. Supponiamo che un raggio luminoso, che si propaga verso di noi, tagli normalmente in O il piano della fig. 75. Le vibrazioni della particella d'etere O si compiranno, essendo trasversali, nel piano del foglio; ma possono avere forme diverse. Quando si compiono rettilineamente, in modo che ciascuna particella oscilli ad es. parallelamente ad AB (sempre con un ritardo rispetto alle precedenti e con un anticipo rispetto alle seguenti), allora si dice che la luce è *polarizzata rettilineamente* nel piano MN normale ad AB; ruotando la direzione AB della vibrazione ruota con essa il *piano di polarizzazione* MN.

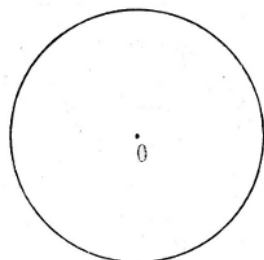
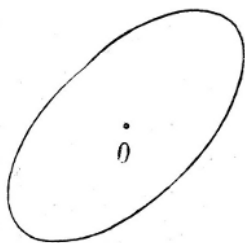


Fig. 76.

In altri casi la vibrazione ha la forma di un'ellisse o di un cerchio (fig. 76); si dice allora che è polarizzata *ellitticamente* o *circolarmente*; ogni particella del raggio esegue lo stesso movimento, col solito spostamento di fase rispetto agli altri punti del medesimo raggio.

Ma nel caso generale della luce emessa da un corpo incandescente qualsiasi (*luce naturale*), la forma della vibrazione va considerata come quella di un'ellissi che cambia, dopo brevissimi intervalli di tempo, di forma e di orientazione; ed è perciò decomponibile secondo due componenti, eguali e *indipendenti*, situate ad angolo retto, per es. secondo AB e CD (fig. 77).

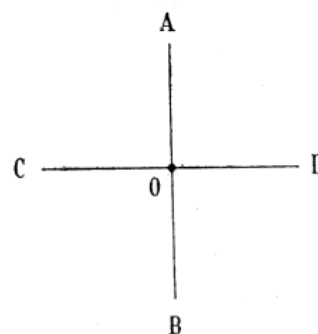


Fig. 77.

Se in un fascio di *luce naturale* si riesce ad estinguere una delle componenti, per es. CD, si ottiene luce polarizzata rettilineamente, le cui vibrazioni si compiono secondo AB. Or questo può farsi appunto per mezzo di certi apparecchi detti *polarizzatori*, i quali hanno perciò la funzione, quando siano traversati da un fascio di luce qualsiasi, di estinguerne una parte, e di dar passaggio solo alla luce le cui vibrazioni

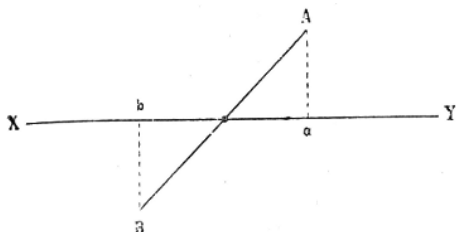


Fig. 78.

si compiono rettilineamente in una data direzione; basta ruotarli d'un certo angolo intorno al raggio perchè la direzione della vibrazione della luce che ne emerge ruoti d'un angolo eguale. Uno di questi apparecchi è, per es., il cosiddetto prisma di Nicol, dei cui funzionamento daremo tra poco la spiegazione. Esso si presenta come un piccolo tubo che contiene un prisma quadrangolare trasparente, con le basi inclinate sull'asse; la luce emergente vibra nel piano della diagonale che apparisce più corta.

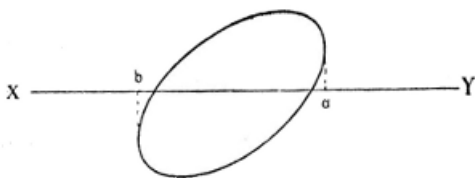


Fig. 79.

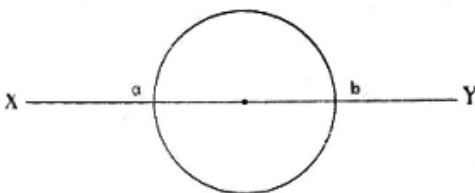


Fig. 80.

Ruotando un prisma di Nicol, o, come si suol dire, un *nicol*, traversato da un fascio di luce naturale, il fascio emergente conserva un'intensità costante, poichè la luce naturale risulta da due componenti eguali, che vibrano ortogonalmente tra loro, e di cui la prima ha un'orientazione qualsiasi; il nicol ne estingue una e resta l'altra eguale. Ma se la luce incidente ha una forma di vibrazione ben definita, o rettilinea (fig. 78), o ellittica (fig. 79), o circolare (fig. 80), e il nicol è orientato con la piccola diagonale secondo XY, allora esso lascia passare la proiezione *ab* della vibrazione secondo XY, ed estingue il resto.

E si riconosce facilmente, nel caso che la luce incidente sia a vibrazioni rettilinee (fig. 78) che la luce passerà interamente se XY è parallela ad AB; in parte se le due direzioni fanno un certo angolo, e

non ne passerà affatto se AB è perpendicolare ad XY . E siccome la luce vibrante secondo AB normale a XY potrebbe esser prodotta da un primo nicol avente la piccola diagonale normale a quella XY del secondo, la luce che passa da un primo nicol sarà arrestata da un secondo che sia rotato di 90° rispetto al primo. L'esperienza può esser fatta comodamente avendo due nicol, e disponendoli uno dopo l'altro sul medesimo fascio di luce; ruotandone uno il fascio emergente a un certo punto si estingue. Si dice allora che i due nicol sono *all'oscurità*, o *incrociati*. Ed è invero sorprendente l'osservare che due corpi trasparenti, i due nicol, messi l'uno dopo l'altro danno luogo, per una conveniente rotazione di uno, a un sistema *opaco*. Nel caso della fig. 79 la rotazione del nicol darà luogo a variazioni d'intensità del fascio emergente, secondo che XY è parallela al grande o al piccolo asse dell'ellisse; infine nel caso della polarizzazione circolare (fig. 80) la luce emergente dal nicol sarà d'intensità costante, qualunque sia la direzione di XY .

In ogni caso teniamo presente che la luce la quale emerge da un nicol, qualunque sia la luce incidente, vibra rettilineamente nel piano della sua piccola diagonale.

61. Doppia rifrazione. Produzione della luce polarizzata. — Ciò posto costruiamo un

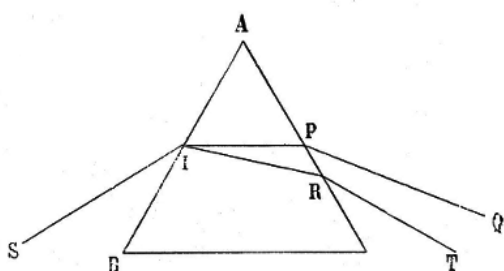


Fig. 81.

prisma di quel bel cristallo che i mineralogisti chiamano spato d'Islanda; e facciamo che il suo spigolo A (fig. 81) sia parallelo all'asse di simmetria del cristallo, cosicchè l'asse si proietti sul piano del foglio secondo un punto, come lo spigolo A . Facciamo cadere sulla faccia AB un raggio monocromatico *polarizzato*, le cui vibrazioni si compiano normalmente al foglio, e quindi parallelamente all'asse cristallografico; il raggio seguirà il cammino $SIPQ$ subendo una certa deviazione.

Ruotiamo adesso il nicol polarizzatore in modo che il raggio incidente sia sempre SI , ma le vibrazioni si compiano nel piano del foglio, cioè (entro il prisma) perpendicolarmente all'asse del cristallo. Troveremo che il percorso del raggio sarà adesso IRT , cioè che il raggio subisce una deviazione maggiore ed ha perciò un indice di rifrazione maggiore.

Adunque nello spato, e così in altri cristalli non appartenenti al sistema monometrico, l'indice di rifrazione non dipende solo dal periodo della luce, cioè dal suo colore, ma anche dalla direzione delle vibrazioni; e per lo spato i raggi le cui vibrazioni si compiono normalmente all'asse hanno un indice di rifrazione maggiore di quelli le cui vibrazioni sono ad esso parallele.

Ma allora se la luce incidente sul prisma, anzichè polarizzata, fosse luce naturale, siccome questa può ritenersi come la sovrapposizione di due fasci polarizzati ortogonalmente, cui corrispondono diversi indici di rifrazione, l'unico raggio SI si dovrà dividere in due che subiscono deviazioni diverse, come nei prismi comuni si dividono i raggi di diverso periodo, cui corrisponde diversa rifrangibilità; si avranno cioè due raggi rifratti, anzichè uno, l'uno PQ e l'altro RT e i *due saranno completamente polarizzati in due direzioni ortogonali*.

È questo il celebre fenomeno della *doppia rifrazione*, per cui con un prisma, o anche con un romboedro di spato d'Islanda, si hanno due immagini, anzichè una, di un unico oggetto; e le due immagini sono di luce polarizzata.

Basterà quindi *sopprimere* uno dei due fasci inugualmente deviati, perchè la luce emergente sia polarizzata rettilineamente. A un artificio simile si ricorre appunto nel prisma di Nicol, di cui noi avevamo già fatto uso prima d'intenderne il modo di funzionare.

Per avere luce polarizzata si può anche ricorrere a una lamina di *tormalina*, che è un cristallo naturale dotato della proprietà di estinguere uno dei due raggi che produce per birifrangenza.

Un altro metodo per avere luce polarizzata si ha nella riflessione sulla superficie dei corpi trasparenti come il vetro. Si dimostra che la luce riflessa sotto uno speciale angolo d'incidenza è completamente polarizzata nel piano d'incidenza. La spiegazione completa del comportamento della luce polarizzata nella riflessione e nella rifrazione vitrea, e nella riflessione metallica, si trova in una bella teoria dovuta a Fresnel, che ne dedusse la previsione di una serie importantissima di fenomeni, tutti confermati dall'esperienza. La teoria è stata poi perfezionata da altri.

Anche la teoria della trasversalità delle vibrazioni, e le sue applicazioni alla spiegazione della doppia rifrazione, con sviluppi matematici importantissimi, si deve pure a Fresnel.

62. Polarizzazione cromatica e rotatoria. — Una lamina di mica, di spato, o di una sostanza birfrangente, tagliata parallelamente all'asse, e interposta tra due nicol incrociati, fa riapparire la luce con delle bellissime colorazioni se la lamina ha uno spessore opportuno. Si dimostra che questi fenomeni son dovuti all'interferenza tra i raggi vibranti nel senso dell'asse e quelli vibranti perpendicolarmente ad esso, i quali percorrono la lamina con diverse velocità, per la birfrangenza, e acquistano perciò una differenza di cammino, come nelle lamine sottili e negli anelli di Newton. Noi non possiamo diffonderci nei particolari di questi fenomeni brillantissimi, tutti pienamente spiegati.

Infine altre sostanze, come il quarzo tagliato in lamine perpendicolari all'asse, hanno la proprietà di far ruotare il piano di polarizzazione della luce di un certo angolo; cosicchè, interposte tra due nicol incrociati, trasformano la vibrazione AB (fig. 82) che era arrestata dal secondo nicol, in un'altra A'B' sempre rettilinea, ma ruotata alquanto a destra o a sinistra di AB; cosicchè la luce non è più estinta traversando il secondo nicol, orientato secondo XY, e per estinguerla bisogna ruotare questo di un angolo eguale, portandolo in X'Y' in modo che sia X'Y' normale alla nuova direzione A'B' della vibrazione.

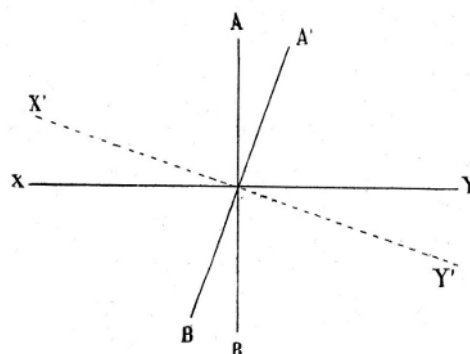


Fig. 82.

Anche molte soluzioni di sostanze organiche, come l'acido tartarico, lo zucchero, l'essenza di limone ecc. son dotate di potere rotatorio, e la sua misura dà un metodo di dosamento, per quelle sostanze, molto sicuro e sensibile. Servono a tal uopo i *polarimetri*.

Della polarizzazione rotatoria il Fresnel diede una geniale spiegazione cinematica, della quale però noi non possiamo far cenno.

Spettroscopia.

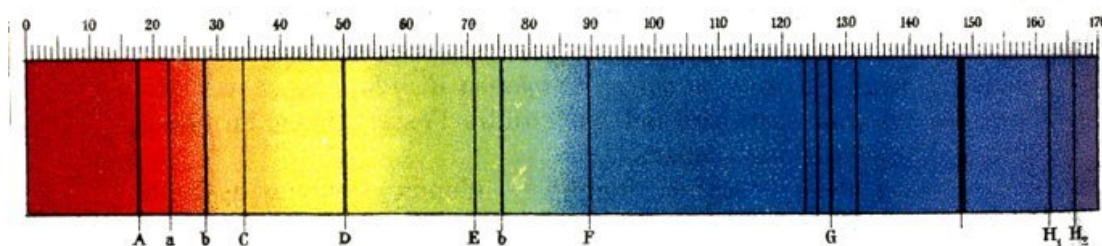
63. Particolarità dello spettro solare. Righe di Fraunhofer. — Al § 51 noi abbiamo descritta l'esperienza della formazione dello spettro, limitandoci a mettere in rilievo la diversa deviabilità dei raggi di diverso colore o, come diremo adesso, di diversa lunghezza d'onda. Dobbiamo ora esaminare più a fondo l'esperienza medesima, per trarne dei risultati ancora più importanti.

Ci converrà anzitutto precisare le condizioni per avere uno spettro *puro*, tale cioè che le luci di diversa rifrangibilità, sebbene costituiscano un insieme continuo, non si sovrappongano nel medesimo posto dello spettro. In realtà questa separazione non si può ottenere, in modo completo, col prisma; vi si riesce assai meglio con i *reticoli di diffrazione*, e con altri metodi dei quali non possiamo occuparci; ma la sovrapposizione si limiterà alle luci di periodi molto vicini quando la fenditura è molto stretta, e per ciascuna luce monocromatica che cade sulla fenditura la lente produce una immagine netta di questa sullo schermo, malgrado la deviazione prodotta dal prisma.

A tal fine converrà illuminare la fenditura allargata con la luce del vapore di sodio (fiamma Bunsen colorata col sal marino), disporre il prisma nella posizione di deviazione minima, e spostare lo schermo fino a che vi si formi una immagine netta, e deviata della fenditura; quindi stringere questa sempre più, con che l'immagine diverrà una linea sottile luminosa.

Se allora si fa cadere sulla fenditura la luce bianca di un arco voltaico o di un becco Auer, lo spettro si disegnerà a contorni nettissimi e con vivaci colori, senza nessuna traccia di discontinuità da un punto all'altro di esso; ma usando invece luce solare, si osserverà che lo spettro è solcato da linee nere sottili, parallele alla fenditura, e che appaiono in grandissimo numero quando la fenditura è molto stretta. Sono queste le righe di Fraunhofer, che occupano una posizione invariabile nello spettro; esse sono in numero grandissimo, molte migliaia, quando lo spettro è ben puro; ma le più caratteristiche sono state designate con le lettere dell'alfabeto: la A è all'estremo

rosso e riesce difficilmente visibile², la B nel rosso, la C nell'aranciato, la D nel giallo, la E nel giallo-verdastro, la F nel verde-azzurro, le G e H nell'indaco e nel violetto.



Queste righe, che si scorgono nella superiore riproduzione a colori, rappresentano, evidentemente, delle discontinuità nello spettro solare, cioè in esso mancano le radiazioni monocromatiche corrispondenti, che sono invece presenti nella luce bianca delle sorgenti terrestri.

Per osservare minutamente queste fini particolarità dello spettro, da cui trarremo conseguenze di grande importanza, ci converrà sostituire alla proiezione dello spettro sullo schermo la sua osservazione diretta con l'occhio munito di opportuni strumenti ottici; è quel che faremo con lo *spettroscopio*. Ma prima di procedere a questo studio minuzioso ci converrà eseguire, col metodo dello schermo, ancora un'esperienza d'importanza capitale.

64. Spettro invisibile ultrarosso. — Riceviamo le diverse radiazioni dello spettro visibile sopra un sottile termometro, e precisamente sopra un particolare rivelatore termometrico filiforme, qual'è il cosiddetto *bolometro*, nel quale il riscaldamento d'un filo metallico produce un'alterazione ben misurabile della sua resistenza elettrica. Naturalmente l'esperienza non può eseguirsi comodamente nella Scuola, ma noi riferiremo i risultati ottenuti, coi mezzi occorrenti, nei Laboratori.

La indicazione termica è appena sensibile nel violetto; ma va crescendo a misura che ci spostiamo verso le radiazioni meno rifrangibili, che trasportano perciò (§ 38) una quantità di energia maggiore. Ma, l'azione calorifica si prosegue ancora al di là dell'estremo rosso, dov'è anzi più accentuata, e si annulla solo a una certa distanza dal rosso, dimostrando così che oltre alle radiazioni visibili esistono al di là del rosso, e in un esteso intervallo, delle radiazioni meno rifrangibili, che l'occhio non riesce a vedere, ma che ci si rivelano per il loro effetto calorifico. Queste radiazioni sono state sottoposte a uno studio completo, come per i raggi luminosi; e si è dimostrato che esse seguono le identiche leggi, nella riflessione, nella dispersione, come pure nell'interferenza, nella diffrazione, nella polarizzazione ecc. Null'altro li distingue, in altri termini, dai raggi visibili, se non la loro minore rifrangibilità, o meglio la loro *maggiore lunghezza d'onda*, e la invisibilità, per cui bisogna sostituire nel loro studio l'osservazione termometrica all'osservazione oculare.

I raggi delle maggiori lunghezze d'onda vengono assorbiti dalle sostanze comunemente usate come trasparenti, esempio il vetro. Coticchè lo spettro ultrarosso è limitato dal fatto che le radiazioni estreme son estinte dalla lente e dal prisma di vetro; occorre perciò in tal caso sostituire questa sostanza con un'altra che sia trasparente per *tutte* quelle radiazioni, come il vetro lo è per le visibili e per *una parte* delle ultrasosse. Si usano a tale scopo prismi e lenti di salgemma. Si è potuto così riconoscere che nella radiazione solare, di cui si produca uno spettro prismatico, la distribuzione dell'energia nello spettro è rappresentata dalla curva II della fig. 83, cioè essa acquista il suo valore massimo al di là dello spettro visibile, segnato in bianco e avente a destra, dopo B, l'estremo rosso; e, dopo quel massimo, torna a diminuire. Sono ancora sensibili nella luce solare radiazioni aventi la lunghezza d'onda di 15μ , cioè una lunghezza

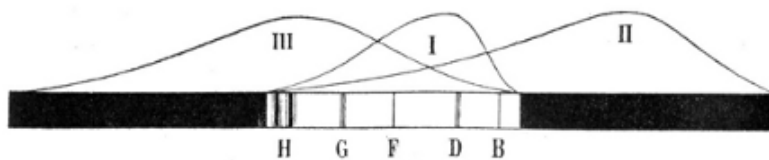


Fig. 83.

² Le parti estreme, nella figura a colori, sono visibili solo in condizioni eccezionali.

d'onda circa 20 volte maggiore di quella dell'estremo rosso, mentre passando dal violetto al rosso estremo la lunghezza d'onda si raddoppia appena. Se si volesse rappresentare perciò l'intero spettro visibile e l'ultra rosso, caratterizzando le diverse radiazioni con la loro lunghezza d'onda, la parte non visibile sarebbe circa 20 volte più estesa della visibile. Radiazioni di lunghezze d'onda ancora maggiori sono state osservate, con alcune sorgenti luminose terrestri, da Rubens, fino a una lunghezza d'onda di circa 60μ .

65. Spettro ultravioletto. — Ma lo spettro solare si prolunga ancora dal lato violetto, ben al di là dell'estremo che è per noi appena visibile. Basta invero disporre sullo schermo ove si produce lo spettro una lastra fotografica, e sviluppare l'immagine ottenuta. Si potrà allora constatare che l'impressione nella lastra (curva III della fig. 83) è insensibile nel rosso e nell'aranciato, s'inizia nel giallo, e prosegue con intensità *crescente* fino al violetto estremo, estendendosi notevolmente al di là. Esistono dunque delle radiazioni invisibili, di maggiore rifrangibilità; e anche per esse si è potuto stabilire l'identità qualitativa con le altre radiazioni, nei riguardi della riflessione, della rifrazione, della interferenza ecc.

Esse sono caratterizzate da una lunghezza d'onda molto più piccola di quella dei raggi visibili. Nella luce solare non si raggiunge la lunghezza d'onda $0,28\mu$; lo spettro invisibile è anch'esso solcato da righe nere analoghe a quelle di Fraunhofer. Ma con speciali sorgenti terrestri si è raggiunta la lunghezza d'onda $0,1\mu$; queste ultime radiazioni sono già facilmente assorbite dall'aria sotto un certo spessore; ma anche le più estreme dello spettro ultravioletto solare sono assorbite dal vetro della lente e del prisma, e bisogna ricorrere, in queste ricerche, a sostanze che siano trasparenti per simili radiazioni, come il quarzo. Adunque il Sole, astrazione facendo dalle righe di Fraunhofer di cui daremo la spiegazione più in là, e i corpi solidi incandescenti, emettono tutta una serie estesissima e continua di radiazioni aventi diversi periodi di vibrazione, e di esse solo una piccola parte riesce visibile. Le sostanze da noi chiamate trasparenti lo sono in realtà per le radiazioni dello spettro visibile, ma assorbono in generale le più lente o le più rapide; tutti i corpi possiedono cioè delle *bande d'assorbimento* più o meno larghe, e diversamente distribuite nell'intera gamma delle vibrazioni luminose. Nessuna meraviglia quindi che noi non riusciamo a vedere le radiazioni ultrasosse e le ultraviolette, che sono assorbite appunto dai mezzi rifrangenti oculari, ma che potrebbero riuscire insensibili anche senz'essere assorbite, così come i raggi rossi sono privi d'azione chimica su una lastra fotografica a base di bromuro d'argento.

66. L'emissione e l'assorbimento dei solidi. Leggi di Kirchoff, di Stefan, di Wien. — Noi abbiamo detto che un corpo caldo, come una pentola d'acqua bollente, perde calore per irradiazione, in virtù di raggi calorifici invisibili che si propagano in tutti i sensi e trasportano energia nei corpi che incontrano e li assorbono. Questi raggi calorifici sono appunto quei tali dello spettro invisibile ultrarosso che si distinguevano dai raggi visibili solo per la maggiore lunghezza d'onda, e la conseguente minore rifrangibilità.

Di questa identità si è data ormai la dimostrazione sperimentale più convincente, provando che tutte le esperienze d'ottica possono essere ripetute sostituendo alla sorgente luminosa un solido alla temperatura, per es, di 100° , e che i raggi emessi dal solido, inegualmente deviati da un prisma di salgemma, *prendono il loro posto nello spettro ultrarosso*, costituendo uno spettro continuo invisibile, nel quale la distribuzione d'energia ha lo stesso andamento generale della curva II dello spettro solare, solo che il massimo di energia è molto al di là dell'estremo rosso, e nelle vicinanze di questo la emissione è già divenuta insensibile.

Elevando la temperatura del solido si produce un duplice effetto nella curva della distribuzione dell'energia: l'emissione aumenta per le diverse radiazioni, ma l'aumento è più marcato nelle radiazioni più rifrangibili, cosicchè il posto ove trovasi il massimo d'emissione si va spostando verso le lunghezze d'onda minori, con una legge dovuta a Wien, e per cui *il prodotto della lunghezza d'onda, in cui l'emissione è massima, per la temperatura assoluta del corpo è costante*; o ciò che è lo stesso quella lunghezza d'onda è inversamente proporzionale alla temperatura assoluta del corpo, e diviene metà, o un terzo quando la temperatura assoluta si raddoppia o si triplica.

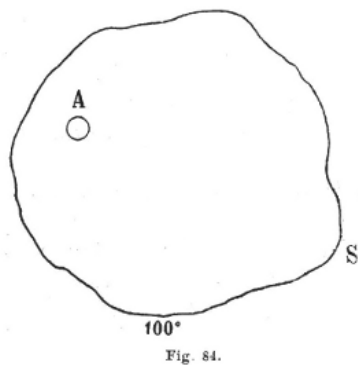
Se poi si considera l'*emissione totale* del corpo, cioè la quantità di calore irradiata nell'insieme delle radiazioni che esso emette, si trova che essa aumenta rapidamente aumentando la temperatura. La legge di variazione con la temperatura, come pure la legge di distribuzione dell'energia emessa nelle diverse lunghezze d'onda, dipende dalla natura del corpo. Quanto alla prima si è trovato che per tutti i corpi solidi opachi l'emissione è data dalla formola

$$E = K T^{\alpha}$$

ove T è la temperatura del corpo, e i numeri K e α cambiano con la natura di esso. Per il platino α ha sensibilmente il valore 5, per gli altri è alquanto minore; ma in corrispondenza è assai maggiore il valore di K , in modo che l'emissione risulta, a pari temperatura, più intensa per quei corpi cui corrisponde un valore di α minore.

Così per il nero fumo, che a temperature non troppo alte ha fra tutti i corpi il massimo *potere emissivo*, emette cioè fra tutti la massima quantità di calore, quell'esponente avrebbe il valore 4; e si è dimostrato teoricamente, fondandosi sui principi della termodinamica, che nessun corpo può avere un valore di α minore di 4, mentre si è visto sperimentalmente che per tutti i solidi finora provati α varia tra 4 e 5.

Quanto alla distribuzione dell'energia emessa nelle singole lunghezze d'onda, la natura del corpo ha grande influenza; ma anche l'energia che il corpo è capace di assorbire quando è investito da radiazioni di diversa lunghezza d'onda varia con la natura del corpo. Cioè i corpi, a pari temperatura, emettono con diversa intensità le radiazioni di una lunghezza d'onda qualsiasi, ma assorbono pure in diversa misura le radiazioni della medesima lunghezza d'onda.



Noi possiamo intanto trovare facilmente una relazione tra l'assorbimento totale e l'emissione totale di corpi differenti qualsiasi. Chiudiamo in un involucro S (fig. 84) alla temperatura costante, per es. di 100° , uno dopo l'altro due corpi diversi A, B, dei quali il corpo A sia capace di assorbire interamente *tutte* le radiazioni che riceve, di qualunque lunghezza d'onda, e l'altro B sia un corpo qualsiasi. I due corpi, malgrado lo scambio di energia raggianti con l'involucro, acquisteranno definitivamente la temperatura di questo. Supponiamo che A emetta in totale, a ogni minuto secondo, la quantità di energia E ; altrettanta A ne dovrà

prendere dall'involucro, se la sua temperatura resta invariata, e poichè A assorbe, per ipotesi, tutta l'energia che l'investe, ciò vuol dire che S invia verso A proprio la quantità E d'energia emessa da questo.

Se al corpo A sostituiamo il corpo B, l'energia che emette l'ambiente S verso B sarà la stessa di prima E : ma se il corpo ha un'emissione totale minore e , perchè si abbia l'equilibrio occorre che *non tutta* l'emissione E dell'involucro che cade su B sia da questo assorbita, ma solo una frazione a minore di 1; e dev'essere

$$e = a E$$

ovvero

$$\frac{e}{a} = E$$

Or a indica la frazione dell'energia incidente che è dal corpo assorbita: possiamo chiamarla *potere assorbente totale* del corpo; e rappresenta l'energia totalmente emessa dal medesimo corpo, che si potrebbe chiamare il suo *potere emissivo totale*; infine E è il potere emissivo del corpo A, capace d'assorbire interamente tutte le radiazioni, e detto perciò *corpo perfettamente nero*.

L'ultima eguaglianza ci dice che il rapporto tra il potere emissivo e il potere assorbente di un corpo B è costantemente eguale al potere emissivo del corpo nero, ed è perciò indipendente dalla natura del corpo B. Questa legge, detta di Kirchoff, fu da lui estesa alle singole radiazioni, oltre che all'emissione totale in tutto lo spettro; e ne risulta che i corpi i quali emettono più intensamente in una regione dello spettro, devono più intensamente assorbire le medesime radiazioni più intensamente emesse.

Per quanto riguarda l'emissione totale risulta da quanto si è detto che i corpi aventi minore potere assorbente hanno anche minore potere emissivo; e che il massimo potere emissivo spetta al corpo nero. Appunto per questo *corpo nero* vale la legge di **Stefan-Boltzmann**, per la quale *l'emissione totale è proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta*, e la legge di **Wien** per cui *la lunghezza d'onda di massima emissione è inversamente proporzionale alla temperatura assoluta*.

Ma il corpo assolutamente nero non esiste; vi si avvicina alquanto il nero fumo e il carbone; per tutti gli altri la legge di Stefan vale solo, come si è detto, sostituendo all'esponente 4 un esponente compreso tra 4 e 5. Invece la legge di Wien è quasi per tutti i solidi opachi abbastanza bene verificata.

L'una e l'altra permettono di misurare la temperatura di un corpo incandescente, conoscendo la sua emissione totale, ovvero la lunghezza d'onda in cui si ha il massimo dell'emissione. E così, supponendo che il Sole abbia le proprietà del corpo nero, si è potuto stabilire in base alla prima legge che la temperatura del sole dev'essere di circa 6000° centigradi. Con la seconda si è giunti a un risultato analogo, 5500° centigradi, dopo avere stabilito che in uno spettro solare, disegnato sulla base delle lunghezze d'onda, il massimo d'energia si ha all'incirca nella lunghezza d'onda 0,5 micron.

67. Emissione e assorbimento dei gas incandescenti. Spettroscopio. — Lo spettro d'emissione diviene discontinuo coi vapori metallici incandescenti, cioè è costituito in generale da un fondo scuro su cui son disseminate, in grande o in piccolo numero, delle righe sottili luminose. Questo spettro è perciò il rovescio, per dir così, dello spettro solare, ove si hanno le righe di Fraunhofer, sottili e oscure, sul fondo colorato continuo che è proprio dei solidi incandescenti.

Per studiare comodamente le particolarità di simili spettri si deve, come abbiamo detto, ricorrere a un metodo di osservazione oculare diretta, anzichè alla proiezione su uno schermo. Serve a tal uopo lo spettroscopio, costituito da una piattaforma, (fig. 85), su cui si trovano il prisma P, il collimatore FL, il cannocchiale CO, e un terzo cannocchialino ST che ha una funzione accessoria. Il

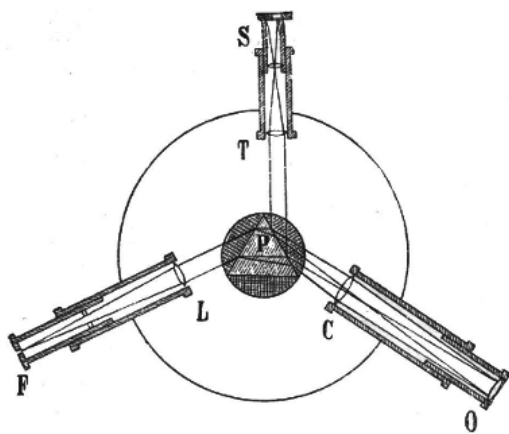


Fig. 85.

collimatore è formato dalla fenditura F, collocata nel fuoco della lente L, che rende paralleli i raggi emergenti da quella; avanti alla fenditura si dispone la sorgente di cui si vuole studiare lo spettro. I raggi vengono deviati e dispersi dal prisma P, e poscia ricevuti nel cannocchiale il cui oculare si adatta in modo che le righe spettrali appaiano con la massima nettezza. Insieme ai raggi provenienti dal prisma, il cannocchiale riceve quelli provenienti da ST e riflessi sulla faccia del prisma medesimo; e poichè in S si trova una piccola scala graduata disposta al fuoco della lente T, che ne dà un'immagine virtuale a distanza infinita, nel cannocchiale CO, che dev'essere anch'esso adattato per la visione netta di oggetti lontanissimi, saranno insieme visibili le righe

spettrali e la scala graduata. Su questa si possono rilevare le posizioni delle righe, il che è molto utile per il confronto degli spettri di diverse sorgenti.

L'apparecchio non ci apprende nulla di nuovo sullo spettro continuo delle sorgenti terrestri di luce bianca; ma invece si presta assai bene per lo studio dello spettro dei gas o dei vapori metallici incandescenti; si osservano allora delle righe brillanti finissime, che hanno, come è naturale, il

colore corrispondente al posto occupato nello spettro continuo (*spettri a righe*), o delle righe sfumate (*spettri a colonnato*).

Per rendere incandescenti i gas o i vapori metallici si può ricorrere a diversi procedimenti, ai quali corrispondono in generale spettri alquanto diversi. I più caratteristici per i metalli sono: lo *spettro di fiamma*, ottenuto vaporizzando nella fiamma Bunsen o nel becco ossidrico un frammento del sale metallico corrispondente, o spruzzandovi la soluzione relativa; lo *spettro d arco*, ottenuto disponendo in uno dei carboni che servono a produrre l'arco voltaico un frammento del sale o del metallo, ovvero impregnando il carbone positivo con una soluzione del sale, o facendo saltare l'arco tra due bacchette del metallo; e infine lo *spettro di scintilla*, ottenuto facendo scoccare delle forti scintille tra gli elettrodi del metallo da studiare, e sceverando tra le righe osservate quelle proprie del gas in cui avviene la scintilla, che possono del resto attenuarsi con disposizioni speciali. Ai tre tipi di eccitazione corrisponde in generale una diversa luminosità delle varie righe dello stesso metallo, che si rinforzano o s'indeboliscono non ugualmente; ma le righe son sempre quelle, caratteristiche del metallo.

Per i gas comuni il solo procedimento che possa adottarsi allo scopo di portarli all'incandescenza è quello della scarica elettrica; ordinariamente si ricorre a un tubo contenente il gas a bassa pressione (tubo di Plucker, fig. 86). Il gas s'illumina vivamente, nella parte capillare MN, a ogni scarica che lo attraversi per mezzo degli elettrodi di platino A, B. E lo spettro ottenuto è pure caratteristico della natura del gas.

Il sodio in vapore dà luogo a una riga brillante, che con forti dispersioni si scinde in due vicinissime; queste occupano esattamente il posto di due righe dello spettro solare, il cui insieme costituisce la riga D di Fraunhofer; una riga rossa dà il litio, e una più debole nell'aranciato; e quanto ai gas citeremo il bellissimo spettro dell'idrogeno, di cui due belle righe nel rosso e nel verde azzurro, coincidono con le righe C, F dello spettro solare. L'*analisi spettrale* si esegue appunto esaminando lo spettro della sostanza vaporizzata opportunamente, e confrontandolo con talune tabelle estesissime, contenenti gli spettri dei diversi elementi; si poterono così scoprire dei nuovi elementi, prima sconosciuti, come il cesio, il rubidio, il tallio, l'indio, il gallio, e si poté definitivamente classificare tra gli elementi i nuovi gas scoperti nell'atmosfera, come l'argon, il neon, il cripton, a ciascuno dei quali corrisponde un nuovo spettro caratteristico; lo stesso avvenne del radio e dell'elio.

68. Inversione dello spettro. — Si deve a Fizeau una celebre esperienza, detta dell'inversione dello spettro, e che è di grandissimo significato per la spiegazione delle righe nere di Fraunhofer.

Avanti alla fenditura di uno spettroscopio collochiamo una fiamma Bunsen colorata in giallo col sal marino. Vedremo la riga brillante D propria del vapore di sodio.

Se ora inviamo sulla fenditura un fascio intenso di luce bianca, per es. proveniente da una lampada ad arco, e il fascio traversa, prima di giungere sulla fenditura, la fiamma colorata, noi osserveremo al cannocchiale lo spettro continuo dell'arco, solcato da una linea oscura, proprio nel posto ove la fiamma produceva la riga brillante. Lo spettro è *invertito*, si presenta cioè, come nello spettro solare, la riga oscura sul fondo dello spettro continuo.

L'interpretazione di questa esperienza è agevole. Il vapore di sodio assorbe le stesse radiazioni che è capace di emettere, e quelle soltanto; cosicchè la luce dell'arco nei diversi posti dello spettro passa indisturbata attraverso al vapore, tranne quella corrispondente al periodo proprio della luce di sodio, che viene assorbita. La fiamma emette però, proprio in quel posto, quella luce che ci forniva da sola la riga brillante, ma la riga dovrà apparire come oscura su fondo luminoso, per contrasto, finchè la luce soppressa, eguale in intensità alle adiacenti, è più intensa di quella propria che la fiamma vi sostituisce.

Per spiegare poi come la fiamma colorata possa assorbire le stesse radiazioni che è capace di emettere, basta pensare al fenomeno della risonanza, da noi illustrato in Acustica. Le onde incidenti,

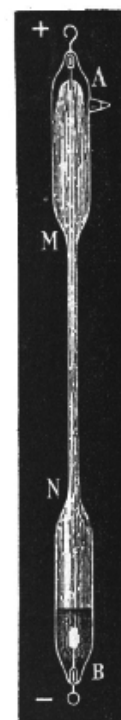


Fig. 86.

di periodo eguale al periodo proprio delle particelle capaci di vibrare nella fiamma, le eccitano per risonanza, comunicando ad esse la loro energia e quindi estinguendosi.

Or si era notato che moltissime delle righe nere di Fraunhofer coincidono rigorosamente con le righe di emissione di molti gas e vapori metallici.

È ragionevole quindi il pensare con Kirchoff, il quale eseguì questo confronto con la massima diligenza, che questi gas e questi vapori formino intorno al sole un'atmosfera (la *cromosfera*) che avvolge da tutte le parti un nucleo incandescente capace da solo, di produrre uno spettro continuo (la *fotosfera*); la presenza di quei vapori assorbenti, che la luce interna deve traversare per giungere a noi, determina l'assorbimento di alcune radiazioni, come nell'esperienza di Fizeau, e quindi la formazione delle righe di Fraunhofer. Si è potuto così assodare l'esistenza nell'atmosfera solare di moltissimi elementi a noi ben comuni, come sodio, ferro, calcio, bario, magnesio, manganese, cromo, nichelio, cobalto, idrogeno, alluminio, zinco, rame, silicio, stronzio, carbonio, palladio, cadmio, argento, stagno, potassio ecc.; mentre non si è trovato traccia di altre, come l'azoto, l'oro, il mercurio, lo zolfo, il tallio ecc.

Che se si esamina la luce emessa dai bordi del sole, ove perciò quei vapori emettono, senza assorbire la luce del nucleo interno, si constata appunto che lo spettro si riduce ad alcune linee brillanti, dovute specialmente all'idrogeno e al magnesio; si nota pure una riga d'emissione, che fu attribuita a un corpo allora sconosciuto, l'*elio*; questo fu perciò trovato prima nel Sole e scoperto dopo sulla Terra.

Ma le applicazioni dello spettroscopio alla Fisica celeste, e le notizie che esso ci ha fornito sulla costituzione degli astri, e anche su alcuni loro movimenti, non possono essere qui che sfiorate. Quanto al Sole citeremo solo il fenomeno delle *protuberanze solari*, osservabili appunto con lo spettroscopio, e che sarebbero esplosioni formidabili, o eruzioni di vapori incandescenti, fino ad altezze colossali.

Quanto alle stelle, di cui lo spettro è stato studiato con speciali apparecchi spettroscopici, rivelandoci la presenza di alcuni dei nostri elementi, citeremo un'ingegnosa applicazione fatta da Fizeau del principio di Doppler (vol. I § 105), per il quale il numero delle vibrazioni emesse da una sorgente in movimento apparisce a noi maggiore o minore del vero, secondo che la sorgente si avvicina a noi o se ne allontana. In conseguenza se una stella si avvicina a noi, le sue righe d'emissione o d'assorbimento devono comportarsi come se avessero una lunghezza d'onda minore, devono cioè spostarsi verso il violetto, in confronto alle stesse righe osservate con una sorgente immobile. Or effettivamente questi spostamenti sono stati osservati, e hanno permesso di dedurre la velocità con cui quelle stelle si avvicinano a noi o se ne allontanano. Ed è invero sorprendente che di questi astri, situati a distanze inconcepibili, noi possiamo conoscere con lo spettroscopio non solo qualche cosa della costituzione chimica, ma anche quello che il telescopio non ci avrebbe mai potuto rivelare, cioè la velocità vera del loro movimento nella nostra direzione; questi risultati, fatta la media delle velocità per tutte le stelle visibili, ci potranno forse fornire la velocità con cui il sistema solare, di cui facciamo parte, ci trascina nello spazio infinito!

ELETTRICITÀ E MAGNETISMO.

ELETTROSTATICA.

Fenomeni generali.

69. **Corpi elettrizzati. Due stati elettrici. Conduttori e isolanti.** — Avvicinando alla pallina leggiera A (fig. 87), sospesa a un filo di seta, una bacchetta di vetro o di ebanite strofinata con la seta o la lana, si constata una viva attrazione fino a che la pallina viene con essa in contatto; dopo invece la pallina è respinta dalla bacchetta (fig. 88). La bacchetta che con lo strofinio dà luogo al fenomeno dicesi *elettrizzata* e si chiama *elettricità* ciò che esiste nella bacchetta e che produce il



Fig. 87.

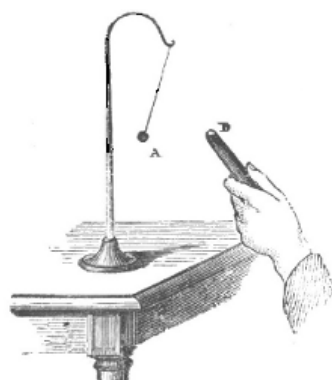


Fig. 88.

fenomeno. La pallina che ha toccato la bacchetta di vetro è da questa respinta. Tocchiamo con la stessa bacchetta un'altra pallina di un apparecchio eguale (detto *pendolino elettroscopico*); essa sarà pure respinta. Se ora avviciniamo tra loro le due palline troveremo che esse si *respingono mutuamente*, e assumono l'aspetto della fig. 89. Tocchandole con la mano ritornano nella posizione verticale. Noi possiamo dire che la bacchetta comunicò alle palline, nel contatto con esse, *elettricità*; che le palline elettrizzate per contatto con la stessa bacchetta si respingono, e che esse perdono la elettricità ricevuta quando siano toccate con la mano.

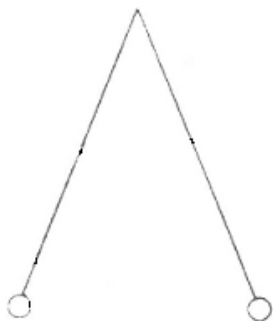


Fig. 89.

Tocchando adesso entrambe le palline con una bacchetta di ebanite strofinata, esse torneranno a respingersi; ma se una delle palline ha toccato la bacchetta di ebanite e l'altra la bacchetta di vetro, e i due punti d'attacco dei fili son tenuti a una certa



Fig. 90.

distanza, constateremo che le due palline si attirano (fig. 90); e inoltre potremo anche osservare che se A ha toccato il vetro e B l'ebanite, la bacchetta di vetro respinge A ma attira B; e così quella d'ebanite respinge B e attira A.

L'elettricità del vetro e quella dell'ebanite si comportano adunque in modo opposto; e se si strofinano le poche sostanze che come il vetro e l'ebanite son capaci di acquistare per strofinio lo *stato elettrico*, per es. la paraffina, lo zolfo, la ceralacca, ecc., si trova che esse presentano o il comportamento del vetro o quello dell'ebanite; noi diremo che le prime acquistano *elettricità vitrea*, le altre *elettricità resinosa*. L'esperienze riferite ci autorizzano a concludere che *due corpi aventi la stessa specie di elettricità si respingono; mentre si attirano se la loro elettricità è di specie diversa*.

Invece una pallina non elettrizzata (*neutra*) è attratta indifferentemente da un corpo elettrizzato con elettricità di qualunque specie.

Le esperienze di sopra possono essere ripetute sostituendo al filo di seta, che serve a sospendere la pallina, un filo sottilissimo di metallo, purchè la colonna del sostegno sia costituita da

vetro, o da ceralacca o da ebanite, o in generale da uno dei corpi che, strofinati, acquistano lo stato elettrico. Noi possiamo con questa variante eseguire delle altre esperienze molto istruttive. Si abbiano due pendolini, sostenuti in O e O' con due sottili fili metallici OA, O'B (fig. 91); rileghiamo tra O e O' un filo di seta, e tocchiamo A con una bacchetta di ebanite elettrizzata per strofinio. Essa sarà, dopo il contatto, respinta dall'ebanite e attratta dal vetro strofinato; ma la pallina B conserverà un contegno *neutro*, cioè sarà attirata tanto dall'ebanite quanto dal vetro. Noi

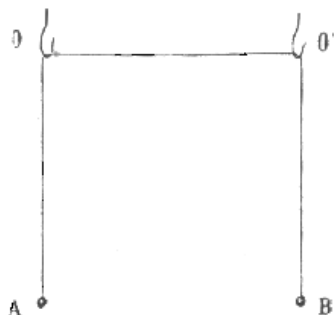


Fig. 91.

potremo anche comunicare ad A elettricità vitrea e a B resinosa, e le due palline conserveranno, malgrado la presenza del filo OO', le loro elettricità opposte.

Ma se il filo OO' è di natura metallica, le cose vanno ben diversamente. Basterà toccare con l'ebanite strofinata la pallina A, perchè tanto A che B siano l'una e l'altra respinte dall'ebanite e attratte dal vetro strofinato.

L'elettrizzazione fornita ad A col contatto si è perciò trasmessa a B lungo la via metallica, mentre rimase localizzata in A, e nel filo che la sostiene, quando il filo OO' era di seta.

Noi esprimiamo questo fatto dicendo che il filo metallico *conduce* l'elettricità, e il filo di seta non la conduce. E se sperimentiamo diversi corpi, collocandoli tra A e B, troveremo che sono non conduttori o meglio cattivi conduttori quei pochi corpi capaci di elettrizzarsi per strofinio, e son conduttori tutti gli altri, come i metalli, il legno, i corpi umidi ecc. ecc.

Se poi per mezzo di un corpo buon conduttore si mette in comunicazione la pallina elettrizzata col suolo della stanza, o anche col tavolo, *troveremo che essa perde la sua elettrizzazione*. È questa la ragione per cui la perde toccandola con la mano, e in generale con una serie ininterrotta di conduttori comunicanti col suolo.

Interponendo in un posto della serie un pezzo di un corpo non conduttore come il vetro, lo stato elettrico si localizza in tutta la parte metallica che precede il vetro, o come anche si dice, l'isolante o il *coibente*. Evidentemente l'aria è un isolante, poichè nel suo seno possono manifestarsi i fenomeni elettrici.

S'intende adesso la necessità, per trattenere sulla pallina lo stato elettrico comunicato col contatto, di sospenderla a un filo di seta, o anche a un filo metallico sostenuto da una colonna di vetro. E s'intende ancora che la *non elettrizzabilità* dei metalli per strofinio può esser solo apparente, poichè se anche lo stato elettrico effettivamente venisse creato, si disperderebbe al suolo attraverso la mano che li sostiene. Basta, per accertarcene, strofinare una bacchetta di metallo sostenuta per mezzo di un corpo isolante. Troveremo in tal caso segni non dubbi di elettrizzazione.

La sovrapposizione delle due elettricità vitrea e resinosa sullo stesso corpo le neutralizza entrambe, parzialmente o totalmente, come se si trattasse della somma di una quantità *positiva* e di una quantità *negativa*. Questo carattere *opposto* delle due elettrizzazioni ha determinato appunto il nome di *elettricità positiva* per l'una (quella acquistata dal vetro) e di *elettricità negativa* per l'altra (quella acquistata dall'ebanite).

70. Elettroscopio a foglie d'oro. — I principi esposti ci permettono d'intendere il funzionamento di questo apparecchio, che serve assai più comodamente del pendolino a riconoscere se un corpo è elettrizzato. Una bacchetta metallica, terminata superiormente da una sferetta, porta due foglioline sottilissime d'oro, ed è circondata da una campana di vetro, e sostenuta da uno spesso anello di una sostanza meglio isolante del vetro, es. l'ebanite, l'ambra, la ceralacca, o la *dielettrina*, che è un miscuglio di zolfo e di paraffina. Toccando la pallina superiore con un corpo elettrizzato si vedono le foglioline divergere; e invero l'elettricità si comunica a tutto il metallo e quindi alle foglioline, che, caricandosi così di elettricità omonime, devono respingersi.

Possiamo adesso ripetere più comodamente, per mezzo dell'elettroscopio, alcune delle esperienze più difficili, riferite, per ordine logico, nel precedente paragrafo.

Così, rilegando due elettroscopi con un filo, si può nettamente constatare la localizzazione dell'elettricità nell'elettroscopio toccato, o la sua propagazione all'altro elettroscopio, secondo che il filo di comunicazione è isolante o conduttore.

E si può provare come il vetro umido alla superficie divenga quasi conduttore, giustificando così la necessità di adoperare vetro ben asciutto nelle esperienze di elettrostatica, e la opportunità di interporre tra il vetro e la bacchetta dell'elettroscopio un tappo di una sostanza isolante meno suscettibile di condensare alla sua superficie l'umidità atmosferica.

71. Elettrizzazione per influenza. — Avvicinando alla pallina dell'elettroscopio un corpo elettrizzato, le foglioline divergono prima che abbia luogo il contatto. È questo un fenomeno molto importante che dobbiamo ora studiare in condizioni opportune.

Ci converrà ricorrere a due elettroscopi A, B disposti come nella fig. 92 a una certa distanza, e comunicanti tra loro per mezzo di un'asta metallica tenuta da un manico isolante. Avvicinando ad A il corpo elettrizzato V, vedremo divergere le foglioline di entrambi gli elettroscopi, ma esse ricadono se noi torniamo ad allontanare il corpo V. Se prima di allontanare V si porta via l'asticina che mette in comunicazione A e B, tenendola per l'isolante M, allora *la divergenza delle foglioline persiste anche dopo l'allontanamento di V*, ed esse ricadono se si rimette a posto la bacchetta metallica.

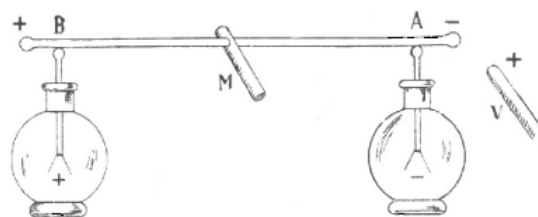


Fig. 92.

Questa esperienza può essere interpretata ammettendo che l'unico conduttore costituito dai due elettroscopi e dalla bacchetta si elettrizzi per la presenza del corpo V, con elettricità omonima nelle parti più lontane, cioè in B, ed eteronima nelle parti più vicine, cioè in A. Allontanando V le due elettrizzazioni opposte si ricombinano attraverso l'asticina, ricostituendo lo stato neutro; mentre la ricombinazione non può più aver luogo se, prima dell'allontanamento di V, è interrotta la comunicazione tra A e B. Che A resti allora carico di elettricità eteronima, e B di omonima si può constatare per mezzo di un pendolino elettroscopico, caricando la sua pallina per contatto con V; si vedrà allora che la pallina è respinta da V, attirata da A e respinta da B.

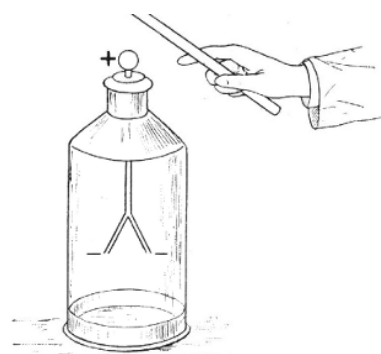


Fig. 93.

È facile adesso riconoscere ciò che avverrà avvicinando un corpo elettrizzato alla pallina di un elettroscopio scarico. La pallina, l'asta e le foglioline formano un unico conduttore che si elettrizzerà per influenza, raccogliendosi l'elettricità omonima nelle parti più lontane cioè nelle foglioline e facendole divergere (fig. 93). Naturalmente la divergenza svanisce appena si allontanano il corpo elettrizzato. Se poi l'elettroscopio è già carico d'elettricità, distribuita sulla pallina, sull'asta e sulle foglioline divergenti, e vi si avvicina un corpo carico di elettricità, le cariche indotte si sovrappongono, nelle varie parti dell'elettroscopio, alle cariche preesistenti. Quando il corpo avvicinato e l'elettroscopio son carichi di elettricità omonima, l'avvicinamento sviluppa sulle foglioline una carica che ha lo stesso

segno della carica preesistente: *la deviazione delle foglioline aumenterà*. Quando invece la carica iniziale dell'elettroscopio è opposta a quella del corpo, la carica destata con l'avvicinamento sulle foglioline è opposta a quella che vi si trovava già, e quindi diminuirà, con l'avvicinamento, la deviazione delle foglie medesime, fino ad annullarsi; aumentando ancora la carica per influenza quelle potranno nuovamente divergere sotto l'azione di queste ultime.

Così noi potremo constatare, caricando prima l'elettroscopio per contatto col vetro elettrizzato positivamente, che avvicinando il vetro la divergenza delle foglioline aumenta, mentre avvicinando una bacchetta di ebanite, elettrizzata negativamente per strofinio, la divergenza in principio diminuisce, a un certo punto si annulla, e poi torna nuovamente a prodursi.

Noi ne deduciamo un mezzo comodissimo per riconoscere il segno della carica di un corpo, avvicinandolo a un elettroscopio già carico, per es. positivamente, per contatto con una bacchetta di vetro strofinato.

72. E possiamo così constatare un fatto importante, che cioè: **i due corpi che si strofinano insieme assumono stati elettrici di nome contrario.** — Ci possiamo servire per dimostrarlo dei due piatti della fig. 94, tenuti per due sostegni isolanti, e dei quali l'uno A è di vetro, o d'ebanite, e l'altro B è coperto di un pezzo di lana. Se A è di vetro, assume lo stato elettrico + e B il — ; se A è di ebanite avviene l'opposto. Ciò prova ancora che lo stesso corpo, la lana, può assumere una carica negativa o una positiva, strofinandolo con corpi diversi, come il vetro e l'ebanite.

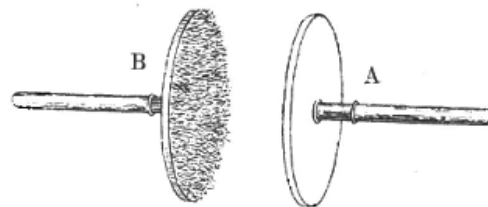


Fig. 94.

Questo fenomeno è generale, cioè il segno della carica assunta da un corpo è determinato solo quando sia determinato l'altro corpo con cui ha luogo lo strofinio.

73. **Influenza sui corpi in comunicazione col suolo.** — Toccando col dito la pallina d'un elettroscopio comunicante col suolo, avvicinando ad essa un corpo elettrizzato, staccando il dito e poi allontanando il corpo elettrizzato, l'elettroscopio resta carico di elettricità contraria a quella del corpo. Possiamo ammettere che l'elettroscopio, la mano e la Terra formino in questa esperienza un conduttore unico, che si elettrizza ancora per influenza, assumendo lo stato elettrico opposto a quello del corpo nelle parti più vicine a questo, cioè nell'elettroscopio. Queste cariche restano sull'elettroscopio qualora il dito venga staccato prima di allontanare il corpo influenzante. Si può con questo mezzo caricare un conduttore con elettricità contraria a quella di un corpo elettrizzato.

74. **Forze tra cariche elettriche e tra corpi elettrizzati.** — Le attrazioni o le repulsioni elettriche si manifestano solo tra corpi elettrizzati; e anche nell'esperienza primissima con cui abbiamo cominciato il nostro studio, (l'attrazione esercitata da un bastone di ebanite strofinato su una pallina di sambuco neutra) si può riconoscere, tenuto conto dei fenomeni d'influenza, che le forze si esercitano tra l'ebanite elettrizzata e le parti più vicine della pallina (fig. 95) caricate per influenza di elettricità opposta; la ripulsione esercitata sulle parti elettrizzate negativamente è invero più debole per la maggiore distanza.

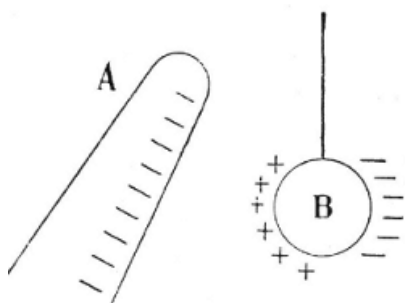


Fig. 95.

Noi dobbiamo ritenere perciò che le forze in questione si esercitano tra le cariche elettriche, sviluppate sui corpi, e che questi si avvicinano o si allontanano solo perchè con ciò si avvicinano le cariche elettriche cui fanno da veicolo. Da questo punto di vista il fenomeno dell'elettrizzazione per influenza ci dà un primo esempio di cariche elettriche che si spostano, per obbedire alla forza elettrica, anche senza movimento di materia. Basta ammettere invero che sul corpo *conduttore* influenzato esistano, in egual misura, accumulate grandi quantità d'elettricità positiva e negativa, che per la loro eguaglianza determinano lo

stato neutro. Avvicinando un corpo elettrizzato le cariche omonime saranno respinte, e le eteronime saranno attratte; e poichè esse sono mobili nel conduttore influenzato, questo prenderà lo stato elettrico eteronimo nelle parti più vicine, e l'omonimo nelle più lontane. Le cariche vengon così separate, malgrado la loro forza attrattiva, per virtù del corpo influenzante; e si ricombineranno allontanando quest'ultimo, a meno che il corpo influenzato non sia stato prima diviso in due parti, con l'interposizione d'un corpo isolante. Le cariche, anche in questo caso, si ricombineranno in virtù della loro attrazione, ricostituendo lo stato neutro, qualora si stabilisca un ponte conduttore tra le due metà del corpo.

Adunque le cariche elettriche tendono a muoversi in virtù delle loro forze attrattive o repulsive; ma il loro movimento può aver luogo soltanto sui corpi conduttori. Se invece le cariche, distribuite su due corpi materiali qualsiasi, sono immerse in un mezzo isolante come l'aria, si

constateranno attrazioni e ripulsioni tra i corpi materiali elettrizzati, poichè solo per il movimento di questi possono avvicinarsi o allontanarsi le cariche contenute.

75. Legge di Coulomb. — Una legge dovuta a Coulomb presiede appunto a queste forze che si esercitano tra i corpi elettrizzati. Egli ne diede una dimostrazione sperimentale, che non poteva avere però il rigore necessario per farne, come si è fatto, la base di tutta la Elettrologia matematica; la legge viene quindi dimostrata come assolutamente esatta più che altro dall'accordo perfetto tra le sue conseguenze teoriche e una serie innumerevole di fatti rigorosamente accertati. Noi non riferiremo perciò i particolari delle esperienze che servirono a Coulomb per enunciare la sua legge, di cui la parte essenziale si può esprimere nei termini seguenti:

Le forze che si esercitano tra due corpi elettrizzati piccolissimi agiscono secondo la retta che li unisce, e sono inversamente proporzionali al quadrato della loro distanza.

Per enunciare la seconda parte della legge di Coulomb dobbiamo prima introdurre il concetto di misura delle *cariche elettriche*. A tal fine quando due piccolissimi corpi A e B esercitano su un terzo C la stessa forza alla stessa distanza diremo che A e B contengono *eguali cariche elettriche*. Se, invece, per eguagliare la forza esercitata da A su C, occorre riunire in un unico corpo piccolissimo diversi corpuscoli come B, in numero di 2, 3, 4, ... m , diremo che A contiene una carica doppia, tripla, ... m volte di quella di B.

In quest'ultimo caso se si confrontano le forze esercitate alla stessa distanza sul terzo corpo C da A e da *uno* dei corpi B, si trova che la prima è m volte maggiore della seconda. Anche questo risultato, di origine sperimentale, si deve a Coulomb.

Assumendo adunque come unità di carica elettrica quella che a distanza di 1 cm. da una carica eguale esercita su di essa la forza di una dine, un corpuscolo avrà una carica di m unità se sull'unità di carica a 1 cm. di distanza esercita la forza di m dine. E allora due corpi, aventi le cariche di m e m' unità, agiranno tra loro a 1 cm. di distanza con una forza m' volte più grande della precedente, cioè con la forza di $m m'$ dine.

Adunque *due corpi aventi rispettivamente le cariche di m e m' unità agiscono tra loro a 1 cm. di distanza con la forza di $m m'$ dine, e alla distanza di d centimetri con la forza di $\frac{m m'}{d^2}$ dine.*

Quest'ultimo enunciato può considerarsi come l'espressione completa della legge di Coulomb, traducibile nella formola seguente, che dà in dine il valore della forza F:

$$F = \frac{m m'}{d^2}$$

L'unità di carica dianzi definita, detta *elettrostatica*, è in certi casi troppo piccola. Si assume allora come unità un multiplo di essa 3 bilioni di volte più grandi, e la si chiama *Coulomb*: si ha perciò

$$1 \text{ coulomb} = 3 \times 10^9 \text{ unità elettrostatiche.}$$

Faremo infine due osservazioni.

Anzitutto la formola precedente dà il *valore assoluto* della forza; si tratterà di ripulsioni o di attrazioni secondo che m ed m' hanno il medesimo segno o segno contrario, con l'intesa che le cariche elettriche siano espresse da numeri algebrici, il cui segno sarà positivo o negativo secondo che si abbia da fare con elettricità vitrea o resinosa.

In secondo luogo il valore numerico della forza dipende notevolmente dalla natura del mezzo in cui i corpi elettrizzati sono immersi. La definizione dell'unità d'elettricità, e la formola ultima esprimente la legge di Coulomb, valgono nel caso che il mezzo sia l'aria.

76. Elettrizzazione superficiale dei conduttori. — Come conseguenza della mobilità delle cariche nei corpi conduttori, e della loro mutua ripulsione secondo la legge dei quadrati delle distanze, si è potuto prevedere, per mezzo della teoria matematica, che *in un corpo conduttore*

l'elettricità risiede solo alla superficie esterna. Noi daremo di questa proprietà importantissima una dimostrazione sperimentale, che si può anche considerare come verifica di una conseguenza necessaria della legge di Coulomb.

Ci serviremo di un casotto costituito da rete metallica, disposto su un piatto conduttore (fig. 96), e nel cui interno si trova un elettroscopio E rilegato con la rete per mezzo di una catenella metallica. Comunicheremo quindi alla cassa una energica elettrizzazione per mezzo di una *macchina elettrostatica*, di cui spiegheremo appresso il funzionamento; e constateremo che diversi pendolini connessi con la rete metallica divergono vivamente, mentre le foglie dell'elettroscopio non accuseranno la minima divergenza. In realtà noi abbiamo così operato con un conduttore non ermeticamente chiuso, ma costituito da rete metallica; la teoria dimostra che la legge enunciata è rigorosa per un conduttore chiuso; ma vale sensibilmente anche se il conduttore è una rete con maglie non troppo larghe. Risulta così provato che sull'elettroscopio, in comunicazione metallica con la cassa fortemente elettrizzata, non c'è traccia di elettricità. L'esperienza fu eseguita in grande dal Faraday, che si collocò entro un casotto metallico isolato dal suolo, e fortemente elettrizzato. Le pareti interne non rivelarono la minima carica, toccandole con i più sensibili elettroscopi, nè si notò la più piccola attrazione della parete sulla pallina scarica di un pendolino elettroscopico. Adunque non solo non possono esistere cariche elettriche sulle parti interne d'un conduttore, ma non esistono neanche forze elettriche, nell'interno di un conduttore cavo elettrizzato, da parte delle cariche, comunque grandi, distribuite sulla sua superficie esterna.

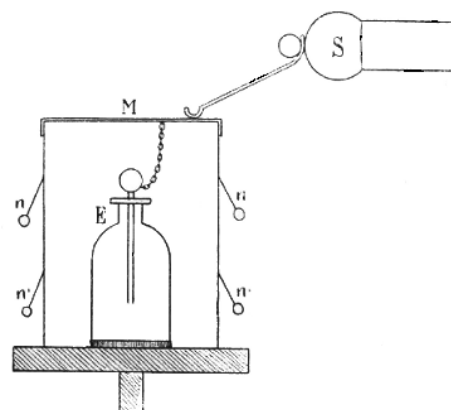


Fig. 96.

Queste due proprietà sono del resto, come si può dimostrare, una conseguenza l'una dell'altra.

Possiamo ora completare ciò che si disse a proposito dell'influenza elettrica. Quando un conduttore carico A è introdotto in un conduttore cavo B (fig. 97), chiuso da tutte le parti e isolato, si destano per influenza sulla parete interna di B delle cariche eteronime e sull'esterna delle cariche omonime a quella di A. Nel caso della figura, se sul conduttore A è distribuita la quantità dell'elettricità $+Q$, si avrà sulla parete interna la quantità totale $-Q$, e sull'esterna la quantità $+Q$. Mettendo in comunicazione, anche per un istante, il conduttore B col suolo, si disperde totalmente la carica esterna $+Q$, e restano la carica $+Q$ di A e la carica interna $-Q$. Se

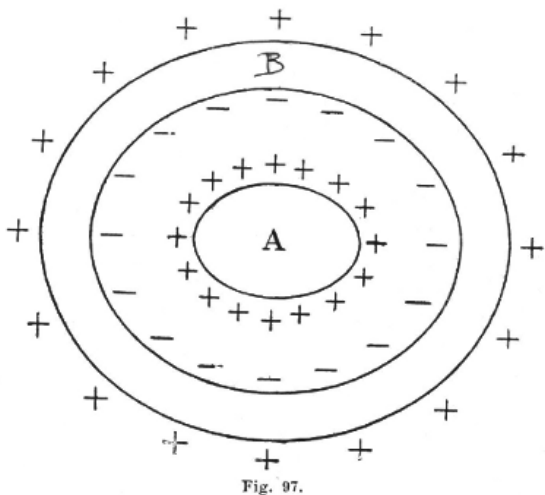


Fig. 97.

ora si fa toccare A con la parete interna, *nessuna carica si manifesta all'esterno*, e sparisce ogni segno di carica in A e in B; ciò prova appunto che la carica interna di B, che si è completamente neutralizzata per il contatto con quella di A, era appunto in quantità eguale, cioè era $-Q$.

Questa e altre esperienze sui conduttori cavi, di grande importanza perchè costituiscono delicatissime conferme della teoria matematica dell'elettricità fondata sulla legge di Coulomb, si devono a Faraday; esse si possono riprodurre col cosiddetto *pozzo di Faraday*. Di quella teoria noi daremo adesso un breve cenno.

Campo e potenziale elettrico.

76. **Campo elettrico.** — Quando sono presenti diverse cariche elettriche in un mezzo isolante, esse eserciteranno azioni elettriche attrattive o ripulsive su una piccolissima pallina carica, ovunque questa si trovi; ma tali azioni riusciranno sensibili solo in una porzione limitata di spazio,

che noi chiameremo *campo di forza elettrica*, o anche *campo elettrico* dovuto alle cariche medesime. In ciascun punto del campo la pallina sarà sottoposta alle forze provenienti dalle diverse cariche agenti; queste forze si potranno comporre, con la regola del parallelogrammo, in una risultante unica che avrà una certa direzione e una certa intensità, dipendenti dalla posizione della pallina. La direzione di quella risultante in ciascun punto del campo, quando la pallina è carica positivamente, chiamasi *direzione del campo*. Quanto all'intensità essa dipende dalla carica della pallina, poichè, ad esempio, raddoppiando questa, si raddoppiano tutte le forze dovute alle varie cariche agenti e si raddoppia perciò la risultante.

L'intensità che questa assume in un punto quando la pallina porta l'unità elettrostatica di carica elettrica positiva si chiama *intensità del campo A* in quel punto.

Così se noi diciamo che nel punto A di un campo questo è diretto secondo AB e ha l'intensità 200, ciò vorrà dire che una pallina piccolissima collocata in A, e portante l'unità di carica, è sottoposta alla forza di 200 dine diretta nel senso AB.

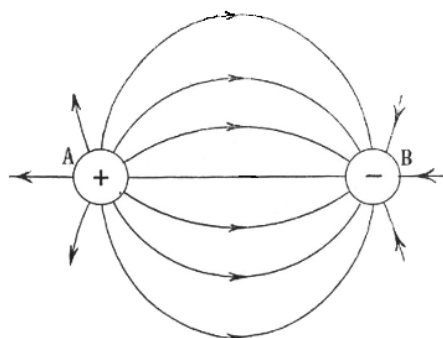


Fig. 99.

Le figure 98, 99 e 100 danno appunto la distribuzione delle linee di forza dovute: a una carica disseminata su una sfera, a due cariche opposte esistenti sulle sfere A e B, o alle cariche opposte distribuite su due piatti paralleli A e B. Nell'ultimo caso le linee di forza sono parallele; si dice allora che il campo è *uniforme*.

Nel caso della fig. 98 le linee di forza divergono dalla superficie come i raggi della sfera, o anche come i raggi luminosi partenti da una sorgente puntiforme collocata nel centro, la quale, come abbiamo visto in Fotometria, produce illuminamenti decrescenti al crescere della distanza, in proporzione inversa del quadrato di questa. Se perciò si disegnano un certo numero limitato di raggi, distribuiti regolarmente come nella figura, l'illuminamento sarà maggiore ove i raggi disegnati son più fitti, e anzi sarà proporzionale al numero dei raggi medesimi che perfora 1 cm^2 della superficie illuminata. Un sistema di rappresentazione analogo può servire anche per il campo elettrico. Supponiamo che sia nota l'intensità del campo nei vari punti d'una superficie, e si disegni un numero limitato di linee di forza così distribuite che per ogni cm^2 della superficie ne passino tante quanto è il valore numerico dell'intensità in quella regione. Prolungando dalle due parti quelle linee, e quelle soltanto, si può dimostrare che ove le linee son più addensate, ivi il campo è più intenso, in proporzione del numero di linee che penetrano normalmente in un cm^2 . Cosicché rappresentando il campo con questo sistema di linee, come fece per primo Faraday, si ha immediatamente la direzione di esso nei diversi posti, e se ne può intuire la intensità dal loro maggiore o minore addensamento.

In particolare nel caso della fig. 100 le linee hanno lungo il loro percorso distanza costante; cosicché nella regione compresa tra i piatti, e lontano dai bordi, il campo avrà ovunque la stessa intensità.

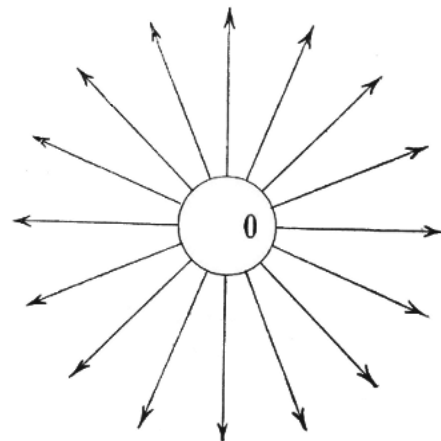


Fig. 98

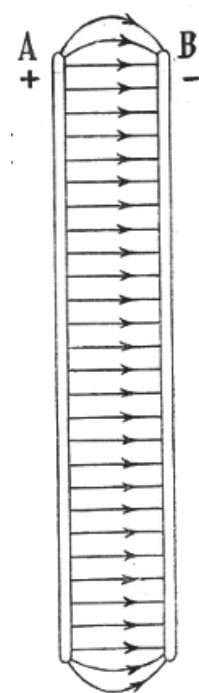


Fig 100

È questa un'altra caratteristica del campo uniforme.

78. Potenziale elettrico. — Durante il movimento della pallina lungo la linea di forza essa è sempre sollecitata nella direzione del moto dalle forze elettriche, che l'accompagnano nel movimento, pur cambiando poco a poco d'intensità. Supponiamo invece che, partendo da un punto A del campo, la pallina si allontani *seguendo una linea qualsiasi*, fino a portarsi fuori del campo, a tale distanza, cioè che esso abbia un'intensità trascurabile; in totale le forze elettriche, che hanno sempre agito durante il moto sebbene con intensità e direzioni variabili, *avranno eseguito un certo lavoro*.

Or si dimostra, che *questo lavoro è sempre lo stesso, qualunque sia il cammino seguito dalla pallina per portarsi dal punto A fino a un punto qualunque fuori del campo*.

A questo lavoro compiuto dalle forze elettriche, quando la pallina è carica dell'unità positiva di elettricità, e che dipende solo dalle cariche agenti e dalla posizione del punto A, si dà il nome di *potenziale* nel punto A. In un punto si avrà perciò il potenziale 1 se trasportando da quel punto a distanza grandissima l'unità elettrostatica di elettricità, le forze elettriche fanno il lavoro di un ergon.

Durante il moto, e a seconda della forma della traiettoria, le forze elettriche potranno eseguire in alcuni tratti un lavoro motore, in altri un lavoro resistente; ma la somma algebrica totale di questi lavori non dipende, per quanto si è detto, dalla forma del cammino seguito; se essa è positiva, cioè se in totale il lavoro motore prevarrà sul lavoro resistente, anche il potenziale sarà positivo; nel caso opposto il potenziale sarà negativo.

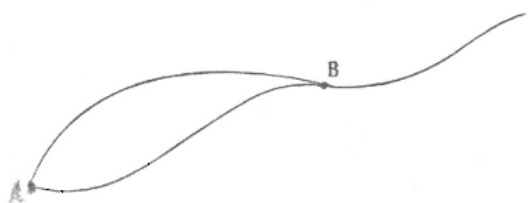


Fig. 101.

Supponiamo che in A (fig. 101) il potenziale abbia il valore 100, e in B il valore 70; ciò vuol dire che portando una pallina carica dell'unità di elettricità positiva da A fino a distanza grandissima, le forze elettriche fanno il lavoro di 100 ergon; mentre il lavoro è di 70 ergon partendo da B. Ma il lavoro eseguito partendo da A è sempre 100 ergon, qualunque sia il cammino percorso; in particolare noi possiamo

sceglierne uno che passi per B, e allora, dei 100 ergon totali, 70 saranno eseguiti da B in poi, e perciò da A a B ne saranno eseguiti

$$30 = 100 - 70$$

qualunque sia il cammino tra A e B.

Adunque le forze elettriche compiono sull'unità di carica, che si sposta da un punto a un altro, un lavoro eguale alla differenza tra il potenziale del punto di partenza e quello del punto di arrivo.

È chiaro allora che se Q unità di carica passano dal punto ove il potenziale è V_1 al punto ove il potenziale è V_2 , e se lo spostamento di questa carica Q non altera sensibilmente i valori dei potenziali V_1 e V_2 , il lavoro fatto dalle forze elettriche sarà :

$$L = Q \{V_1 - V_2\}$$

È questa la formola fondamentale della energetica elettrica. Essa è perciò la base dell'elettrologia moderna, che ha di mira specialmente l'energia che si assorbe o si sviluppa nei fenomeni elettrici. Misurando Q in unità elettrostatiche, e, V_1 , V_2 nel modo che noi abbiamo definito, L viene misurato in ergon; ma misurando Q in coulomb, e i potenziali in *volta*, che è un'unità 300 volte più piccola della precedente, il lavoro risulterà valutato in *joule*. Difatti il lavoro compiuto delle forze elettriche sopra 1 coulomb = 3×10^{11} unità elettrostatiche, quando la differenza di potenziale è di 1 volta, sarà, per la formola precedente:

$$L = 3 \times 10^9 \times \frac{1}{300} = 10.000.000 \text{ ergon} = 1 \text{ joule}$$

79. **Movimento spontaneo delle cariche e dei corpi elettrizzati. Potenziale d'un conduttore.** — Nel punto A di un campo (fig. 102) il potenziale abbia il valore V_A , e nel punto B, molto prossimo ad A, il valore V_B , e sia $V_A > V_B$. Quando una pallina portante la carica $+Q$ passa da A a B, le forze elettriche fanno un lavoro

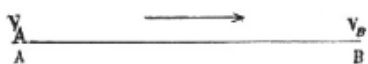


Fig. 102.

$$L = Q (V_A - V_B)$$

che è *positivo*, cioè motore. Ciò vuol dire che, lungo il piccolo tratto AB, la forza è motrice ed ha come valore *medio* $\frac{V_A - V_B}{AB}$ ove AB è la distanza dei due punti. Perciò la pallina se è mobile liberamente lungo la retta AB, si muoverà spontaneamente nel senso AB, ovvero dai punti di potenziale più alto verso quelli di potenziale più basso. Invece una carica negativa si muoverebbe in senso opposto.

Collochiamo adesso tra A e B un pezzetto di filo conduttore isolato; per quanto si è detto l'elettricità positiva e la negativa, che sono in esso sempre esistenti in quantità eguale, si muoveranno in senso opposto: la prima verso B, la seconda verso A; si altereranno con ciò i valori del potenziale in tutti i punti del campo, e in conseguenza a un certo punto le cariche si fermano, localizzandosi alla superficie del filo, che viene così elettrizzato per influenza. Se cessa il movimento, ciò vuol dire che cessa la forza cui esso è dovuto, la quale è sempre data da $\frac{V_A - V_B}{AB}$; adunque deve annullarsi $V_A - V_B$, cioè i due punti acquistano lo stesso potenziale per lo spostamento delle cariche dovuto alle forze preesistenti tra A e B.

Questo ragionamento può esser ripetuto per un conduttore di qualsiasi forma e dimensione, carico o no, e collocato in un campo qualsiasi. Quando le cariche proprie o d'influenza si saranno definitivamente distribuite e fissate alla superficie del conduttore, il loro equilibrio rivela che non esiste alcuna forza che tenda a spostarle verso i punti adiacenti della superficie, e perciò che *tutti i punti del conduttore si trovano allo stesso potenziale*.

Se poi nel campo si trovano due conduttori, portanti o no delle cariche proprie, ma sempre carichi per influenza (poichè esistendo forze elettriche esse sposteranno inversamente le cariche positive e negative *naturali* dei conduttori esistenti nel campo) e l'uno ha un potenziale maggiore dell'altro, mettendoli in comunicazione con un filo *le cariche positive scorreranno nel filo dal corpo di potenziale maggiore verso quello di potenziale minore*. In virtù dello spostamento di queste cariche i potenziali nei varii punti del campo si alterano, e quando il moto elettrico sarà cessato, i due conduttori si troveranno allo stesso potenziale.

Come si vede, partendo dalla definizione matematica di potenziale, siamo pervenuti a riconoscerne dei caratteri che identificano il concetto fisico di potenziale con altri concetti che ci sono ormai familiari; quello di pressione di un fluido e quello di temperatura. Come un fluido è in quiete solo se in tutti i punti regna la stessa pressione, e invece esso si muove quando esistono differenze di pressione; come il calore passa dai corpi di maggiore a quelli di minore temperatura; così quando l'elettricità è in equilibrio in un conduttore tutti i suoi punti hanno lo stesso potenziale, e invece essa si muove dai conduttori di potenziale più *alto* verso quelli di potenziale più *basso*. Si tratta di analogie che ci potranno essere utili spessissimo, ma che bisogna solo considerare come analogie e nulla più.

E converrà non dimenticare che mentre nel caso dei fluidi e del calore il concetto di pressione o di temperatura *in un punto* è inseparabile da quello dell'esistenza in quel punto del fluido o del calore, ben altro avviene per l'elettricità; così in un conduttore massiccio, mentre le cariche elettriche esistono *solo* alla sua superficie, il potenziale ha un valore determinato dentro e fuori del conduttore, ed è lo stesso in *tutti* i suoi punti, anche all'interno, ove non esistono cariche.

Ciò non toglie che l'analogia ci possa servire in moltissimi casi. Per esempio aumentando, per mezzo di una pompa, la quantità di un gas contenuta in un pallone, ne aumenta insieme la pressione; aumentando la quantità di calore contenuta in un corpo ne aumenta la temperatura; e così

aumentando la quantità di elettricità contenuta in un conduttore ne aumenta il potenziale, e viceversa. È per questo che se due conduttori A e B (fig. 103) sono a potenziale diverso, e quello di A è maggiore di quello di B, togliendo successivamente delle cariche positive ad A e trasportandole su B, diminuirà il potenziale di A e aumenterà quello di B. Questo passaggio può avvenire per *convezione* e per *conduzione*. Nel primo modo una pallina conduttrice che venga alternativamente in contatto con A e B porterà ogni volta una certa quantità di elettricità da A a B. Il passaggio per conduzione si avrà invece quando tra A e B si stabilisce una comunicazione diretta, per mezzo di un filo metallico.

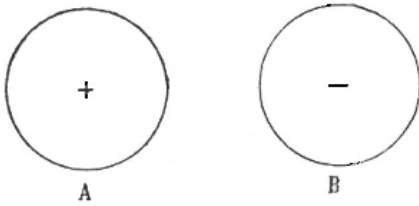


Fig. 103.

Fermiamoci un poco ad esaminare questi due processi di eguagliamento dei potenziali. Nel primo caso la pallina sarà nel suo movimento sollecitata dalle forze elettriche, e noi ne potremo ricavare un lavoro meccanico. Nel secondo si mettono in moto direttamente le cariche elettriche, e non si vede che cosa avvenga dell'energia che era disponibile prima che i due conduttori si portassero allo stesso potenziale, e che, per il principio della conservazione, non può andare perduta. L'esperienza dimostra, e noi ne vedremo frequenti esempi in seguito, che *l'energia disponibile si converte in calore nel filo, in misura equivalente*. Il calore ottenuto per il passaggio da A a B di una piccola quantità d'elettricità q , tanto piccola che i potenziali dei due conduttori restino sensibilmente V_A e V_B dopo il passaggio, corrisponderà per ciò al lavoro

$$L = q (V_A - V_B)$$

in ragione di 1 caloria per ogni 4,19 joule.

Nei consecutivi passaggi la differenza di potenziale andrà progressivamente decrescendo, e con essa *diminuirà il calore svolto dal transito della medesima quantità q d'elettricità*.

Ma se noi con un artificio opportuno, e ne incontreremo appresso dei molto ingegnosi, manteniamo costante la differenza di potenziale tra A e B, malgrado il livellamento che tende a produrre il filo metallico che li mette in comunicazione, *un moto indefinito dell'elettricità si compirà lungo il filo, da A verso B*, costituendo ciò che si chiama **corrente elettrica**, e nel filo si svilupperà, per ogni unità di carica che passa da A a B, una quantità di energia eguale alla differenza di potenziale costante tra A e B.

Adunque come in una condotta d'acqua si può avere il moto continuo del liquido, qualora si mantenga ai suoi estremi una differenza di pressione, così in un filo conduttore si può avere un moto permanente di elettricità, conservando ai suoi estremi una differenza di potenziale. E perciò quando noi diciamo che il potenziale è lo stesso in tutti i punti d'un conduttore, ci riferiamo al caso che l'elettricità sia *in quiete* sul conduttore medesimo, così come si può dire che un liquido in quiete ha in tutti i punti la stessa pressione.

80. Potenziale del suolo. — Se poi dei due conduttori A e B uno è costituito dal suolo, si potrà sostituire alla locuzione *differenza di potenziale tra A e il suolo*, l'altra più breve di *potenziale di A*, con che si presuppone di assumere come *zero* il potenziale del suolo. Si noti però che il potenziale della Terra è, intanto, diverso da punto a punto, e avrà perciò, in generale, un valore diverso da zero; cioè portando l'unità di carica da un punto della Terra fino a distanza infinita, può ancora essere eseguito un lavoro dal campo elettrico terrestre. Sarà utile perciò chiarire un po' le nostre idee su questo punto, per evitare falsi apprezzamenti.

Supponiamo di eseguire delle esperienze di elettricità nell'interno di una stanza, che costituirà perciò, con le sue pareti, un involucro conduttore chiuso. Tutto l'involucro, e i punti del suo interno, si troveranno a un potenziale costante, e saranno nulle le forze elettriche nell'interno della stanza, qualunque siano le cariche esterne delle pareti e della Terra con cui esse comunicano. Il *potenziale vero* di un conduttore A all'interno della stanza sarà, a rigore, il lavoro fatto dalle forze elettriche quando l'unità di carica dal conduttore A sia portata, attraverso una piccola apertura praticata nella stanza, fino a distanza infinita. Sia esso V_A . Un altro conduttore abbia invece il potenziale vero V_B ;

e sia infine V il potenziale vero comune alla Terra e i punti della stanza. La differenza dei potenziali veri tra A e B sarà

$$V_A - V_B$$

ma resterà la stessa se noi sostituiamo ai potenziale veri V_A e V_B le differenze col potenziale V del suolo; ponendo, cioè:

$$\begin{aligned} v_A &= V_A - V \\ v_B &= V_B - V \end{aligned}$$

sarà, come è evidente,

$$v_A - v_B = V_A - V_B$$

Adunque non avrà alcuna conseguenza il sostituire, per i fenomeni che hanno luogo tra i due conduttori, ai loro potenziali *veri* V_A e V_B , quelli apparenti rispetto al suolo, cioè v_A e v_B .

Anzi questa sostituzione avrà un vantaggio. Noi abbiamo detto, invero, che comunicando elettricità a un conduttore se ne eleva il potenziale, così come si eleva la temperatura d'un corpo comunicandogli calore. D'altra parte quando il conduttore tocca le pareti o il suolo della stanza, e non esistono all'interno di questa altri conduttori carichi e isolati, esso perde rigorosamente *tutta* la sua elettricità, poichè le cariche si portano alla superficie esterna del conduttore *unico* formato col contatto. Chiamando zero il potenziale attuale del conduttore, posto in comunicazione col suolo, noi potremo dire perciò che un conduttore a potenziale zero, sottratto all'influenza di altri conduttori carichi, non ha carica elettrica; mentre un conduttore che ha una carica positiva o negativa avrà un potenziale positivo o negativo. Si dimostra poi che il potenziale così ottenuto è *proporzionale alla quantità d'elettricità contenuta dal conduttore*, sempre però escludendo che siano presenti altri conduttori elettrizzati, capaci perciò di alterare con le loro cariche il potenziale del primo.

81. Distribuzione dell'elettricità sui conduttori. Potere delle punte.

— *a) Conduttore isolato.* Il potenziale in un punto del campo dipende in modo semplice, come si dimostra in Fisica Matematica, dalle cariche elettriche esistenti nel campo, e dalle loro distanze dal punto considerato. E perchè esso abbia un determinato valore, comune a tutti i punti d'un conduttore unico elettrizzato, occorre che le cariche si distribuiscano alla superficie in misura ben determinata sui vari punti.

Sopra un sfera la ripartizione sarà *uniforme*, cioè ogni centimetro quadrato di essa conterrà un'eguale quantità d'elettricità. Lo stesso non avviene per i conduttori di altre forme; si dimostra allora che le cariche si addensano sulle parti più curve, e che se il conduttore è munito di spigoli o di punte aguzze, la carica si localizza quasi esclusivamente in queste ultime parti.

Questo fatto ha una conseguenza notevole, che si dimostra anch'essa per via matematica; e cioè, mentre il potenziale è lo stesso in tutti i punti del conduttore, le linee di forza, tracciate in numero limitato, che rappresentano la direzione, e anche l'intensità del campo col loro maggiore addensamento, *son molto più fitte nelle vicinanze delle parti acuminate*, e perciò ivi è massima la forza che il conduttore esercita su una pallina neutra o elettrizzata.

Adunque un conduttore elettrizzato, munito di una punta, attirerà vivamente su quella le particelle d'aria circostanti, che si elettrizzeranno per contatto, e saranno poscia respinte come la pallina del pendolino elettroscopico.³

Ne risultano due effetti, facilmente dimostrabili con l'esperienza :

1. L'elettricità accumulata sul conduttore si *disperde* rapidamente nell'aria se esso è munito di punta.

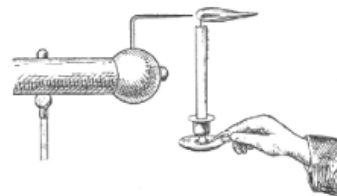


Fig. 104.

³ Sul meccanismo di questa dispersione convettiva dovuta ai gas torneremo più a lungo in seguito.

2. In vicinanza di questa si determina una specie di soffio, detto *vento elettrico*, che emana dalla punta, mentre, per reazione, la punta è sollecitata a muoversi in senso opposto. Si spiega così l'esperienza della fig. 104, e quella detta del *mulinello elettrico* fig. 105.

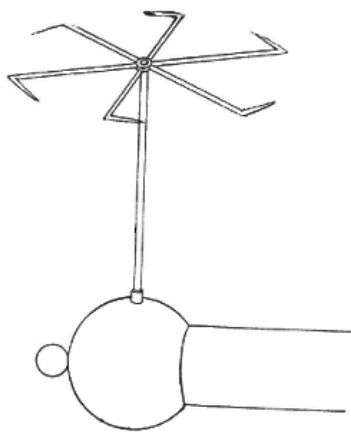


Fig. 105.

b) Conduttore in un campo dovuto ad altri conduttori. — In questo caso la carica *totale* sviluppata per influenza, e che si distribuisce sempre alla superficie, è algebricamente nulla: e le cariche positive e le negative che affacciano sulle varie parti di esso son tali da eguagliare il potenziale in tutti i suoi punti.

Poichè le cariche *opposte* son più vicine al corpo influenzante, *il potenziale di questo si abbassa per la presenza dei corpi influenzati.*

Inoltre l'elettricità indotta, se il conduttore influenzato è munito di una punta, e specialmente se questa è collocata nelle vicinanze del corpo inducente, si disperde rapidamente. Così nel caso della fig. 106, l'elettricità indotta negativa si accumulerà sulla

punta di B, e le particelle d'aria convettivamente la porteranno via, verso A, fino a che A e B assumono sensibilmente lo stesso potenziale, come se si toccassero metallicamente. È chiaro allora che su B resterà solo la carica omonima di quella di A.

Esistono importanti applicazioni di questa proprietà dei conduttori muniti di punte, il cui effetto sui corpi elettrizzati presenti equivale a quello di una comunicazione invisibile con i diversi punti di questi.

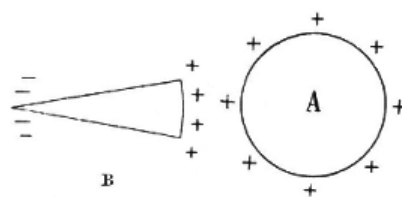


Fig. 106.

Condensatori e macchine elettrostatiche.

82. **Capacità elettrica.** — Comunicando a un conduttore isolato una carica Q , esso assume un potenziale V ; raddoppiando o triplicando Q , si raddoppia o si triplica V (§ 80), cioè per elevare di 1 il potenziale di un conduttore si richiede una ben determinata quantità di elettricità, che si assume come misura della *capacità elettrica* del conduttore. Indicandola con C , è chiaro perciò che per comunicare al conduttore un potenziale V occorrerà una quantità d'elettricità:

$$Q = C V$$

La capacità elettrica ha quindi una certa analogia con la *capacità calorifica*, espressa dalla quantità di calore che occorre per elevare di un grado la temperatura d'un corpo, e anche con la sezione o base di un recipiente cilindrico, che misura in certa guisa la quantità di liquido che occorre per elevare il livello di 1 centimetro.

Si noti però che la capacità d'un conduttore dipende, oltre che dalla forma e dalle dimensioni del conduttore medesimo, anche dalla presenza e dalla posizione di altri conduttori vicini che ne subiscono l'influenza, poichè, come si è visto nel precedente paragrafo (caso *b*), la presenza di questi abbassa il potenziale del primo, a parità di carica in esso contenuta; e perciò occorrerà una maggiore carica per elevarne di 1 il potenziale. Questo effetto è specialmente cospicuo se i conduttori indotti sono in comunicazione col suolo, e son portati a piccolissima distanza dall'induce. E così si dimostra che mentre la capacità di una sfera isolata è numericamente eguale al suo raggio R , circondandola di un involucro conduttore sferico alla distanza d , messo in comunicazione col suolo, essa viene moltiplicata per il rapporto tra il raggio della sfera e la distanza dall'involucro. Se fosse $R = 20$ cm. e $d = 0,1$ cm, la capacità diverrebbe perciò 200 volte più grande.

Questi apparecchi nei quali si può, a parità di potenziale, accumulare una carica maggiore che nei conduttori isolati, si chiamano *condensatori*. Si può dar loro la forma di due piatti affacciati; e

allora caricando un piatto mentre l'altro è in comunicazione col suolo, la capacità del primo sarà proporzionale alla superficie e inversamente proporzionale alla distanza tra i piatti.

Il modello più semplice di condensatore è costituito da una lastra di vetro o di altra sostanza isolante sulle cui facce sono incollate due lamine di stagnola, che si chiamano *armature*, e di cui l'una si mette in comunicazione con la macchina elettrostatica e l'altra col suolo.

Un'altra forma molto comune è detta *bottiglia di Leyda*, (fig. 107) e consiste in una bottiglia o un bicchiere che porta incollate nella superficie interna e nella esterna, fino a una certa distanza dai bordi, due lamine di stagnola. L'armatura interna comunica con un'asta conduttrice munita di una sferetta *B*.

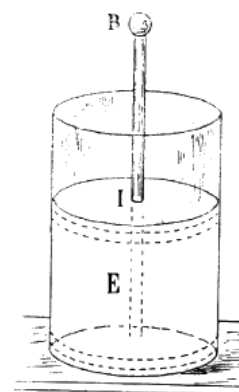


Fig. 107.

83. Energia d'un conduttore carico. — È il lavoro sviluppato dalle forze elettriche nella scarica di un conduttore dal potenziale V al potenziale 0 della Terra. Noi abbiamo detto che una piccola quantità d'elettricità q che passi dal potenziale V_A al potenziale V_B è capace di eseguire il lavoro

$$L = q (V_A - V_B)$$

o di sviluppare, in un filo conduttore, il calore equivalente.

Quando il conduttore carico perde successivamente la sua carica, solo le primissime parti di questa passano dal potenziale V al potenziale 0 , poichè poco a poco il potenziale primitivo va diminuendo. Si dimostra che il lavoro *totale* sviluppato è allora

$$L = \frac{1}{2} Q V$$

ove Q è la quantità totale di elettricità scaricata.

Ed è chiaro che, a parità di V , questo lavoro, o il calore equivalente, che è proporzionale alla quantità d'elettricità che si scarica, cioè a Q , sarà anche proporzionale alla capacità del conduttore. Si spiegano così gli effetti notevoli della scarica dei condensatori, la cui capacità è molto più grande di quella dei conduttori isolati, specialmente ricorrendo alle *batterie* di

condensatori, come quella della fig. 108. In essa un certo numero di condensatori sono associati per riunione di tutte le armature interne, e di tutte le esterne, tra loro; si forma così un condensatore la cui capacità è eguale a quella di una bottiglia sola moltiplicata per il loro numero.

Gli effetti calorifici della scarica di queste batterie sono molto rilevanti; e invero la scarica si compie in un tempo brevissimo, e quindi il filo che *fa arco*, come si suol dire, tra le due armature, e nel quale, se esso è molto sottile, si sviluppa istantaneamente buona parte dell'energia elettrostatica in forma calorifica, può raggiungere in quello istante una temperatura molto elevata, e fondersi e anche volatilizzarsi in una viva fiammata.

Se invece l'arco di scarica, come nella fig. 109, è un grosso conduttore articolato, e tenuto da due sostegni isolanti, e si tocca con un estremo l'armatura esterna, avvicinando l'altro alla pallina del condensatore, l'energia della scarica si esplica quasi interamente in una rumorosa, brillante *scintilla* che scocca tra le due palline. Ma di questo fenomeno noi ci potremo occupare solo più tardi.



Fig. 109.

84. Unità di misura della capacità. — Risulta dalla formola

$$Q = C V \text{ ovvero:}$$

$$C = \frac{Q}{V}$$

che misurando Q e V in unità elettrostatiche, la capacità 1 è posseduta da quel conduttore che richiede 1 unità elettrostatica per acquistare il potenziale 1. E si dimostra che una sferetta di 1 cm. di raggio ha appunto l'unità di capacità così definita.

Se invece si misurano Q in Coulomb e V in Volta e si vuol tenere valida l'ultima formola, la capacità 1 sarà posseduta da quel conduttore che richiede 1 Coulomb di carica per acquistare il potenziale 1 Volta. A questa unità di capacità si è dato il nome di Farad; essa è 900 bilioni di volte più grande della precedente. Questa unità è in tutti i casi troppo grande; si usa come unità comune il *microfarad* (un milionesimo di farad) che però è ancora grandissima, poichè è 900 mila volte più grande dell'unità elettrostatica di capacità; e perciò una sfera isolata, per avere 1 microfarad di capacità, dovrebbe avere un raggio di 900.000 centimetri (9 chilometri). Questa capacità si può ottenere associando *in batteria* diversi condensatori piani a lamina sottile di mica, o di carta paraffinata.

85. Misura dei potenziali. — Si è dimostrato sperimentalmente che l'elettroscopio a foglie d'oro, rilegato per mezzo di un filo lungo e sottile a un conduttore, può servire alla graduazione dei potenziali, poichè dà una divergenza costante se si tocca con lo estremo del filo un punto *qualsiasi* di un conduttore che non agisca per influenza sull'elettroscopio; e la divergenza si annulla quando il conduttore, anche se sottoposto ad azioni d'influenza, è al potenziale zero, cioè in contatto col suolo.

Ma la divergenza non è proporzionale al potenziale del conduttore. Esistono invece degli apparecchi molto delicati che permettono la misura assoluta del potenziale d'un conduttore, o anche la misura relativa di essa, cioè il rapporto tra il potenziale d'un corpo e quello d'un altro. Questi apparecchi sono gli *elettrometri*; ma noi in proposito possiamo dire soltanto che essi son fondati sulla misura delle forze attrattive che si esercitano tra alcuni conduttori fissi e altri molto leggeri e dotati di estrema mobilità.

86. Dielettrici. — Tra due piatti, formanti un condensatore piano, e immersi nell'aria, la differenza di potenziale non può superare un certo limite, che dipende dalla loro distanza; al di là di quel limite scocca la scintilla tra le armature, e il condensatore si scarica attraverso il ponte conduttore cui equivale, come vedremo, la scintilla medesima. L'interposizione di una lamina isolante solida, come il vetro, l'ebanite, la mica, ecc. rende più difficile la produzione della scintilla; e permette perciò di portare le due armature a una differenza di potenziale molto più grande, e di condensarvi perciò maggiore quantità d'elettricità. È così che le due armature d'una bottiglia di Leyda, avente lo spessore d'un paio di millimetri, posson caricarsi a una differenza di potenziale capace di fare scoccare nell'aria una scintilla di più che 10 centimetri di lunghezza.

Ma la lamina isolante sostituita all'aria determina ancora un effetto non meno importante. *A parità di dimensioni la capacità elettrica del condensatore riesce notevolmente accresciuta.* Così nel caso di una lamina di vetro la capacità è da 3 a 5 volte maggiore di quella posseduta dallo stesso condensatore senza vetro, e avente perciò le armature separate da aria. Si chiama appunto *costante dielettrica* di un corpo isolante il rapporto della capacità di un condensatore costituito con quell'isolante alla capacità dello stesso condensatore con le armature separate dall'aria.

Questo fenomeno fu scoperto dal Faraday, il quale vi fondò la sua concezione importantissima sull'azione del mezzo nei fenomeni elettrici, messa poi in forma matematica dal Maxwell.

Secondo questa teoria le forze tra i corpi elettrizzati immersi in un *dielettrico*, cioè in un isolante, che dipendono, come noi già abbiamo accennato, dalla natura del mezzo, sarebbero dovute a una particolare perturbazione creata in esso dalle cariche elettriche presenti; e consistente in uno stato di stiramento nel senso delle linee di forze e di compressione nel senso ad esse normale. Le

linee di forza, che rilegano due conduttori carichi di elettricità opposte, si comportano come dei veri filamenti elastici stirati, che tendono perciò a contrarsi, e ad avvicinare i conduttori ove son fissati gli estremi delle linee medesime.

Non è facile formarsi un'idea adeguata della portata grandissima di questa teoria, che localizza nel dielettrico interposto l'origine delle forze elettriche e l'energia elettrostatica, come in un mezzo elastico deformato; e noi purtroppo non possiamo svilupparne le conseguenze. Ci limiteremo a riferire che queste azioni, aventi la loro sede nel mezzo, non si esercitano istantaneamente in tutto il campo, appena create le cariche elettriche, ma con un certo ritardo dipendente dalla distanza, come se l'azione generata nel punto ove s'è creata la carica, si propagasse tutto intorno con una velocità grandissima ma ben determinata.

Questa velocità coincide con la velocità della luce nel mezzo; cosicchè se una carica elettrica oscilla rapidamente intorno a un punto, la forza da essa creata a distanza, si modifica periodicamente, ma con un ritardo dipendente dalla distanza. Avremo perciò come delle onde di forza elettrica, che si propagano con la velocità della luce, e che anzi sono, a parte il periodo, *la stessa cosa* delle onde luminose.

Noi daremo più in là un cenno alquanto più esteso di questa teoria; per ora ci limitiamo a riferire una conseguenza ben singolare, poichè rilega due grandezze fisiche che in apparenza non han niente di comune; essa è la famosa *legge di Maxwell*, per la quale la costante dielettrica d'un mezzo, definita come sopra, deve coincidere col quadrato dell'indice di rifrazione del mezzo per raggi luminosi di lunghezza d'onda grandissima.

Questa previsione, che l'esperienza bene interpretata ha sempre più confermato, fu il punto di partenza della *teoria elettromagnetica della luce*.

87. Macchine elettrostatiche. — Per caricare un conduttore a un alto potenziale, o stabilire una elevata differenziale di potenziale tra due conduttori isolati, servono le macchine elettrostatiche.

Le più antiche, dette a strofinio, utilizzavano le cariche destinate per strofinio su un disco di vetro rotante tra due cuscinetti, posti all'estremità d'un diametro.

La carica sviluppata si trasportava su un conduttore isolato per mezzo di una serie di punte connesse con l'ultimo, e disposte in presenza del disco di vetro. Ma queste macchine non hanno ormai che un interesse puramente storico.

Molto più efficaci sono le macchine a induzione, di cui la più semplice è l'*elettroforo* di Volta. Esso consta di un disco piano di sostanze resinose, sul quale si adagia un disco piano di legno coperto di stagnola e tenuto da un manico isolante.

Dando, per strofinio, una carica elettrica al disco, e adagiandovi il piatto metallizzato, il contatto tra i due ha luogo solo in un numero limitato di punti, perchè la loro forma non può essere assolutamente piana. Le cose vanno perciò come se il disco e il piatto si trovassero a una piccolissima distanza e separati da aria che fa da dielettrico. Se il disco D (fig. 110) è carico negativamente, il piatto si caricherà per influenza, come nella figura; e toccandolo col dito superiormente, la carica negativa si porta al suolo, mentre resta su *p* solo la positiva. Se ora si allontana il piatto, per mezzo del manico isolante, la sua carica positiva diviene libera, e avvicinandovi il dito se ne può trarre una scintilla.

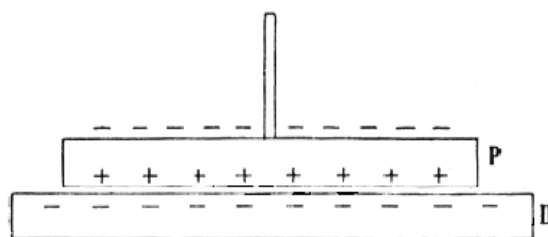


fig. 110.

Il fenomeno può riprodursi quasi indefinitamente, poichè a ogni contatto di *p* con *D* vien portata via solo la piccolissima carica negativa dei pochi punti di *D* che toccano *p*. Ed è chiaro che l'energia elettrostatica del piatto sollevato, dopo che fu posto per un istante in comunicazione col suolo, è creata dal nostro lavoro meccanico, poichè nel sollevare il piatto dobbiamo vincere la rilevante attrazione tra la carica positiva di *p* e la negativa di *D*.

Utilizzando un principio analogo sono state ideate e costruite le attuali macchine a induzione a funzionamento continuo, nelle quali dei dischi isolanti ruotano in presenza di altri dischi fermi o ruotanti in senso inverso; e le cariche iniziali, create accidentalmente, si esaltano sempre più per dei

processi d'influenza su conduttori opportunamente disposti. Ma la spiegazione completa del funzionamento complicato di queste macchine non è agevole in un corso breve ed elementare; noi rimandiamo perciò chi vuol conoscerne i particolari ai trattati più estesi.

MAGNETISMO.

88. **Calamite.** — Conosciamo tutti quei pezzi d'acciaio, aventi all'incirca la forma di un ferro da cavallo, che si chiamano *calamite*, e che hanno la proprietà di attirare gli oggetti di ferro, come una chiave, un chiodo, una penna ecc. Noi vedremo come si può comunicare all'acciaio la proprietà per cui esso si trasforma in una calamita; possiamo però constatare subito che passando ripetutamente una calamita su una sbarretta o un filo d'acciaio, sempre nello stesso senso, anche la sbarretta o il filo diventano calamite, capaci perciò di attirare degli altri pezzi di sferro. Ci serviremo anzi di una calamita di questa forma, o anche di una lamina a punte acute come la AB (fig. 111) per dimostrarne le proprietà principali, che si attribuiscono a un *quid* detto *magnetismo*.

1. Immergendo un *ago magnetico* come AB, o un filo d'acciaio calamitato o *magnetizzato* nella limatura di ferro, essa vi si attacca, costituendo come due piccole barbe, agli estremi. Questi si chiamano *poli dell'ago*, o del *magnete*.

2. Disponendo l'ago su una punta, per mezzo di un cappelletto che gli consenta di muoversi in un piano orizzontale (fig. 111), come anche sospendendo un magnete in forma di sbarra a un filo che gli permetta solo di muoversi in un piano orizzontale, l'ago o il magnete si orientano in una determinata direzione, cosicchè gli estremi si dispongono sensibilmente nella direzione nord-sud del luogo; allontanando l'ago da quella posizione esso vi ritorna dopo una serie d'oscillazioni smorzate, come un pendolo torna alla posizione verticale; e un estremo determinato dell'ago si porta costantemente verso il nord terrestre, l'altro verso il sud. Si dà ad essi il nome di *polo nord* e *polo sud* dell'ago o del magnete.

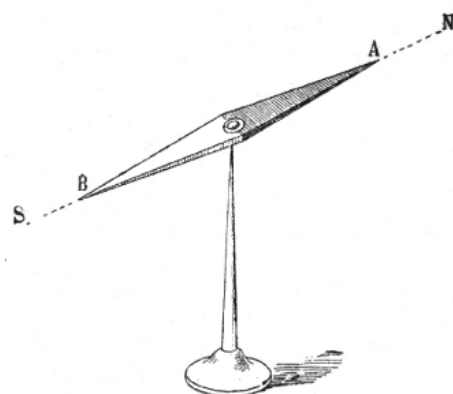


Fig. 111.

3. Il polo nord e il polo sud di un magnete attirano indifferentemente un pezzo di ferro *dolce* (ferro chimicamente privo di carbonio) o anche un pezzo di acciaio che non sia per conto proprio un magnete. E viceversa, se il magnete è mobile, i suoi estremi sono attirati entrambi da un pezzo di ferro dolce o da un pezzo di acciaio che non sia magnetizzato.

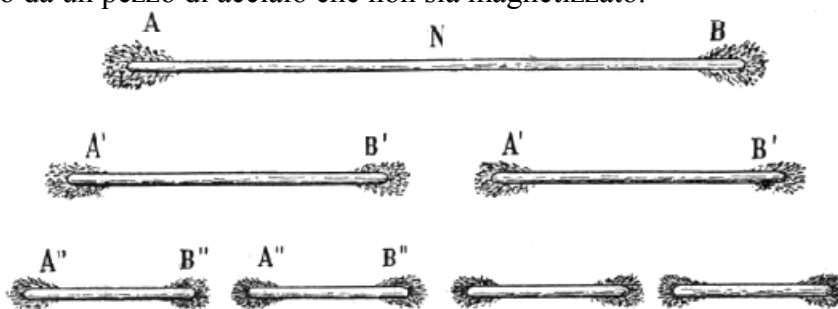


Fig. 112.

4. Avvicinando a un magnete mobile come quello della figura 112 un altro magnete, si constata che tra i poli omonimi c'è ripulsione, tra i poli eteronimi c'è attrazione.

5. Immergendo un lungo magnete filiforme AB nella limatura, questa si addensa soltanto agli estremi, nei poli (fig. 112); ma spezzandolo a metà si creano nel posto N della rottura due nuovi poli eteronimi, cosicchè ogni parte forma un nuovo magnete completo, A'B', con due poli opposti agli estremi. Lo stesso avviene dividendo in più pezzi le parti ottenute; ogni pezzo è sempre un nuovo magnete completo, che agisce però su un magnete mobile sempre più debolmente, quanto più il pezzo usato si va accorciando.

6. Passando ripetutamente, sempre in un senso, una calamita su un pezzo di acciaio temperato se ne ottiene una nuova calamita; invece sottoponendo allo stesso trattamento un pezzo di ferro dolce questo rimane nel primitivo stato neutrale, cioè agisce indifferentemente sul polo nord o sul polo sud di un magnete, attraendoli entrambi.

Vedremo in seguito come si possa far rientrare tutti questi fatti in unica interpretazione organica; per adesso contentiamoci di considerarli come semplici risultati dell'esperienza.

89. Legge di Coulomb. — Abbiamo detto che un magnete filiforme, immerso nella limatura, se ne ricopre quasi esclusivamente nelle estremità; potremo ritenere che in esso il magnetismo sia concentrato nelle estremità medesime o nei poli. Studiando le azioni mutue di due magneti simili, e tenendo conto delle forze attrattive e ripulsive dei quattro poli che si trovano così in presenza, il Coulomb dimostrò sperimentalmente la seguente legge:

La forza che si esercita tra due poli è inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza.

A parità di condizioni geometriche esistono poi *magneti forti*, e *magneti deboli*. Assumendo che la causa sia proporzionale all'effetto, noi ammetteremo che se un polo A è capace di esercitare, alla stessa distanza, una forza doppia o tripla di quella esercitata da un altro polo B, il primo contiene una *quantità doppia o tripla di magnetismo*. Come si fece in elettrostatica diremo poi che *un polo contiene l'unità di magnetismo se alla distanza di 1 cm. da un polo che ne contenga un'eguale quantità lo respinge con la forza di 1 dine*.

Come in elettrostatica avremo perciò che un polo avente m unità di magnetismo esercita su un altro polo che ne contiene m' unità, alla distanza di d centimetri, la forza

$$F = \frac{m m'}{d^2}$$

E se attribuiamo ai numeri m, m' il segno + o — secondo che si tratti di magnetismo nord, o di magnetismo sud, le forze attrattive saranno negative, e invece risulteranno affette dal segno + le forze di ripulsione.

Ammetteremo infine, come risultato dell'esperienza, che riunendo in unico polo diversi poli aventi *masse magnetiche* m', m'', m''' , ecc, il polo eserciterà delle forze corrispondenti alla massa

$$M = m' + m'' + m''' + \dots$$

ove le m vanno sommate *algebricamente*, cioè tenendo conto del loro segno + o —.

90. Campo magnetico. Linee di forza. — Essendo la legge delle azioni magnetiche identica a quella delle azioni elettriche, potremo ripetere qui tutto quanto fu esposto a suo luogo sul campo elettrostatico. Così l'intensità del campo in un punto sarà la forza cui è sottoposta l'unità di massa magnetica collocata in quel punto. Questa intensità può raggiungere valori elevatissimi, ricorrendo ai magneti di grandissima potenza che si possono oggi produrre. Così mentre l'aria non resiste a un campo elettrostatico poco superiore a un centinaio d'unità, poichè al di là una scintilla scocca tra i conduttori elettrizzati che lo producono, è stato possibile creare dei campi magnetici superiori a 45.000 unità.

Come si vide al § 77, rappresentando graficamente il campo con un numero limitato di linee di forza, dove queste son più fitte ivi il campo è più intenso. L'andamento delle linee di forza, quando è nota la distribuzione delle masse agenti, può essere dedotto col calcolo. Ma si può anche ottenerlo sperimentalmente con un'esperienza detta degli *spettri magnetici*. Basta disporre nel campo un

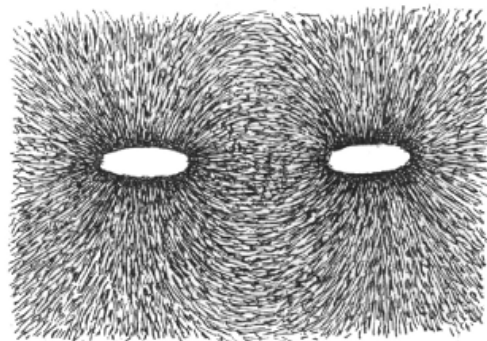


Fig. 113.

telaio che porta un foglio di carta disteso, lasciarvi cadere lievemente alquanto limatura, e dare al telaio delle piccole scosse con la punta del dito. Si vedranno allora i diversi granellini dispersi in

fila secondo linee che coincidono appunto, come si è potuto dimostrare, con le linee di forza. La fig. 113 dà uno di questi spettri, ottenuto disponendo il telaio sulle estremità polari di un magnete a ferro di cavallo, normalmente al piano del magnete medesimo.

91. **Induzione magnetica.** — Avvicinando il polo di un magnete a una sbarra di ferro dolce, questa si converte in un magnete temporaneo, di cui l'estremo più vicino è di nome opposto, e il più lontano dello stesso nome di quello del primo magnete. È questo il fenomeno *dell'induzione magnetica*, che noi possiamo verificare con l'esperienza della fig. 114. La sbarra verticale *ab* è disposta in presenza d'un ago girevole, ed esercita sul polo vicino di questo una debole attrazione. Ma se si avvicina alla sbarra, dal di sopra, il polo nord d'un magnete, si constaterà che la sbarra a *b* diviene anch'essa un magnete, avente in *b* il polo nord e in *a* il polo sud. L'azione esercitata sull'ago lo rivela nettamente. Nè si può attribuire il moto dell'ago all'azione diretta del polo B, poichè allontanando la sbarra *b* verticale si trova che quell'azione esiste in realtà, ma è molto debole rispetto all'effetto prima osservato.

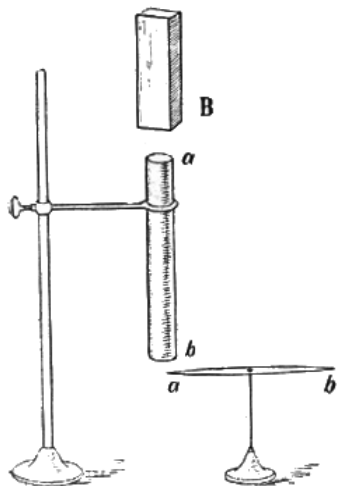


Fig. 114.

Del resto si può anche provare facilmente che la sbarra *ab*, quando il suo estremo superiore è in contatto con B, è capace di trattenere in *b* una piccola chiave, o di coprirsi di limatura, che vengono tosto abbandonate portando via il magnete inducente B. Questo prova che il ferro dolce diviene un magnete *temporaneo* finchè è in presenza di B, e torna allo stato neutro allontanando quest'ultimo. Quest'esperienza ci permette di dire che l'attrazione di un polo qualsiasi, nord o sud, su un pezzo di ferro dolce, è preceduta dall'induzione, per cui il ferro si converte in un magnete temporaneo che presenta un polo eteronimo al polo inducente; l'attrazione si manifesta quindi tra il magnetismo inducente e il magnetismo eteronimo indotto nelle parti più vicine del ferro.

A parte la temporaneità, nulla permette di differenziare un pezzo di ferro magnetizzato per induzione da una calamita propriamente detta. E così spezzando in due parti il ferro sottoposto all'induzione, se ne ottengono due magneti temporanei *completi*, cioè con due poli opposti agli estremi. Il lettore si guarderà bene perciò dal confondere l'induzione magnetica con l'influenza elettrostatica, nella quale spezzando in due il conduttore influenzato è possibile separare, e isolare su di essi, le due cariche opposte.

92. **Interpretazione dei fenomeni magnetici.** — Siamo adesso in grado di riunire i fatti finora osservati in un'unica interpretazione, che non vuole essere una spiegazione, ma solo un mezzo semplice di collegare tra loro i fatti medesimi, deducendoli da alcuni di essi e da qualche ipotesi opportunamente stabilita.

L'esperienza del § 88, n. 5, detta anche della *calamita spezzata*, ci dice intanto che la più piccola parte di un magnete è anch'essa un magnete cortissimo, coi due poli agli estremi. Noi estenderemo questa proprietà alle molecole dei magneti, riterremo cioè che ogni molecola di essi sia un magnetino completo, avente agli estremi quantità uguali ed opposte di magnetismo. In un pezzo d'acciaio non magnetizzato, o in un pezzo di ferro, i magneti molecolari esistono già; ma sono orientati disordinatamente, annullando così i loro effetti all'esterno. Sotto l'azione di un campo magnetico esterno i magneti *elementari* si orienterebbero nel senso del campo, con tutti i poli nord rivolti da una parte e i poli sud dall'altra. Questa orientazione sarebbe permanente nell'acciaio, temporanea nel ferro; e avrebbe per effetto di mettere in presenza, nelle parti medie del corpo, un polo sud di una molecola col polo nord della successiva, rimanendo liberi due poli opposti agli estremi di ogni fila. Ed è chiaro che le masse magnetiche opposte presenti nell'interno non avranno all'esterno alcuna azione, mentre questa si estrinsecherà solo agli estremi della sbarra, o meglio ove termina ogni fila di magneti elementari.

Al cessare del campo esterno le molecole resteranno allineate nell'acciaio temperato, malgrado le loro azioni mutue, in virtù di un'azione speciale che chiamasi *forza coercitiva*, mentre nel ferro dolce, ove questa forza è insufficiente, le molecole torneranno al primitivo disordine.

È notevole che queste proprietà si manifestino quasi esclusivamente nel ferro, e, in grado molto minore, in alcuni suoi composti, come la *magnetite* (Fe_3O_4), un minerale che talvolta si presenta naturalmente magnetizzato nei suoi giacimenti alla superficie terrestre. Anche il nichel e il cobalto presentano gli stessi fenomeni, ma in misura molto più attenuata che il ferro. E del resto sotto l'azione di campi magnetici molto intensi tutte le sostanze si mostrano sensibili, per quanto in grado debolissimo alle azioni magnetiche; ma nelle condizioni ordinarie simili azioni non riescono nemmeno percettibili per la loro piccolezza.

93. Permeabilità magnetica. Isteresi. — Le linee di forza d'un campo partono ciascuna da un punto carico di magnetismo nord e, dopo un certo decorso, vanno a finire in un punto carico di magnetismo sud. Esse formano un fascio di rette parallele in un campo uniforme, mentre negli altri casi si addensano ove il campo è più intenso. Il loro andamento può esser rivelato, nei casi in cui la previsione col calcolo non è agevole, per mezzo del telaietto e della limatura di ferro, che ci servono per la produzione degli spettri magnetici. Or se s'introduce in un campo uniforme un pezzo di ferro, e si esplora, dopo, l'andamento delle linee di forza, si trova che nelle vicinanze del ferro il campo non è più uniforme (fig. 115), ma le linee di forza manifestano una specie di tendenza a condensarsi nel ferro introdotto. Nel posto ove le linee di forza penetrano nel metallo si crea, per induzione, un polo sud; mentre si forma un polo nord ove le linee tornano ad uscire. È chiaro adunque che nelle vicinanze immediate della faccia d'entrata il campo sarà più intenso poichè le linee diventano più fitte; e perciò per ogni centimetro quadrato orientato normalmente alle linee ne penetrerà un numero maggiore che non quando il ferro non esisteva.

Si esprime questo fatto, che è una conseguenza del fenomeno dell'induzione magnetica, dicendo che il ferro ha una *permeabilità per le linee di forza* maggiore di quella dell'aria, come se le linee medesime perforassero con una certa difficoltà l'aria e preferissero seguire parte del loro cammino nel ferro, ove quell'ostacolo è minore, malgrado il loro totale decorso geometrico diventi così più lungo di prima.

Dando al corpo la forma di una sbarra cilindrica molto allungata, con l'asse nel senso del campo, il rapporto tra il numero di linee di

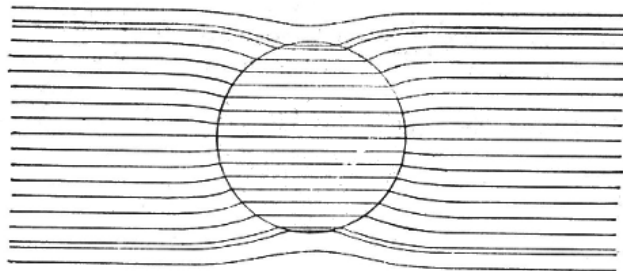


Fig. 115.

forza che penetra nel cilindro per una base, *induzione magnetica*, e quello che traverserebbe la stessa area senza il ferro, si assume come misura della *permeabilità magnetica* del ferro. Ma la esperienza ha dimostrato che quel rapporto per campi debolissimi aumenta al crescere del campo, acquista poi un valore massimo, e al di là di un certo valore del campo torna a diminuire, fino a che nei campi straordinariamente intensi la perturbazione prodotta dal ferro nelle linee di forza diviene poco sensibile; così in alcuni campioni di ferro quel tale rapporto, cioè la permeabilità, che per un campo di 1,66 unità ha il valore 5480, decresce fino a circa 2 in un campo di 20.000 unità.

A questo fenomeno ne fa riscontro un altro, connesso col primo, e detto *saturazione magnetica*. Il magnetismo sviluppato per induzione sulla base del cilindro cresce, nei campi deboli, rapidamente con l'aumentare l'intensità del campo; ma a un certo punto l'accrescimento si fa sempre più piccolo, come se la sbarra si avvicinasse a un valore massimo, non ulteriormente superabile di magnetizzazione.

Nella curva OA della fig. 116 sono riportate le induzioni (ordinate) acquistate da una sbarra di ferro in campi (ascisse) di intensità crescente; si riconosce subito che a un certo punto gli accrescimenti della induzione diventano poco sensibili, anche quando il campo aumenta molto d'intensità.

Se poi, raggiunto un certo valore del campo, si fa decrescere questo lentamente e si misurano le corrispondenti induzioni, ci si rivelerà un nuovo fenomeno detto *isteresi magnetica*; i nuovi valori sono alquanto più alti di quelli ottenuti con le stesse intensità del campo durante la salita; e anche quando il campo si sarà annullato, all'ascissa 0 corrisponderà ancora una induzione rilevante

(circa 10000) che sarà rapidamente annullata solo applicando un campo di direzione opposta a quella del primo, e rappresentato perciò sul diagramma con ascisse negative (—2).

Continuando ad aumentare il valore del campo, in senso opposto al primo, si raggiunge il vertice B del diagramma; e se poi si torna a far diminuire il campo, fino a zero, resta un'induzione eguale ed opposta a quella avuta nel primo caso.

Con una serie di valori del campo che si succedano regolarmente tra due limiti eguali, positivo e negativo (+17 e —17 nella figura), si ottengono i due rami del diagramma AB, di cui il più alto corrisponde alla serie +17, 0, —17 dei valori del campo.

Si noti però che col ferro dolce il campo opposto capace di smagnetizzare la sbarra (2 nel caso della figura) è fornito più che sufficientemente dal suo stesso magnetismo residuo, dopo la soppressione del campo esterno. È perciò che un pezzo di ferro dolce si smagnetizza completamente al cessare del campo esterno. Invece con l'acciaio il campo proprio del magnetismo residuo non basta più a provocare la smagnetizzazione, ed è perciò che si possono costruire solo in acciaio i magneti permanenti. Si noti ancora che l'acciaio raggiunge

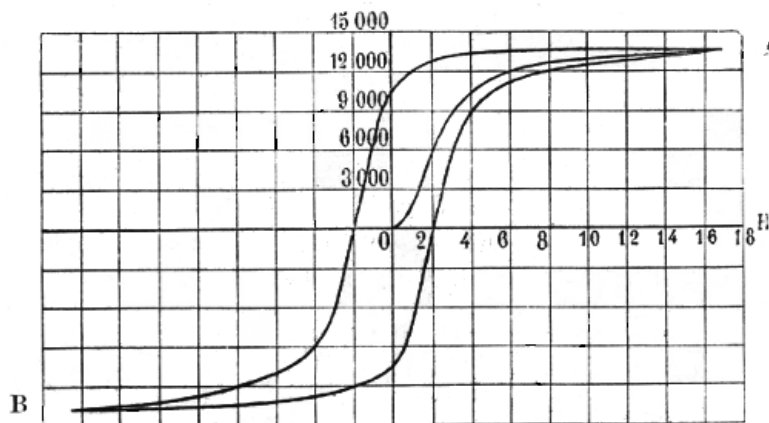


Fig. 116.

valori più bassi della magnetizzazione che non il ferro; e che per esso l'area compresa tra i due rami della curva, detta *area d'isteresi*, è maggiore. E siccome si dimostra che nella magnetizzazione e smagnetizzazione si perde dell'energia, che si converte in calore entro la sostanza, in proporzione dell'area medesima, e poichè questa perdita d'energia è grandemente nociva in tutti i casi in cui il materiale magnetico è sottoposto a campi d'intensità rapidamente variabile, come ha luogo in molti apparecchi di elettricità industriale, l'adozione del ferro dolce in simili casi s'impone.

94. Metodi per calamitare. — Risulta chiaro da quanto precede che per magnetizzare permanentemente un pezzo d'acciaio converrà disporlo in un intenso campo magnetico; l'esperienza ha anche suggerito, conformemente alla ipotesi dei magneti elementari orientabili, di sottoporre il pezzo a delle piccole scosse, che favoriscono la magnetizzazione. Portando via il corpo dal campo, in generale il suo magnetismo diminuisce un poco; e quel che resta come permanente dipende dalla qualità dell'acciaio impiegato. Così si è visto che la massima forza coercitiva è manifestata dall'acciaio al tungsteno, col qual si costruiscono appunto i magneti più intensi e più stabili.

In generale le scosse agenti sui magneti già fatti ne indeboliscono la potenza, come anche le variazioni di temperatura. Per attenuare l'effetto delle prime si muniscono i magneti permanenti della cosiddetta *armatura*, che è una sbarra di ferro in contatto con le estremità polari del magnete; essa, offrendo una facile via alle linee di forza, si magnetizza fortemente per induzione, e i poli creati, in contatto coi poli eteronimi del magnete, diminuiscono il campo proprio di quest'ultimo, che funziona per il magnete come *campo smagnetizzante*. Ma i potentissimi magneti sono temporanei, cioè a base di ferro; essi si ottengono con un metodo ben diverso, che noi esporremo più in là.

95. Magnetismo terrestre. — Abbiamo detto che un ago magnetico, mobile in un piano orizzontale, si orienta sensibilmente nella direzione nord-sud del luogo, cioè secondo il meridiano geografico.

Se l'ago è sospeso perfettamente pel suo centro di gravità esso subisce ancora un'altra azione: s'inclina rispetto al piano dell'orizzonte, formando con esso un certo angolo detto *inclinazione magnetica*. Nei paesi del nostro emisfero il polo nord si porta più in basso, e l'inclinazione, che cambia con la latitudine, varia, in Italia, da 52° a 64° circa.

Per rendere mobile l'ago in un piano orizzontale occorre adunque un piccolo peso in più nella parte sud dell'ago; ma se si osserva con esattezza la direzione che esso assume nel piano orizzontale, si trova che essa non coincide esattamente col meridiano astronomico, ma forma con questo un certo angolo, detto *declinazione magnetica*, anch'esso variabile da paese a paese. Come è noto i naviganti, fin dal tempo di Flavio Gioia, si servono appunto d'un ago magnetico mobile in presenza di una *rosa dei venti*, cioè della *bussola* (fig. 117), per potersi orientare nelle uniformi distese del mare.

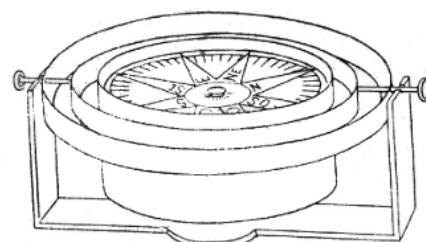


Fig. 117.

Occorre però l'esatta conoscenza della declinazione nelle diverse longitudini e latitudini per poter dedurre, dalla posizione dell'ago, la vera direzione del meridiano geografico. Sono state appunto tracciate le *carte magnetiche*, nelle quali alcune linee dette *isocline*, e *isogoniche*, rilegano i paesi cui spetta la medesima inclinazione o la medesima declinazione. Le prime hanno un andamento

prossimo a quello dei paralleli, le altre si avvicinano invece ai meridiani.

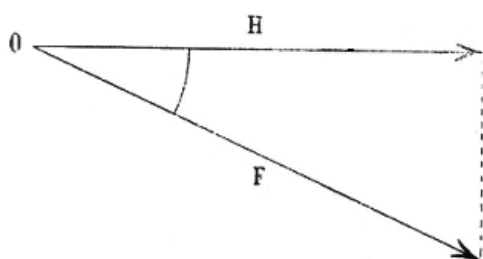


Fig. 118.

La Terra ha perciò un campo magnetico proprio che può ritenersi uniforme, poichè le sue linee di forza, che hanno la direzione della retta d'inclinazione, sono sensibilmente parallele in una estensione limitata. Se l'intensità del campo è F , e un ago ha alle sue estremità le masse magnetiche $+m$ e $-m$, i poli saranno sottoposti a due forze $+mF$ e $-mF$, che formano perciò una *coppia*

direttrice. Il suo momento è massimo quando l'ago è normale alla direzione del campo, e si annulla quando l'ago è in equilibrio nella direzione di quello. Quando poi l'ago è mobile in un piano orizzontale, del campo totale F agisce solo la *componente orizzontale* H (fig. 118), che forma con F un triangolo rettangolo nel quale HOF è l'angolo d'inclinazione.

Anche nel piano orizzontale l'ago è sottoposto a una coppia direttiva costituita dalle forze (fig. 119) $+mH$ e $-mH$; questa coppia ha un momento variabile al variare dell'angolo α formato dall'ago col campo H , e che si annulla solo nella posizione d'equilibrio, quando cioè l'ago è diretto parallelamente ad H .

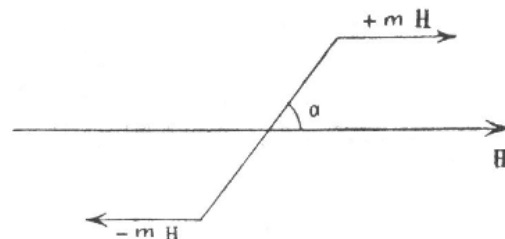


Fig. 119.

Anche il valore di H , cambia da paese a paese, oltre che la sua direzione, data ovunque dall'ago della bussola. Esso è nei nostri paesi poco superiore a 0,2, cioè è abbastanza piccola. La F è invece superiore a 0,4. Malgrado la piccolezza del campo terrestre esso è sufficiente per produrre una certa magnetizzazione sensibile su tutte le masse di ferro che si trovano alla superficie terrestre, le quali alla loro volta, col proprio magnetismo indotto, perturbano alquanto l'andamento del campo inducente.

LA CORRENTE ELETTRICA.

La corrente elettrica nei conduttori metallici.

96. **Generalità.** — Abbiamo detto al § 79 che, mantenendo agli estremi d'un filo conduttore una differenza di potenziale, l'elettricità fluisce in modo continuo dall'uno all'altro estremo, come l'acqua fluisce in una condotta ai cui estremi sia mantenuta una differenza di pressione. Questo

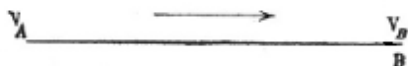


Fig. 120.

movimento continuo d'elettricità nel filo è la *corrente elettrica*; dal punto di vista energetico diciamo pure che nel filo si manifesta come calore il *lavoro di caduta* dell'elettricità dal potenziale V_A del primo estremo a quello V_B del secondo; così se

in un certo tempo passa da A a B (fig. 120) la quantità q d'elettricità, quel calore sviluppato corrisponderà al lavoro elettrico.

$$L = q(V_A - V_B) \quad (1)$$

È chiaro perciò che quest'energia, che *apparisce* nel filo, deve *sparire* in qualche altro posto. Or appunto per mantenere tra A e B una differenza di potenziale, e la corrente continua che ne è l'effetto, occorre un apparecchio, che noi chiameremo *generatore*, nel quale si sciupa, durante la produzione della corrente, o energia chimica, o energia termica, o energia meccanica. Noi potremo perciò dire che nel generatore queste tre forme d'energia si convertono in una forma nuova, l'*energia elettrica*, la quale si converte alla sua volta in calore nel filo traversato dalla corrente. La misura dell'energia elettrica trasformata, fondandoci sulla (1), è data dal prodotto della quantità d'elettricità messa in circolazione per la differenza di potenziale che la mette in movimento.

Ma la corrente elettrica può produrre anche altri effetti, che noi andremo studiando in dettaglio l'uno dopo l'altro; se ne può ricavare energia chimica per mezzo del *voltmetro* o del *forno elettrico*; energia meccanica per mezzo del *motore elettrico*; energia raggianti termoluminosa per mezzo delle *lampade elettriche*, e anche altre forme di energia, di cui dovremo occuparci in seguito, quali l'energia elettromagnetica delle onde hertziane che emanano, per es., dall'antenna di un trasmettitore Marconi.

Per questa qualità di servire comodamente come agente intermediario di trasformazione di una forma d'energia in un'altra, l'energia elettrica ha acquistato la sua attuale importanza industriale; e invero l'energia elettrica possiede due qualità che la rendono assolutamente preziosa, e che la fan somigliare, in certa guisa, al denaro negli scambi commerciali delle merci:

1^a Essa è facilmente trasportabile a grandi distanze, con non grave sacrificio, per mezzo delle *condutture metalliche*.

2^a Qualunque altra forma d'energia si converte in elettrica, e viceversa, con un *rendimento* abbastanza elevato. Cioè la trasformazione non è mai integrale, poichè una parte dell'energia primitiva si trasforma, in ogni caso, in calore industrialmente perduto; ma la frazione di energia convertita nella forma richiesta è abbastanza elevata quando c'è di mezzo l'energia elettrica. Così mentre la macchina a vapore converte in lavoro non più del 14 per cento dell'energia chimica contenuta nel carbone bruciato, le macchine *dinamo-elettriche* o i *motori elettrici* trasformano l'energia meccanica in energia elettrica, o viceversa, con un rendimento che supera il 92 per cento.

Per apprezzare i vantaggi apportati dall'energia elettrica nell'economia industriale si consideri uno dei casi ora tanto comuni di trasporto d'energia a distanza.

Una cascata d'acqua dissemina in inutile e insensibile riscaldamento della sua massa l'energia immensa accumulata per il fatto che il liquido si trova disponibile a una certa altezza.

Ebbene: si costringa l'acqua nel cadere a mettere in movimento un ruota a palette, o un apparecchio che ha lo stesso scopo, ma ne sfrutta meglio la caduta, con un rendimento dell'80 %: la turbina. Noi avremo così disponibile una certa potenza, di cui ci possiamo servire per mettere in moto una macchina dinamo-elettrica, la quale è appunto l'organo di trasformazione dell'energia meccanica in energia elettrica, poichè per il suo movimento, che costa un certo lavoro, è capace di destare una corrente elettrica. La corrente così ottenuta, guidata attraverso condutture metalliche, può, con perdite lievi di energia, trasportarsi a grandi distanze, e nel punto d'arrivo trasformarsi nuovamente in energia meccanica, nei motori; in energia chimica, nei crogiuoli degli stabilimenti di elettrochimica; in energia termica o luminosa nelle lampade elettriche. Certo per via si è perduto qualche cosa, e i lavori di installazione potranno anche costare somme ingentissime; ma si intende bene che il costo gratuito dell'energia prima, quella della caduta, può rendere non dannose le perdite, e compensare, entro certi limiti, le spese fatte.

Ciò è tanto più notevole in quanto con nessun altro mezzo pratico si sarebbe potuto trasformare il lavoro meccanico della caduta in energia luminosa o chimica.

97. **Intensità della corrente.** — Qualunque sia il mezzo di produzione della corrente elettrica, comunque cioè essa venga ottenuta o a spese d'energia chimica, come nelle *pile*

idroelettriche, o d'energia termica come nelle pile *termoelettriche*, o d'energia meccanica come nelle macchine *dinamo elettriche*, la corrente ottenuta non rivela per nulla, nei suoi effetti, la origine; e questi dipendono solo da un elemento importante: *la quantità d'elettricità che traversa una sezione del conduttore nell'unità di tempo*, e che si chiama **intensità della corrente**. Si dice appunto che la corrente ha l'intensità di un *ampère* quando attraverso il conduttore *fluisce un coulomb d'elettricità a ogni minuto secondo*.

Così l'intensità sarà di i ampère se passano attraverso a una sezione del conduttore i coulomb per secondo. È chiaro allora che in t secondi passerà lungo il filo un numero Q di coulomb dato da

$$Q = i t \quad (2)$$

98. La pila di Volta. — Ma prima di studiare in dettaglio gli effetti della corrente, dobbiamo far conoscenza almeno con uno dei metodi per la sua produzione.

Le macchine elettrostatiche, di cui abbiamo fatto uso nella prima parte dell'Elettrologia, permettono di ottenere differenze di potenziale elevatissime tra due conduttori *isolati*; ma appena tra questi s'interpone un filo conduttore, questo è traversato da una corrente intensa *di brevissima durata*, cioè da una *scarica elettrica*, e continuando a girare la macchina lungo il filo circola una corrente debolissima, e ai suoi estremi resta solo una piccolissima differenza di potenziale. Così con le più potenti macchine elettrostatiche, e interponendo tra i poli un filo metallico, non si riescono a ottenere correnti superiori a qualche millesimo d'ampère, e mentre tra due conduttori *isolati* la macchina può esser capace di stabilire una differenza di potenziale superiore a 50.000 volta, rilegandoli con un filo di rame di qualche metro di lunghezza e di qualche millimetro quadrato di sezione *la differenza di potenziale discende a qualche centomillesimo di volt*.

Fu merito del nostro Volta di aver creato, dopo una serie celebre di esperienze e di argomentazioni ingegnosiissime, la *pila* che porta il suo nome, e che fu il primo apparecchio capace di mantenere agli estremi d'un filo metallico differenze di potenziale molto più grandi, alle quali corrispondono nel filo, come vedremo, correnti più intense.

In un bicchiere contenente acqua acidulata con acido solforico sono immerse due lamine, una di rame e l'altra di zinco. Rilegando le due lamine con un filo conduttore, esso viene percorso da una corrente che è incomparabilmente più intensa di quella ottenibile con la più potente macchina elettrostatica conosciuta. L'origine dell'energia elettrica prodotta va ricercata nell'energia chimica di combinazione dello zinco con l'acido solforico: effettivamente mentre la pila funziona parte dello zinco si scioglie nel liquido, formando solfato di zinco; e l'energia sviluppata da questa reazione esotermica si converte parte in calore entro la pila, e per il resto in energia elettrica disponibile nel filo che rilega le lamine, ove essa si trasforma pure in calore, se non è impiegata ad altro ufficio per l'interposizione d'un *ricevitore* che la trasformi in altra specie d'energia.

La spiegazione d'un apparecchio così semplice e così meraviglioso come la pila, o meglio la ricerca del meccanismo con cui ha luogo la produzione di una differenza di potenziale ai suoi estremi, fu già elaborata dal Volta, ed ha formato oggetto di una secolare controversia tra i Fisici più illustri, i quali hanno portato in campo delle considerazioni troppo strettamente connesse con i molteplici effetti della corrente elettrica, da noi non ancora esposti, e perciò non riferibili in questo punto del nostro studio. Secondo il Volta, e molti altri eminentissimi elettricisti fino al celebre Lord Kelvin, la differenza di potenziale osservabile agli estremi di una pila, e che è all'incirca di 1 volta, si produrrebbe nel posto del contatto tra i due metalli diversi che la costituiscono; e precisamente al contatto, esterno alla pila, tra zinco e rame. Secondo altri, e oggi sono i più, la differenza di potenziale si determinerebbe invece alla superficie di contatto tra lo zinco e acqua acidulata, cioè nel posto ove si compie la reazione chimica esotermica tra il *metallo attaccato* e il *liquido eccitatore*.

Noi ci limiteremo, per il momento, a considerare la differenza di potenziale prodotta dalla pila di Volta, per cui il filo rilegato al rame è a un potenziale più alto di quello rilegato allo zinco, *come un fatto sperimentale*, e l'energia elettrica da essa sviluppata come l'equivalente dell'energia chimica consumata. Daremo poi, a suo tempo, un cenno dell'interpretazione più moderna del fenomeno della pila, che non è invero conforme alle idee del Volta. E quanto al fenomeno

fondamentale su cui il Volta fondò la spiegazione o meglio la previsione del suo apparecchio, il fenomeno cioè per cui anche nell'aria due metalli in contatto come lo zinco e il rame manifestano un'apparente differenza di potenziale, preferiamo rimandare il lettore ai trattati più estesi, poichè non è per nulla provato, e forse non è neanche vero, che quella differenza di potenziale sussista proprio tra le *masse* metalliche in contatto, e può esser benissimo che siano invece a potenziale diverso le atmosfere gassose che circondano i due metalli.

Per eliminare alcuni inconvenienti della pila di Volta sono stati ideati e costruiti moltissimi altri tipi di pile, dei quali i principali saranno da noi esaminati in un altro capitolo.

99. Effetti magnetici della corrente. — La corrente che traversa un filo conduttore crea intorno a sè un campo magnetico. Oersted scoperse questo importante fenomeno nel 1819, e la sua scoperta fu il punto di partenza dell'Elettromagnetismo e dell'Elettrodinamica, che acquistarono un meraviglioso sviluppo per opera specialmente del fisico-matematico francese Ampère.

Noi ricercheremo con l'esperienza gli effetti magnetici di una spira, di un filo rettilineo, e di un sistema di spire a elica.

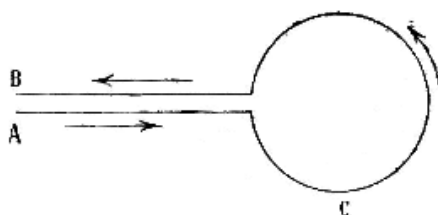


Fig. 121.

Per dimostrare l'azione reciproca tra una spira percorsa da corrente e un ago magnetico ci serviremo di un telaio come quello della fig. 121, costituito da un filo di rame circolare, o anche di altra forma, che fa capo a due fili molto vicini A, B; gli estremi di questi saranno rilegati a una sorgente capace di produrre tra A e B una differenza di potenziale, e di far circolare perciò una corrente nel filo, la quale avrà il senso delle frecce se il potenziale di A è più alto di quello di B.

Constateremo allora sperimentalmente che il circuito C agisce sopra un ago magnetico mobile deviandolo dalla sua posizione normale, come se esso risultasse dalla riunione di tanti magnetini piccolissimi, uniformemente distribuiti nella parte del piano limitata dal filo, e disposti perpendicolarmente a quel piano, con tutti i poli nord in una faccia e i sud nell'altra. E troveremo che la faccia nord di questa specie di *lamina magnetizzata*, cui equivale il circuito, è quella per la quale la corrente si vede circolare nel senso inverso degli indici d'un orologio, e che perciò il circuito della fig. 121 avrà nella faccia anteriore la sua faccia nord. Un polo nord collocato dietro il foglio sarà attratto dalla faccia posteriore, e quando passa avanti il foglio, sarà respinto dall'anteriore; l'opposto avverrà per un polo sud; cosicchè disponendo come nella fig. 122 un ago magnetico nell'interno della spira, giacente nel piano di esso, i due poli saranno sottoposti a due forze opposte che devieranno l'ago, spingendo il polo nord in avanti e il polo sud dietro il piano della spira.

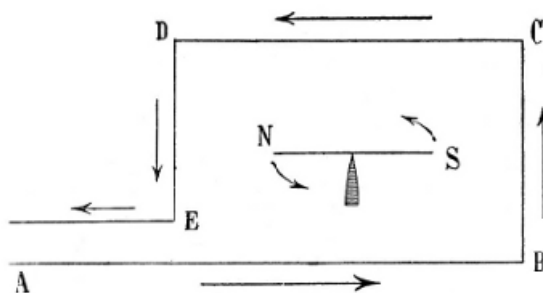


Fig. 122.

Perchè la corrente circoli nel senso segnato basta rilegare A col rame ed E con lo zinco di una pila di Volta. E se noi, come nella fig. 123, rendiamo galleggiante, fissandolo su un pezzo di sughero, il sistema costituito dalle lamine, immerse nell'acqua acidulata, e dal filo che le unisce, potremo constatare l'azione reciproca della calamita sul circuito; e vedere così che avvicinando un forte polo nord alla faccia anteriore, che è la faccia nord della spira, questa viene respinta, e il galleggiante si porta indietro.

Si è potuto poi dimostrare che la spira percorsa dalla corrente crea un campo le cui linee di forza escono da una faccia, (la faccia nord) avvolgono esternamente il contorno, e rientrano per la faccia sud, formando delle linee chiuse continue (fig. 124).

Anche un filo indefinito rettilineo, percorso dalla corrente, produce un campo, di cui la forma può ottenersi con l'esperienza degli

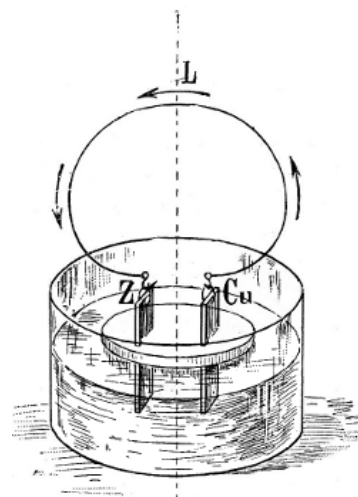


Fig. 123.

spettri magnetici. Si trova così (fig. 125) che le linee di forza son tanti cerchi concentrici normali al filo percorso dalla corrente, e col centro sul filo medesimo. Un piccolo ago magnetico tenderà perciò a disporsi secondo la tangente al cerchio che passa pel suo centro; e un insieme di aghi molto piccoli si disporrebbe come nelle due fig. 126, secondo che la corrente, perpendicolare al foglio, è diretta in su o in giù.

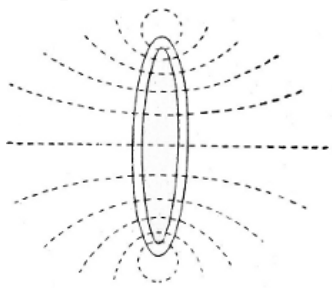


Fig. 124.

L'ago si dirige sempre in modo che la linea di forza entri per il polo sud ed esca per il nord; per conoscere il senso della linea di forza circolare, cioè il senso in cui tenderebbe a muoversi lungo di essa un polo nord, vale la regola detta del *cavaturaccioli*; il senso in cui il polo nord tende a muoversi è quello in cui deve rotare un cavaturaccioli perchè il suo asse si sposti nel senso della corrente. Questa regola si può facilmente controllare sulla fig. 126.

Ma il caso praticamente più importante è quello di un circuito elicoidale, come quello della fig. 127, circuito che prende il nome di solenoide. In esso le spire possono essere più o meno fitte, e possono sovrapporsi anche in più strati, ricorrendo a filo metallico rivestito di sostanze isolanti, come la seta o il cotone, per obbligare la corrente a traversare successivamente tutte le spire. Gli si dà anche il nome di *bobina* o *rocchetto*.

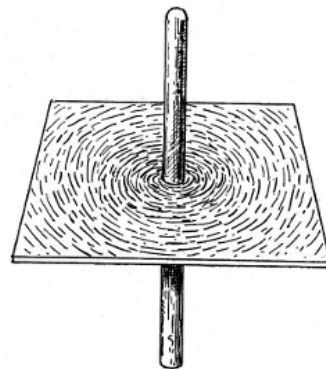


Fig. 125.

Si può dedurre teoricamente, e noi lo dimostreremo con la esperienza, che il campo prodotto da un solenoide equivale *esternamente* a quello di un magnete cilindrico avente sulle basi estreme le sue facce polari,

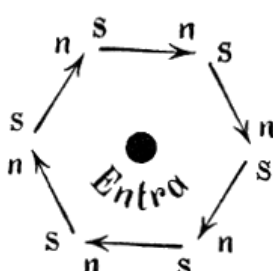
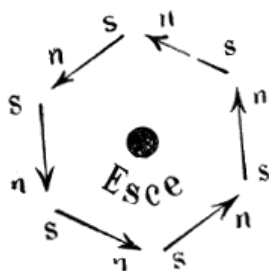


Fig. 126.

e precisamente la faccia nord nell'estremo a sinistra della figura, da quella parte cioè ove le spire presentano le facce nord, perchè la corrente si vede circolare in senso inverso agl'indici d'un orologio.

Le linee di forza che hanno all'esterno l'andamento noto, partono tutte dalla faccia A, rientrano dopo il loro percorso esterno per la faccia B; e *dentro il solenoide, da B in A, proseguono in forma rettilinea, e parallele tra loro, costituendo perciò un campo uniforme.*

La forma del campo all'interno si può esplorare con l'artificio degli spettri magnetici. Quanto all'azione esterna, equivalente a quella di un magnete cilindrico avente in A la faccia nord e in B la faccia sud, noi possiamo constatarla avvicinando il solenoide percorso dalla corrente a un ago magnetico.

E se, con particolari artifici, si rende mobile il solenoide, si può dimostrare che le azioni, come sempre, sono reciproche; e che inoltre anche due solenoidi agiscono tra di loro, come due veri magneti.

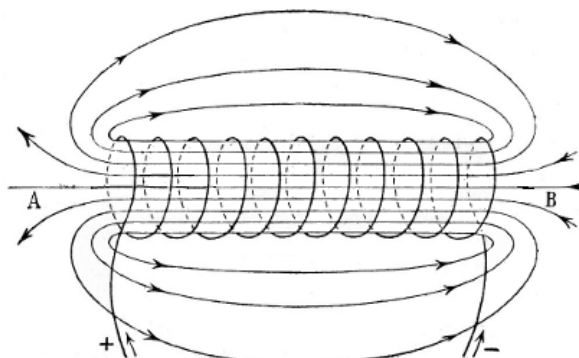


Fig. 127.

100. **Galvanometri.** — Disponendo nell'interno di un *rocchetto*, più o meno lungo, un ago magnetico, e orientando le spire nel piano del meridiano magnetico, al passaggio di una corrente nelle spire si manifesterà, per quanto si è detto, un campo che tende a disporre l'ago normalmente al piano delle spire. L'ago si trova allora sottoposto all'azione direttrice, nel senso primitivo, del campo terrestre, e all'azione deviatrice della corrente; e assumerà perciò una posizione intermedia

tanto più lontana dalla posizione del meridiano quanto più energica è l'azione deviatrice dovuta alla corrente.

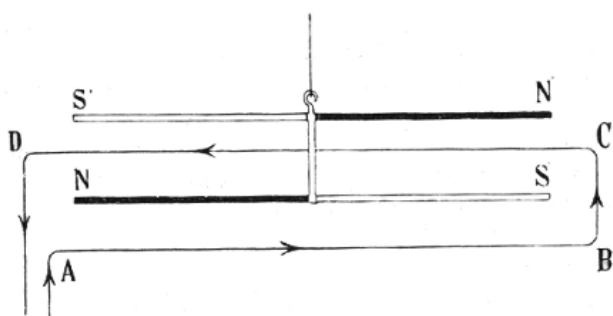


Fig. 128.

deviazioni da esso subite, finchè non sono troppo grandi, siano sensibilmente proporzionali all'intensità della corrente. Ne vennero così i *galvanometri*, cioè gli strumenti che misurano l'intensità della corrente dai suoi effetti magnetici.

Per rendere molto *sensibili* i galvanometri, per ottenere cioè che a una corrente anche molto debole corrisponda una deviazione facilmente percepibile e misurabile, si deve:

1° aumentare la forza deviatrice dovuta alla corrente, e quindi accrescere il numero delle spire agenti sull'ago.

2° diminuire la forza direttrice della Terra sull'ago, che si oppone alla deviazione. Si raggiunge questo scopo con due artifici: quello del Nobili, consistente nel sostituire a un ago un sistema *astatico*, cioè un sistema di due aghi paralleli ed opposti, come nella fig. 128; sospeso a un filo di bozzolo, e facendo in modo che il telaio ABCD percorso dalla corrente abbia nel suo interno uno solo degli aghi, mentre l'altro che risente dal telaio un'azione inversa, ma debolissima, ha l'ufficio di attenuare quasi del tutto la forza direttrice del campo terrestre; ovvero si può, come nel galvanometro Thomson (fig. 129) ricorrere a due fascetti di aghi opposti M, M', che costituiscono ancora un sistema astatico, e far agire separatamente su M e M' due coppie di rocchetti, percorsi dalla stessa corrente in tal senso che le forze deviatrici siano concordanti. Una calamita CC', opportunamente disposta e che agisce diversamente sui due aghi, per la diversa distanza, permette di attenuare ancora più la forza direttrice del campo terrestre.

3° rendere facilmente osservabili le deviazioni, anche piccole dell'ago o del sistema astatico. A tal fine si attacca *all'equipaggio mobile* portante gli aghi uno specchietto S sul quale s'invia un fascio di luce che viene dallo specchio riflesso su una scala graduata. La più piccola deviazione determina allora una rotazione dello specchio, e quindi una rotazione *doppia* del fascio riflesso, che si potrà comodamente osservare sulla scala disposta a conveniente distanza.

Con questi, e altri perfezionamenti su cui non possiamo insistere, si riesce oggi a percepire e a misurare della corrente la cui intensità è appena di qualche *trilionesimo* d'ampère.

Ma questi galvanometri, e anche quelli di sensibilità minore, sono d'impiego molto delicato: e funzionano poco regolarmente se nelle vicinanze esistono condutture percorse da correnti forti non costanti, o masse magnetiche in moto, agenti perciò in modo variabile sul sensibilissimo equipaggio magnetico dell'apparecchio.

Sono invece molto più comodi i galvanometri detti a *bobina* o *rocchetto mobile*, nei quali s'utilizza l'azione di un campo fisso molto intenso, creato da calamite permanenti, su un piccolo

Or si è potuto dimostrare con le più delicate esperienze che per un circuito di forma qualsiasi l'intensità del campo da esso prodotto in ogni punto dello spazio è rigorosamente proporzionale alla intensità della corrente che traversa il circuito.

In base a questa legge si può dedurre, dalla deviazione che l'ago subisce, l'intensità della corrente che traversa il circuito. E dando a questo una forma conveniente, e all'ago dimensioni opportune, si è potuto ottenere che le

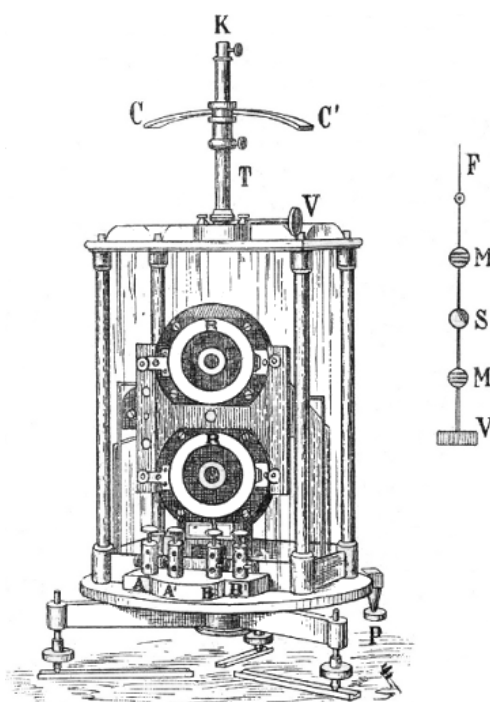


Fig. 129.

telaio mobile, a molte spire, percorso dalla corrente che si vuol misurare. Come abbiamo detto questo telaio equivale, quando è percorso dalla corrente, a un sistema di lamine magnetizzate, che tenderanno a disporsi normalmente al campo esterno. Così nel galvanometro Deprez e D'Arsonval (fig. 130) il telaio centrale, disposto nelle condizioni di riposo con le spire nel piano del magnete laterale, tende a ruotare di 90° quando è percorso dalla corrente, ma vi si oppone l'elasticità di torsione del filo di sospensione; e si può ottenere che la deviazione sia esattamente proporzionale all'intensità della corrente. Uno specchietto fissato al telaio agevola la misura delle deviazioni.

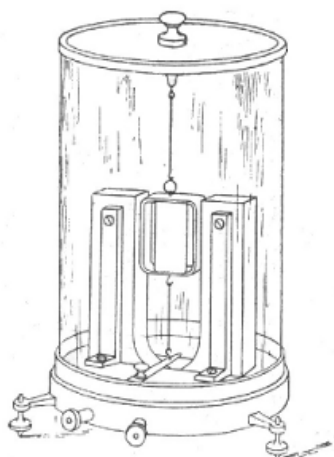


Fig. 130.

Tutti questi apparecchi sono inadatti alla misura di correnti forti, che anzi li danneggerebbero fortemente. Vedremo in un altro capitolo quali speciali apparecchi vengono in questo caso impiegati.

101. Elettro calamite. — Il campo magnetico creato dalle correnti, e specialmente quello uniforme esistente all'interno d'un solenoide o d'un rocchetto, fornisce il mezzo più comodo per ottenere

delle potentissime calamite temporanee. Basta invero introdurre nell'interno del rocchetto un nucleo di ferro dolce che, trovandosi in un campo, si magnetizzerà fortemente quando la corrente gli gira intorno lungo il filo del rocchetto. La magnetizzazione ha luogo nel senso delle linee di forza *interne* al rocchetto (fig. 126) e quindi l'elettrocalamita ottenuta avrà il suo polo nord all'estremo in cui esisteva il polo nord del solenoide, cioè a quell'estremo guardando il quale la corrente sembra che giri nel senso inverso degli indici dell'orologio (fig. 131).



Fig. 131.

Si possono dare all'elettro-calamite le forme più svariate; citeremo quella rettilinea (fig. 132), o quella a ferro di cavallo (fig. 133) nella quale i due rocchetti M e N sono avvolti in modo da creare due poli opposti in A e B. Se ne costruiscono oggi di grandissima potenza; con esse è stato possibile di creare, in un piccolo spazio d'aria interposto tra i poli, un campo di 45000 unità. In campi così intensi si è potuto appunto dimostrare che tutte le specie di materia sono, in certa misura, magnetiche; signaleremo le proprietà del bismuto e di altre sostanze, dette *diamagnetiche*, che all'opposto del ferro dolce vengono respinte tanto da un polo nord che da un polo sud.

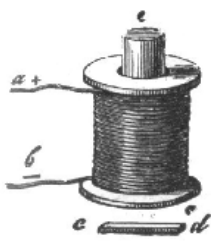


Fig. 132.

Con questi campi intensissimi sono stati ottenuti i cosiddetti fenomeni *magnetoottici*, che rivelano una connessione di grande portata tra l'ottica e l'elettromagnetismo; menzioneremo la *polarizzazione rotatoria magnetica* di Faraday, per cui una sostanza trasparente qualunque, sotto l'azione d'un campo intenso, fa girare il piano di polarizzazione della luce, che l'attraversa nel senso delle linee di forza, come fanno il quarzo, le soluzioni di zucchero ecc; e il *fenomeno di Zeeman*, per cui le righe spettrali di emissione dei gas e dei vapori incandescenti subiscono, nel campo, delle importantissime modificazioni, che hanno permesso di chiarire la questione della origine dell'emissione luminosa dal punto di vista della *teoria degli elettroni*, di cui daremo un cenno più in là.

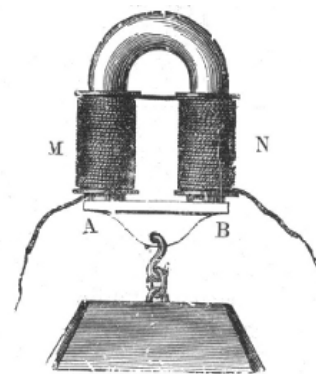


Fig. 133.

102. Resistenza elettrica. — Abbiamo detto che la causa del moto dell'elettricità lungo un filo è la differenza di potenziale, così come la causa del moto di un liquido in un tubo è la differenza di pressione esistente ai suoi estremi. Or come tubi di diversa sezione e lunghezza, sottoposti alla stessa differenza di pressione, danno luogo a diverse erogazioni di liquido, così conduttori di diversa sezione e lunghezza, o anche, a pari dimensioni, di diversa natura, danno luogo a intensità di correnti diverse.

Attribuendo il minore o maggiore flusso di elettricità a una difficoltà nella sua circolazione, o, come noi diremo, a una *resistenza* offerta dal filo al passaggio della corrente, noi potremo misurare questa resistenza dalla differenza di potenziale occorrente ai suoi estremi perchè nel filo passi l'unità di corrente. Diremo perciò che *un filo ha la resistenza di 1 ohm se per produrre in esso la corrente di 1 ampere occorre ai suoi estremi la differenza di potenziale d'un volta*; tale resistenza è posseduta da un filetto di mercurio della sezione di 1 mmq. e della lunghezza di cm. 106,2.

Per ciò che riguarda le dimensioni l'esperienza ha dimostrato che *la resistenza, definita come sopra, è proporzionale alla lunghezza del filo e inversamente proporzionale alla sua sezione*. Cosicchè indicando con K la resistenza di un filo avente 1 metro di lunghezza e 1 mmq. di sezione, la resistenza di un altro filo lungo l metri, e con la sezione di s mmq. sarà

$$r = K \frac{l}{s}$$

A pari dimensioni, conduttori di diversa natura presentano resistenza diversa; piccola i metalli, grandissima quei corpi che chiamammo cattivi conduttori, i quali del resto non son mai perfettamente isolanti. Anche tra i metalli si hanno differenze notevolissime, e perciò il valore K, che suol anche chiamarsi *resistenza specifica*, è diverso per i vari metalli, come è mostrato dal seguente specchietto, che dà appunto i valori di K; cioè la resistenza, in ohm, di vari fili di 1 m. di lunghezza e 1 mmq. di sezione:

<i>Argento</i>	<i>0,016</i>	<i>Nichel</i>	<i>0,13</i>
<i>Rame</i>	<i>0,017</i>	<i>Stagno</i>	<i>0,14</i>
<i>Alluminio</i>	<i>0,03</i>	<i>Piombo</i>	<i>0,21</i>
<i>Zinco</i>	<i>0,06</i>	<i>Argentana</i>	<i>0,30</i>
<i>Ferro</i>	<i>0,10</i>		

Si noti che questa successione dei metalli, disposti in ordine di resistenza crescente, o di *conducibilità* elettrica decrescente, è la stessa di quella secondo cui essi si seguono nella serie decrescente della conducibilità per il calore. Anzi si è potuto dimostrare che la conducibilità elettrica (che è il numero inverso della resistenza specifica) divisa per la conducibilità termica dà un rapporto sensibilmente lo stesso per tutti i metalli.

La resistenza elettrica risente in modo notevolissimo l'influenza delle impurezze e dell'assetto molecolare del metallo, essa inoltre aumenta per tutti i metalli con la temperatura, all'incirca del 4 per mille per ogni grado di riscaldamento; la variazione è molto minore in alcune leghe, e può considerarsi come trascurabile nella *manganima* (lega di rame, manganese e nichel) che si adopera appunto per costruire le resistenze campioni.

La misura della resistenza d'un conduttore può effettuarsi, con grandissima esattezza, per mezzo di una speciale combinazione di circuiti elettrici e d'un galvanometro molto sensibile. E poichè la resistenza del conduttore cambia con la temperatura, si possono valutare piccolissime variazioni di temperatura in un filo dalla sua variazione di resistenza elettrica. Funziona appunto così il *bolometro*, costituito da un filo o da una spirale piatta, ordinariamente di platino affumicato, che esposto alle radiazioni termoluminose, e assorbendole, misura, con la variazione di resistenza, l'energia che esse trasportano.

Fa eccezione al comportamento dei conduttori metallici il carbone dei filamenti delle lampade a incandescenza, la cui resistenza diminuisce alquanto con la temperatura, cosicchè la resistenza del filamento, alle altissime temperature cui vien portato nel suo impiego per l'illuminazione, è molto minore che a freddo.

103. **Legge di Ohm.** — Abbiamo visto che un filo conduttore ha la resistenza di r ohm quando occorrono r volta ai suoi estremi perchè circoli nel filo la corrente d'un ampère. La legge di Ohm permette di prevedere come varia la corrente che traversa *un dato conduttore* modificando la differenza di potenziale, o, come si suol anche dire, *la tensione* ai suoi estremi.

Essa è molto semplice: *La differenza di potenziale agli estremi d'un conduttore, misurata in volt, è eguale di prodotto della sua resistenza misurata in ohm, per l'intensità della corrente che lo traversa misurata in ampere.*

Si ha perciò, detta E la differenza di potenziale, R la resistenza del filo e I l'intensità della corrente:

$$E_{\text{volta}} = R_{\text{ohm}} \times I_{\text{ampere}}$$

da cui si vede che, per un conduttore di data resistenza, raddoppiando o triplicando la differenza di potenziale agli estremi si raddoppia o si triplica la corrente che lo attraversa.

La legge di Ohm si suol anche mettere sotto la forma equivalente:

$$I_{\text{ampere}} = \frac{E_{\text{volta}}}{R_{\text{ohm}}}$$

che si può facilmente tradurre in parole.

Così se agli estremi d'un filo di 10 ohm esiste la differenza di potenziale di 150 volt, passerà nel filo la corrente di 15 ampere.

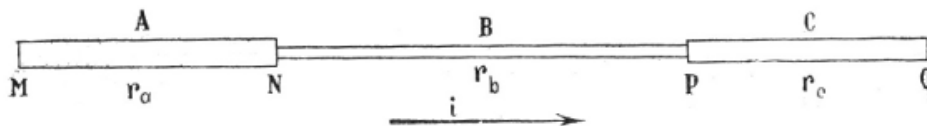


Fig. 134.

La legge medesima può essere applicata ai diversi tratti successivi d'un unico circuito, traversato dalla stessa corrente. Disponiamo, per esempio, diversi conduttori A, B, C l'uno dopo l'altro, (fig. 134) e siano le loro resistenze r_a, r_b, r_c ; indicando con i l'intensità della corrente, costante lungo tutto il circuito, e con V_M, V_N, V_P, V_Q i potenziali nei punti M, N, P, Q, avremo

$$V_M - V_N = r_a i$$

$$V_N - V_P = r_b i$$

$$V_P - V_Q = r_c i$$

le quali ci dicono che agli estremi di ciascun conduttore ha luogo una *caduta di potenziale*, data da queste differenze, e proporzionale alla resistenza del conduttore e al valore comune dell'intensità; l'abbassamento $V_M - V_N$ del potenziale da M in N suole anche chiamarsi *perdita ohmica di tensione* lungo il conduttore MN. Essa aumenta al crescere della sua resistenza e dell'intensità della corrente. Se poi il conduttore fosse omogeneo, e delle stesse dimensioni da M in Q, la totale *caduta* di potenziale $V_M - V_Q$ si compirebbe *uniformemente* lungo il conduttore, cioè il potenziale decrescerebbe d'una quantità costante per lo spostamento costante d'un centimetro lungo il conduttore.

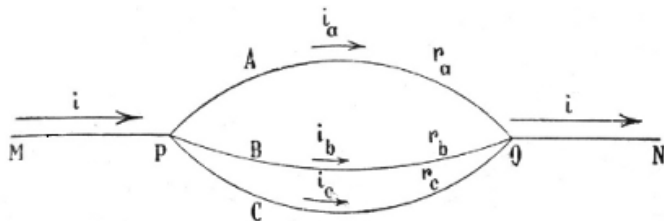


Fig. 135.

I conduttori A, B, C della figura precedente si dicono disposti in *serie*; in questo caso *la stessa corrente* li traversa l'uno dopo l'altro, e son diverse, in generale, le cadute di tensione in ciascuno.

Si considerino invece i tre conduttori A, B, C della fig. 135, che si dicono *derivati* tra P e Q. In questo caso i tre conduttori son sottoposti alla *stessa* differenza di potenziale $V_P - V_Q = E$; e saranno percorsi da intensità diverse i_a, i_b, i_c se le loro resistenze r_a, r_b, r_c sono pure diverse. Si ha invero, applicando a ciascuno la legge di Ohm:

$$i_a = \frac{E}{r_a} \quad i_b = \frac{E}{r_b} \quad i_c = \frac{E}{r_c}$$

cioè le intensità sono *inversamente* proporzionali alle resistenze dei vari rami.

La corrente giunge in P da un filo MP, nel quale *la sua intensità i è la somma delle tre intensità i_a, i_b, i_c* che si ricongiungono poi in QN in un'unica corrente della stessa intensità *i*. Sono queste le leggi dei circuiti derivati che si son sempre trovate verificate con l'esperienza.

Esse furono enunciate da Kirchoff, sotto una forma più complicata, che abbraccia tutti i casi di derivazioni possibili, e di fili che s'intrecciano in tutti i modi, contenendo nei singoli rami le più diverse resistenze e i più vari generatori o ricevitori elettrici.

104. Calore svolto dalla corrente. — Sappiamo che il riscaldamento d'un filo, percorso da una corrente per la quale la quantità d'elettricità *q* passa dal potenziale V_A di un estremo a quello V_B dell'altro, corrisponde al lavoro meccanico:

$$L = q (V_A - V_B) \quad (1)$$

Indichiamo con *E* la differenza $V_A - V_B$, e ricordiamo che se la corrente ha l'intensità *i*, e passa durante un tempo *t*,

$$q = i t$$

Sarà perciò

$$L = E i t \quad (2)$$

o anche, poichè per la legge di Ohm

$$E = i r$$

sarà

$$L = i^2 r t \quad (3)$$

Nelle due formole (2), (3) misurando *i* in ampere, *E* in volta, *t* in secondi ed *r* in ohm, il lavoro viene misurato in joule; e poichè a ogni 4,19 joule corrisponde 1 piccola caloria, il calore totale svolto sarà

$$Q = \frac{L}{4,19} = 0,24 L$$

Si avrà perciò definitivamente

$$Q = 0,24 E i t$$

$$Q = 0,24 i^2 r t$$

di queste l'ultima fu verificata da Joule con l'esperienza, la quale confermò le leggi che essa contiene :

Il calore svolto in un determinato conduttore è proporzionale al quadrato dell'intensità, alla resistenza del conduttore, e al tempo che dura il passaggio della corrente.

Se ci riferiamo al lavoro meccanico consumato in un minuto secondo, la formola (2) ci dà

$$L_{\text{joule per secondo}} = E_{\text{volta}} \times i_{\text{ampere}}$$

o anche

$$L_{watt} = E_{volta} \times i_{ampere}$$

Così una lampada a incandescenza da 16 candele consuma all'incirca 50 watt; se essa è fabbricata per usarsi alla tensione di 150 volt, l'ultima formola ci permette di calcolare la intensità della corrente che l'attraverserà :

$$50 = 150 \times i$$

da cui

$$i = \frac{1}{3} \text{ di ampere}$$

Il calore in essa svolto a ogni secondo sarà

$$Q = 0,24 L = 0,24 \times 50 = 12 \text{ calorie per secondo.}$$

Il lavoro totale assorbito in un'ora sarà 50 wattora, eguale a 50×3600 joule; ma l'unità wattora è più usata in simili casi.

105. **Correnti termoelettriche.** — Seebeck scoperse nel 1821 che formando un circuito chiuso con due metalli *diversi* A, B (fig. 136), saldati fra loro nei punti P e Q, una corrente circola nel sistema appena tra le due saldature P e Q esista una differenza di temperatura. La corrente ottenuta dipende dalla *forza elettromotrice termoelettrica*, e dalla resistenza totale del circuito, secondo la legge di Ohm.

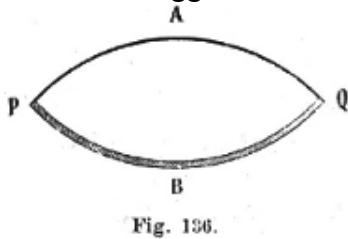


Fig. 136.

Quanto alla forza elettromotrice essa dipende dalla natura dei metalli in contatto e dalla differenza di temperatura delle saldature. Ma è, in generale, molto debole; così con bismuto e antimonio, finché le temperature dei contatti son comprese tra 0° e 100° , la f. e. m. è sensibilmente proporzionale alla *differenza* delle due temperature, in ragione di 50 milionesimi di volta per ogni grado di differenza; ed è solo di 8 milionesimi di volta per grado nella coppia ferro-rame. Pur

trattandosi di forze elettromotrici così piccole, esse danno luogo a correnti che un galvanometro, intercalato nel circuito, può con gran facilità misurare, specialmente ricorrendo a una successione di contatti tra due metalli *a*, *b*, (fig. 137) disposti a zig-zag, in modo che si possano facilmente riscaldante connessioni di posto dispari (come 1, 3, 5, 7) o quelle di posto pari (2, 4, 6, 8): agli estremi eguali *a* della serie si otterrà una forza elettromotrice quadrupla (nel caso della figura) di quella dovuta a una coppia sola, poichè, com'è facile riconoscere, le forze e. m. dovute alle singole coppie si sommano in virtù dell'artificio di riscaldare le sole saldature dispari, o le sole pari.

Riunendo appunto delle bacchette di bismuto e antimonio, Melloni ottenne la sua celebre *pila termoelettrica*, che associata al galvanometro del Nobili costituì un ricevitore sensibilissimo di energia raggiante termoluminosa. La *pila termoelettrica* e il *bolometro*

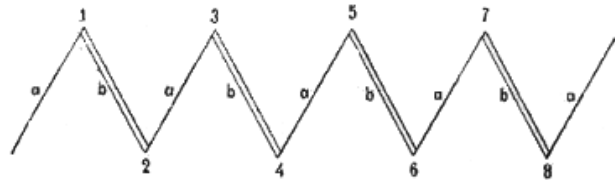


Fig. 137.

La *pila termoelettrica* e il *bolometro* rivaleggiano ancora nel loro potere di mettere in evidenza le minime variazioni di temperatura dovute all'irraggiamento. Ma i modelli primitivi, rispettivamente del Melloni e del Langley, hanno subito notevoli perfezionamenti, e la sensibilità è stata ancora accresciuta per l'impiego dei galvanometri molto sensibili che si costruiscono adesso; sono da segnalare gl'importanti risultati ottenuti da Rubens, Paschen, Lummer ecc.

Ricorderemo ancora la pila di Le-Chatelier, composta di due fili di platino e di platino-iridiato, che è lo strumento più comodo per misurare le alte temperature dei forni.

La f. e. m. termoelettrica non è rigorosamente proporzionale alla differenza di temperatura tra i contatti; così, nella fig. 136, tenendo costante la temperatura di P e aumentando progressivamente quella di Q, la f. e. m. ottenuta aumenta in principio, raggiunge un valore massimo per un valore della temperatura di Q detto *punto neutro* della coppia, poi comincia a diminuire, fino a che si annulla a un'altra temperatura, detta *punto d'inversione*, al di là del quale cambia di senso. Si noti però che il punto neutro *non* dipende dalla temperatura dell'altro contatto P, mentre il punto d'inversione ne dipende notevolmente, ed è tanto lontano dal punto neutro, quanto questo è lontano dalla temperatura arbitraria di P. Così per la coppia ferro-rame il punto neutro è 275°; perciò se P è a 0°, la corrente s'invertirà quando Q raggiunge la temperatura di 550°, mentre se P è a 250° l'inversione avverrà appena Q è a 300°.

106. **Effetto Peltier.** — Nel circuito della fig. 136, formato da due metalli diversi A, B, i due contatti P e Q siano a temperatura diversa t e T ; e sia E la forza e. m. totale a cui è dovuta nel circuito la corrente termoelettrica i . Modificando le temperature t e T si modifica E ; supponiamo per fissare le idee, che E aumenti quando aumenta T e diminuisca quando aumenta t . Ha luogo allora un fenomeno detto di *Peltier*, per il quale il passaggio d'una corrente di qualunque origine nel senso di i sviluppa calore nella saldatura P e assorbe calore nella saldatura Q; invece facendo circolare una corrente inversa ad i , viene svolto calore in Q e assorbito in P.

Nel caso semplice in cui le temperature t e T siano al di sotto della temperatura neutra, e nel sistema circoli la sola corrente termoelettrica dovuta alla differenza delle temperature nei contatti ($T > t$), *in Q ha luogo una continua distruzione di calore, e in P una continua produzione di calore*: ma il calore distrutto in Q è maggiore del calore sviluppato in P, e *la differenza dà il calore svolto dalla corrente in tutto il circuito.*

Il fenomeno Peltier, che può essere constatato solo con metodi molto delicati, è di grande importanza teorica; esso ci rivela l'origine dell'energia elettrica resa disponibile nei fenomeni termoelettrici. Così nell'ultimo caso esaminato, del calore viene sottratto a Q, ceduto in parte a P, e per il resto trasformato in energia elettrica disponibile nel circuito. Abbiamo perciò trasformazione di calore in energia elettrica, ed è anche rispettato il secondo principio della Termodinamica, poichè il calore *solo in parte* si converte in energia elettrica e il resto passa da una sorgente a temperatura più alta (quella in contatto con Q) a una di temperatura più bassa (quella in contatto con P).

La corrente negli elettroliti.

107. **Fenomeno dell'elettrolisi.** — Mentre l'acqua chimicamente pura è poco o niente conduttrice dell'elettricità, la corrente passa con una certa facilità nelle soluzioni acquose degli acidi binari o ternari, degl'idrati o delle basi, e dei sali.

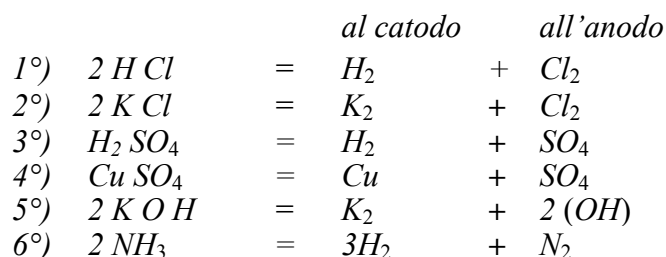
Una di queste soluzioni può essere sottoposta al passaggio della corrente per mezzo del *voltmetro*, che è un recipiente qualunque nel quale sono immerse due lamine metalliche (gli *elettrodi*), rilegate alla sorgente di elettricità.

Si constata allora che *il passaggio della corrente è indissolubilmente legato a una decomposizione chimica della sostanza disciolta, di cui le parti decomposte si manifestano agli elettrodi; e si sviluppano liberamente, ovvero reagiscono chimicamente col liquido, o con la materia formante gli elettrodi.*

L'elettrodo rilegato al polo positivo della sorgente, e per il quale la corrente penetra nel voltmetro, dicesi *anodo*; l'altro *catodo*; il liquido contenuto nel voltmetro dicesi *elettrolito*; il fenomeno della decomposizione *elettrolisi*, e infine le due metà in cui viene scomposta la molecola dell'elettrolito diconsi *ioni*.

Considereremo sei casi fondamentali, a cui possono ricondursi tutti gli altri: che cioè la sostanza sciolta sia un idracido come l'acido cloridrico (H Cl); o un sale binario come il cloruro di potassio K Cl; o un acido ternario come l'acido solforico (H₂ SO₄) o un sale ternario come il solfato di rame (Cu SO₄); o un idrato come l'idrato potassico (K OH); o infine l'ammoniaca (NH₃).

Si hanno allora le seguenti decomposizioni primitive

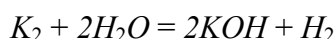


Questi ioni che si sviluppano agli elettrodi daranno poi luogo a *reazioni secondarie* col liquido o con gli elettrodi, producendosi così processi chimici più o meno complicati.

Il fenomeno si semplificherà ricorrendo a elettrodi chimicamente inattivi, come il carbone, o anche, negli ultimi quattro casi, il platino; nei primi due il platino non può essere adoperato, poichè il cloro che si svolge all'anodo, allo stato nascente, attaccherebbe l'elettrodo. Evitando le azioni secondarie sugli elettrodi, restano quelle col liquido. Esamineremo brevemente le principali che hanno luogo in alcuni dei sei tipi d'elettrolisi sopra numerati.

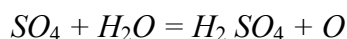
1° caso. L'idrogeno e il cloro si sviluppano liberamente agli elettrodi, e possono raccogliersi con due provette piene di liquido capovolte sugli elettrodi stessi.

2° caso. Il cloro si sviluppa liberamente: il potassio reagisce con l'acqua secondo l'equazione nota.



e al catodo si ha sviluppo d'idrogeno, come nel primo caso, ma la soluzione nelle sue vicinanze comincia a contenere dell'idrato potassico, che la rende alcalina, e perturba, se è presente in grande quantità, il processo elettrolitico.

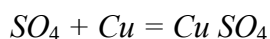
3° caso. L'idrogeno si sviluppa al catodo; il radicale acido SO_4 reagisce con l'acqua secondo l'equazione



e l'ossigeno si svolge all'anodo. Come si vede la molecola di $H_2 SO_4$ si ricostituisce in vicinanza del catodo, e agli elettrodi si liberano H_2 e O nelle proporzioni che si otterrebbero se l'acqua, e non l'acido, fossero decomposti dalla corrente. È in questo senso che si suol dire che *l'acqua è decomposta dal passaggio della corrente*, la quale in verità decompone l'acido solforico aggiunto, che si riforma per il processo secondario ora riferito.

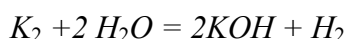
4° caso. Il rame, o in generale il metallo che costituisce il sale, si precipita sul catodo, ricoprendolo di uno strato che può in opportune condizioni essere molto aderente e compatto, permettendo così di *ramare*, o *argentare*, o *nichelare*, o *dorare* l'elettrodo. Questo fenomeno si utilizza nei cosiddetti processi di *galvanoplastica*.

Il radicale acido reagisce col liquido come nel caso precedente, con riformazione dell'acido. La soluzione perciò si va impoverendo del sale contenuto. Ma se l'altro elettrodo è costituito appunto del metallo che forma il sale, per es. di rame, il radicale acido lo attacca e si ricostituisce il sale:

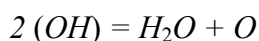


Si vede che in tal caso il metallo viene strappato lentamente all'anodo, e depositato sul catodo; si ha cioè un trasporto del metallo *nel senso della corrente*, e la soluzione resta inalterata.

5° caso. Il metallo K reagisce con l'acqua come nel 2° caso



e dà luogo, al catodo, a sviluppo d'idrogeno; invece all'anodo, reagiscono i due idrossili tra loro secondo l'equazione



e si ha perciò, totalmente, ricostituzione delle due molecole KOH dell'idrato, e sviluppo di H₂ e di O agli elettrodi, corrispondentemente alla decomposizione di una molecola d'acqua.

In realtà perciò, tanto nel caso della elettrolisi dell'acido solforico, che in quella dell'idrato potassico, i prodotti finali ottenuti agli elettrodi sono sempre i componenti dell'acqua, dei quali l'idrogeno si svolge al polo negativo.

6° caso. L'idrogeno e l'azoto si sviluppano liberamente agli elettrodi.

108. **Leggi di Faraday.** — Esposto così l'andamento generale qualitativo dei fenomeni elettrolitici, veniamo alle relazioni numeriche tra le quantità di sostanza liberate agli elettrodi e le caratteristiche della corrente elettrica impiegata. Valgono in proposito le due leggi scoperte dal Faraday.

1^a legge: Qualunque sia la natura dei processi elettrolitici, primario e secondario, che han luogo in un dato voltmetro, il peso dell'elettrolito decomposto, o anche i pesi delle sostanze liberate agli elettrodi, sono proporzionali alla quantità d'elettricità che ha traversato il voltmetro.

Così il passaggio di 1 coulomb in un voltmetro ad acqua acidulata con H₂ SO₄ libera al catodo un peso d'idrogeno eguale a $\frac{1}{96450}$ di grammo, e se ne svilupperà il doppio o il triplo per il passaggio di due o tre coulomb, cioè per una corrente di 1 ampere per due o tre secondi, o per una corrente di due o tre ampere durante 1 secondo.

2^a legge. Per intendere la seconda legge rammentiamo dalla Chimica che chiamasi *equivalente chimico* d'un elemento il rapporto tra il suo peso atomico e la sua valenza. Così l'idrogeno ha il peso atomico 1, la valenza 1, e l'equivalente chimico 1; l'ossigeno il peso atomico 16, la valenza 2, e l'equivalente chimico 8; il rame ha il peso atomico 63,4 ed è bivalente nei composti *ramici*, monovalente nei composti *ramosi*, avrà perciò come equivalente chimico nei primi 31,7, nei secondi 63,4; l'argento, sempre monovalente, ha per equivalente chimico il suo peso atomico 108, ecc.

Se si confrontano ora le decomposizioni che hanno luogo in una serie di voltmetri contenenti diversi elettroliti e traversati dalla stessa quantità totale d'elettricità, si troverà che *i pesi degli elementi diversi separati sono proporzionali ai rispettivi equivalenti chimici*; e che perciò lo stesso numero di coulomb libererà un peso 1 d'idrogeno, un peso 8 d'ossigeno, un peso 31,7 di rame nei composti ramici come il Cu SO₄, un peso 108 d'argento e così via.

Si dà il nome di *equivalente elettrochimico d'un elemento* al peso dell'elemento sviluppato per il passaggio d'un coulomb. La 2^a legge può anche enunciarsi dicendo che *gli equivalenti elettrochimici dei diversi elementi sono proporzionali ai rispettivi equivalenti chimici*.

Una particolare importanza ha la decomposizione del nitrato d'argento tra un anodo d'argento e un catodo di platino. Come si è visto al § 107, 4° caso, la corrente determinerà un trasporto progressivo d'argento dall'anodo sul catodo, e si è potuto stabilire, con le più accurate misure, che il passaggio d'un coulomb fa depositare sul catodo di platino mg. 1,118 d'argento. Questo risultato è servito per la definizione *dell'ampère legale o internazionale* che funziona, per dir così, come *campione legale* dell'ampère teorico. *Una corrente ha l'intensità di 1 ampère internazionale se passando per un minuto secondo in un voltmetro ad argento, montato secondo prescrizioni stabilite, deposita sul catodo mg. 1,118 d'argento.*

109. **Interpretazione dei fenomeni elettrolitici.** — Dopo una serie d'investigazioni importantissime noi possediamo oggi una teoria più che soddisfacente dei fenomeni elettrolitici, dovuta specialmente a Clausius, Helmholtz, Arrhenius e Nernst. Esporremo un breve cenno delle idee adesso dominanti, tacendo per brevità sul lento sviluppo storico che le ha condotto alla perfezione attuale.

Noi abbiamo detto, parlando delle soluzioni (vol. 1° § 94), che nel seno del solvente vagano liberamente le molecole del corpo sciolto, così come le molecole d'un gas vagano liberamente nel vaso che lo contiene. E si corrispondono perfettamente, nei rapporti concettuali e sperimentali, la pressione osmotica delle soluzioni, misurabile col metodo del setto semipermeabile, e la pressione del gas.

Riferimmo pure che soluzioni contenenti egual numero di molecole per litro possiedono la stessa pressione osmotica, così come gas differenti, alla stessa temperatura, e contenenti egual numero di molecole per litro, esercitano la stessa pressione sulle pareti (leggi di Van t'Hoff e d'Avogadro).

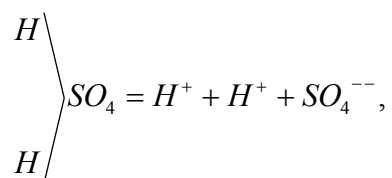
Questa legge non è però rigorosa nel caso delle soluzioni; e mentre si verifica bene per alcune soluzioni, come quella di zucchero, non avviene lo stesso per le soluzioni acquose degli acidi, delle basi o dei sali, cioè proprio per quelle soluzioni che sono conduttrici dell'elettricità e si decompongono per il suo passaggio. *La legge di Van t'Hoff è adunque in difetto negli elettroliti.*

Questo singolare comportamento degli elettroliti suggerì ad Arrhenius e a Nernst l'ipotesi dalla *dissociazione elettrolitica*, che rende conto, insieme, delle deviazioni dalla legge di Van t'Hoff e della conducibilità degli elettroliti. Si ammette in questa ipotesi che nella soluzione di un elettrolito parte delle molecole vaganti nel liquido sono spezzate, o dissociate, in due semi-molecole cariche l'una d'elettricità positiva e l'altra d'elettricità negativa. Così in una soluzione di K Cl esisterebbero delle molecole neutre, e insieme degli *ioni positivi* K^+ e degli *ioni negativi* Cl^- provenienti dalla dissociazione di altrettante molecole K Cl. Questi ioni si muovono in tutti i sensi nel seno del liquido; talvolta si ricombinano, mentre altre molecole si scindono, ma in modo tale che per una data soluzione, a una data temperatura, una frazione costante delle molecole totali del corpo sciolto sarebbero dissociate.

Gli ioni vaganti, come il K^+ e il Cl^- non son da confondere con gli atomi corrispondenti di K e di Cl, poichè sono *atomi provveduti di cariche elettriche energiche*; ed è appunto in virtù di queste cariche che possono esistere nell'acqua gli *ioni* di potassio, mentre l'*atomo* di potassio, come sappiamo, reagisce vivamente col liquido. Solo quando, con un mezzo qualsiasi, gli ioni perdono le loro cariche elettriche, si trasformano in atomi chimici, e riprendono le proprietà chimiche di questi.

Si riconosce subito, intanto, che il numero totale di *individualità* vaganti nel liquido viene con ciò accresciuto; poichè se nell'unità di volume del solvente sono state introdotte, ad esempio, 1 milione di molecole del sale, e la metà di queste si son dissociate, esisteranno nel liquido 500.000 molecole neutre, 500.000 ioni K^+ e 500.000 ioni Cl^- , in totale perciò vagheranno nel liquido 1 milione e mezzo di particelle o gruppi indipendenti, determinando così una pressione osmotica una volta e mezza maggiore di quella spettante alla totalità delle molecole, qualora non fossero dissociate. E s'intende, inoltre, che dall'entità delle deviazioni rispetto alla legge di Vant'Hoff si potrà dedurre la frazione di molecole dissociate, che esercitano perciò una pressione parziale doppia della normale.

La presenza di questi ioni che portano, qualunque sia la sostanza sciolta, una carica elettrica determinata, se la molecola si scinde liberando una valenza ($K-Cl = K^+ + Cl^-$), o una carica doppia della precedente se si scinde liberando una doppia valenza:



spiega ancora la conducibilità elettrica degli elettroliti e le leggi dell'elettrolisi.

Quando, infatti, s'introducono in una soluzione due lamine metalliche (gli elettrodi) rilegati ai poli d'una pila (fig. 138), si crea tra le due lamine un campo elettrico sensibilmente uniforme, come tra le due armature d'un condensatore piano.

Sotto l'azione di questo campo il movimento degli ioni carichi, che si compiva prima indifferentemente in tutte le direzioni, viene perturbato; l'ione K^+ è sottoposto invero a una forza nel senso AB, e l'ione Cl^- a una forza eguale ed opposta nel senso BA. Il moto conseguente sarebbe uniformemente accelerato se l'ione non si trovasse in un mezzo che, per attrito, si oppone al movimento; invece, in virtù dell'attrito, presto si raggiungerà l'*equilibrio dinamico*, e gli ioni assumeranno, come le gocce di pioggia nell'aria, un moto uniforme; questo sarà tanto più veloce quanto maggiore è la intensità del campo, e maggiore la *mobilità* dell'ione, cioè minore l'attrito col mezzo. Appena gli ioni positivi giungono sulla lamina B, e i negativi sulla A, *cedono alle lamine le loro cariche elettriche, trasformandosi in atomi chimici con tutte le loro proprietà*; ma in conseguenza di questa precipitazione convettiva di cariche elettriche opposte sulle lamine A e B, la differenza di potenziale tra queste tende a diminuire.

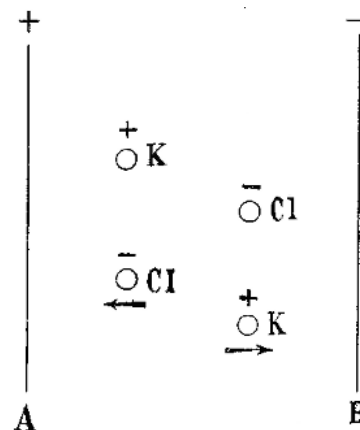


Fig. 198.

E se la pila la mantiene costante, deve restituire alla lamina A la perdita elettricità positiva, e sottrarre alla B l'acquistata elettricità positiva, cosicchè *un flusso continuo d'elettricità positiva* avrà luogo dal polo positivo della pila verso A, e da B verso il polo negativo della pila; cioè una corrente nel senso relativo circolerà lungo i fili che rilegano il voltmetro alla pila, ed essa si potrà anche considerare come avente luogo nel voltmetro, ove avrà però *carattere convettivo*.

Raddoppiando il campo elettrico tra A e B si raddoppierà la velocità costante di regime assunta dagli ioni; un numero doppio di questi giungerà nello stesso tempo sugli elettrodi, e si raddoppierà perciò l'intensità della corrente nel circuito che rilega la pila al voltmetro. Malgrado il carattere convettivo della corrente, *gli elettroliti obbediranno perciò alla legge di Ohm*, come i conduttori metallici, e si potrebbe anche misurare in Ohm la loro resistenza dalla differenza di potenziale occorrente per produrre la corrente uno, se non intervenisse una speciale perturbazione agli elettrodi di cui diremo più in là. La resistenza, misurata con metodi opportuni, risulta, come nei metalli, proporzionale alla lunghezza del conduttore elettrolitico, e inversamente proporzionale alla sua sezione.

Un'influenza notevole sulla conducibilità viene esercitata dalla concentrazione della soluzione. Se la *frazione* di molecole dissociate fosse sempre la stessa, per qualunque concentrazione, allora raddoppiando il numero di molecole sciolte si raddoppierebbe il numero di quelle dissociate, e quindi degli ioni presenti. E poichè al numero di questi è proporzionale la carica trasportata sugli elettrodi sottoposti a una data differenza di potenziale, sarebbe anche raddoppiata la conducibilità della soluzione. L'esperienza ha però rivelato che la *frazione* di molecole dissociate sul loro numero totale è tanto minore quanto più la soluzione è concentrata. Se perciò a una certa concentrazione sono dissociate la metà delle molecole sciolte, a una concentrazione doppia ne

saranno dissociate, per esempio, solo $\frac{4}{10}$; e perciò il numero di ioni esistenti sarà maggiore di

quello di prima, ma non sarà il doppio di esso, e perciò la conducibilità diverrà un po' meno del doppio. Si intende con ciò come dall'andamento della conducibilità di una soluzione, di cui si vari la concentrazione, si possa dedurre la frazione del numero di molecole dissociate sulle totali disciolte. Lo stesso calcolo può farsi con le deviazioni della legge di Van-t'Hoff sulla pressione osmotica, come pure con le deviazioni dalle leggi di Raoult sull'alterazione dei punti di solidificazione o di ebollizione del solvente, per virtù del corpo disciolto, deviazioni che possono essere egualmente interpretate. Con questi diversi metodi, malgrado i fenomeni disparati con cui si ha da fare, *il valore calcolato della frazione di dissociazione è sensibilmente lo stesso*. Si è così trovato che solo in una soluzione estremamente diluita *tutte* le molecole esistenti sono dissociate, e che invece, aumentando la concentrazione, la frazione delle dissociate sulle totali va sempre diminuendo.

110. **La spiegazione delle leggi di Faraday** è immediata nella teoria della dissociazione elettrolitica. Dappoichè ciascun ione della soluzione porta una carica invariabile, e la carica totale

trasportata sugli elettrodi in un certo tempo è eguale alla quantità d'elettricità che circola fra la pila e il voltmetro, s'intende subito che il peso della sostanza liberata all'elettrodo debba essere proporzionale alla quantità totale di elettricità che traversa il circuito contenente il voltmetro.

Inoltre abbiamo detto che tutti gli ioni monovalenti, qualunque sia la loro natura chimica, portano la medesima carica elettrica; gli ioni bivalenti possiedono una carica doppia della precedente e così via. Si riconosce allora che la stessa quantità d'elettricità sarà trasportata sugli elettrodi da un certo numero d'ioni monovalenti, o da un numero metà di ioni bivalenti ecc.; e che perciò il peso dell'elemento deposto dal passaggio d'una data quantità d'elettricità sarà proporzionale al peso atomico per gli elementi monovalenti, al peso atomico diviso per due per i bivalenti, e in generale al peso atomico diviso per la valenza.

La carica trasportata da un ione monovalente è così una costante universale, ed è chiamata carica *ionica*. Il celebre Helmholtz fece osservare che questo fatto induce a ritenere che anche l'elettricità abbia una struttura atomica, o granulare, e che l'atomo d'elettricità sia appunto la carica ionica; gli ioni monovalenti avrebbero un atomo d'elettricità, i bivalenti due atomi d'elettricità e così via. Queste considerazioni hanno avuto un'importanza capitale nella teoria *degli elettroni*, i quali sarebbero appunto gli atomi d'elettricità associabili agli atomi materiali, e che si son potuti riconoscere come individualità distinte in alcuni fenomeni di cui ci occuperemo nel seguente capitolo.

La carica elettrica d'un elettrone, che è la quantità d'elettricità trasportata da un ione monovalente, può essere valutata con una certa sicurezza. Abbiamo detto, invero, che 1 coulomb di carica elettrica è trasportato nell'elettrolisi da un peso d'idrogeno eguale a mg. 0,010368 = gr. $\frac{1}{96450}$; vi corrisponde a 0° e a 76 cm. di pressione un volume d'idrogeno eguale a cm³ 0,123; e poichè in 1 cm³ d'un gas qualsiasi son contenute (vol. 1° §9 8) circa 4×10^{19} molecole e quindi un numero *doppio* 10×10^{19} di atomi d'idrogeno, la cui molecola è biatomica, è chiaro che ciascun atomo d'idrogeno allo stato di ione trasporterà una carica elettrica di circa $1,1 \times 10^{-19}$ coulomb.

111. Teoria della pila. — La corrente elettrica generata dalla pila nel circuito metallico esterno continua nel suo interno, producendo dei fenomeni elettrolitici, come in un vero voltmetro. Le nozioni apprese sui fenomeni chimici che si producono nei voltmetri ci mettono adesso in grado di esaminare il meccanismo col quale l'energia chimica si trasforma, nella pila, in energia elettrica.

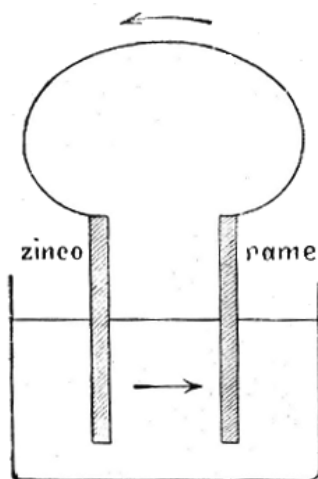
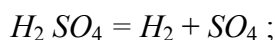


Fig. 139.

Se esaminiamo infatti una pila di Volta che abbia funzionato per qualche tempo, noi potremo constatare che parte della lamina di zinco si è sciolta nell'acido, formando solfato di zinco, mentre dalla pila si è continuamente sviluppato dell'idrogeno gassoso.

La corrente che circola all'esterno dal rame al zinco, traversa la pila, considerata come un voltmetro, dallo zinco al rame; (fig. 139) cosicchè quest'ultimo funzionerà da catodo e lo zinco da anodo. L'acido solforico sarà decomposto secondo l'equazione



dei prodotti dell'elettrolisi l'idrogeno si svilupperà al catodo, cioè *sul rame*, mentre il gruppo SO₄ attaccherà lo zinco, portandolo in soluzione; e per ogni coulomb d'elettricità circolata si svolgeranno mg. 0,010368 d'idrogeno e si scioglieranno 0^{mg},3386 di zinco, essendo quest'ultimo

numero l'equivalente elettro-chimico dello zinco.

Or una simile reazione, come si dimostra in Termochimica, è esotermica, cioè la sostituzione dello zinco all'idrogeno nell'H₂ SO₄ è accompagnata da sviluppo di energia. È appunto l'energia equivalente che si trasforma in energia elettrica, la quale alla sua volta si converte in calore nel filo metallico, e nel liquido della pila, che funziona anch'esso come una resistenza traversata da una corrente, e che subisce perciò l'*effetto Joule* come i metalli (§ 104).

In generale possiamo enunciare che quando le reazioni chimiche producentisi nel voltmetro sono di natura endotermica, il voltmetro è un ricevitore d'energia elettrica, che trasforma in energia chimica; quando invece le reazioni sono esotermiche, allora il voltmetro è *da sé* una pila, o un generatore d'energia elettrica, trasformando in questa la sua energia chimica. E da questo punto di vista energetico il principio della conservazione dell'energia, associato col principio di Carnot, ha permesso a Helmholtz e ad altri di fondare la *teoria termodinamica della pila*, che è in grado di prevedere nei più minuti particolari il comportamento delle pile più svariate, e di calcolarne esattamente la forza elettromotrice.

Ma questa teoria, come avviene in generale per tutte le conseguenze dedotte dai principi della Termodinamica, mentre permette la previsione sicura e rigorosa delle leggi *numeriche* che presiedono al funzionamento della pila, non ci dice nulla sul meccanismo col quale ha luogo in essa la produzione di una forza elettromotrice, e la conseguente trasformazione d'energia chimica in energia elettrica.

Noi abbiamo già fatto cenno della controversia che si dibatte da più di un secolo sulla spiegazione di questo meccanismo, a cominciare dalla prima ipotesi del Volta, che cioè la sede della f. e. m. abbia luogo al contatto dei due metalli differenti. Da questo punto di vista apparisce però incomprendibile che la sede della f. e. m. sia proprio in quel contatto, mentre i fenomeni energetici che accompagnano la produzione della corrente si svolgono nel posto ove ha luogo l'azione chimica esotermica, cioè nella regione ove lo zinco si va sciogliendo nell'acido.

Noi non possiamo diffonderci sulle innumerevoli argomentazioni che sono state emesse su questo difficile argomento. Ma crediamo utile dare un breve cenno della *teoria osmotica della pila*, enunciata dal Nernst, che pur essendo stata avversata da numerose e non lievi obiezioni, da parte specialmente della Scuola Francese, sembra adesso molto in favore presso la maggioranza dei Fisici, e ha permesso in ogni modo di prevedere molti fatti importanti, che l'esperienza ha in gran parte confermato.

Secondo il Nernst i metalli, immersi in una soluzione, hanno una specie di tendenza a cedere alla soluzione i propri atomi carichi di elettricità; così una lastra di zinco in una soluzione ha la tendenza a diffondere ioni di zinco, come un liquido nel vuoto ha la tendenza a evaporare. Ma se il metallo è la soluzione sono isolati, gli ioni che si staccano del primo, e che son carichi d'elettricità positiva, sottraggono elettricità positiva al metallo e la trasportano al liquido, cosicchè a un certo punto si stabilisce una differenza di potenziale tra il metallo e il liquido, e quindi una forza elettrica che impedisce ad altri ioni di abbandonare il metallo, quando la forza stessa, con cui son trattenute dalla lamina a un potenziale negativo, compensa la tendenza alla dissoluzione.

Così introducendo una lamina di zinco nell'acqua acidulata, esisterà una differenza di potenziale tra il metallo e la soluzione, e il primo sarà negativo per aver perduto ioni positivi. Se ora si introduce una lamina di rame, questa ha minore tensione di dissoluzione dello zinco; acquisterà perciò anch'essa un potenziale più basso di quello del liquido, ma pochissimo diverso da questo. Siano ad esempio 0 e -10 il potenziale del liquido e dello zinco; e sia -1 il potenziale del rame, più basso di quello del liquido. È chiaro che il rame si troverà a un potenziale più alto dello zinco. Riunendo ora metallicamente il rame e lo zinco, questo riceverà dal primo cariche positive, e si attenuerà con ciò la sua differenza di potenziale col liquido; nuovi ioni di zinco passeranno quindi in soluzione, mentre questa restituirà al rame le cariche positive, ricevute dallo zinco, per mezzo dei suoi ioni positivi d'idrogeno che si svilupperanno sulla lamina di rame. In realtà, perciò, mentre nella soluzione erano prima vaganti gli ioni H^+ e gli ioni SO_4^- , durante il funzionamento parte dei primi vengono scacciati e sostituiti da ioni Zn, che il metallo tende a spingere nella soluzione, riuscendovi solo quando la soluzione gli restituisca le cariche elettriche che essa acquista e lo zinco va sempre perdendo. La lamina di rame ha appunto questa funzione di ponte, per la carica positiva, dalla soluzione al metallo.

Questa teoria è stata svolta dal Nernst con grande estensione, e applicata al calcolo delle forze e. m. delle combinazioni voltaiche più complicate.

112. **Polarizzazione.** — In ogni caso, però, si abbia da fare con una pila o con un voltmetro, le azioni chimiche che vi si producono corrispondono in generale a una diminuzione o a un

aumento dell'energia chimica dell'apparecchio. Consideriamo, per fissare le idee, un voltmetro ad acqua acidulata con elettrodi di platino: il passaggio d'un coulomb d'elettricità sviluppa energia termica, per il riscaldamento del liquido (nella sua massa) proporzionale alla sua resistenza e al quadrato dell'intensità, e inoltre sviluppa la energia chimica occorrente alla decomposizione dell'acqua in idrogeno e ossigeno. Ma se indichiamo con V_A e V_B i potenziali degli elettrodi e con $q = i t$ la quantità di elettricità passata, il lavoro *totale* compiuto dalla corrente è eguale a

$$L = q(V_A - V_B) = i t (V_A - V_B) \quad (1)$$

Se fosse

$$V_A - V_B = i r$$

come avviene nei conduttori metallici per la legge di Ohm, sarebbe

$$L = i t \times i r = i^2 r t$$

e si otterrebbe quindi come lavoro compiuto dalla corrente solo quello trasformato in calore per l'effetto Joule. Ma L deve comprendere in più il lavoro chimico compiuto nel voltmetro; sarà perciò

$$L > i^2 r t$$

e perciò

$$V_A - V_B > i r$$

Adunque nel voltmetro in l'unzione la caduta di tensione $V_A - V_B$ è maggiore della perdita ohmica di tensione $i r$. Chiamiamo e la differenza, poniamo cioè

$$V_A - V_B = i r + e \quad (2)$$

allora la (1) ci fornisce

$$L = i^2 r t + e i t = i^2 r t + e q$$

nella quale son nettamente separati il lavoro per l'effetto termico $i^2 r t$, e il lavoro chimico compiuto $e q$, che risulta, com'era da prevedere, proporzionale alla quantità q d'elettricità circolata e, quindi al peso d'acqua decomposta.

La (2) ci apprende un fatto molto importante: nel voltmetro ha luogo, oltre alla perdita di tensione ohmica $i r$, una caduta di potenziale e , che l'esperienza ha appunto rivelato da tempo, e che dicesi *forza contro elettromotrice di polarizzazione del voltmetro*.

Questa forza e . m. sussiste, per qualche tempo, ai poli del voltmetro, dopo l'interruzione della corrente esterna; e può essere messa in evidenza molto facilmente rilegando i poli del voltmetro, subito dopo l'azione elettrolitica, a un galvanometro; si constaterà che, pur avendosi da fare con due lamine inizialmente identiche, incapaci perciò di dar luogo in condizioni ordinarie a una corrente, esse sono state *polarizzate* dalla corrente esterna che ha circolato prima nel voltmetro.

Questa persistenza della f. e m. di polarizzazione, anche dopo la cessazione della corrente primitiva, si spiega ammettendo che sulle lamine di platino si condensino in piccola misura i gas idrogeno e ossigeno svolti dalla elettrolisi. La corrente di polarizzazione, inversa della prima, svolge inversamente ossigeno sull'una e idrogeno sull'altra, e si riforma su entrambe acqua. L'energia di ricombinazione dei gas condensati sugli elettrodi serve appunto a intrattenere la corrente di polarizzazione, che cesserà quando i gas stessi saranno eliminati dalla corrente medesima.

La polarizzazione dell'elettrodo di rame, su cui si svolge l'idrogeno, nuoce al buon funzionamento della pila di Volta. Noi vedremo come essa si è evitata nelle pile a due liquidi. Vedremo ancora come della polarizzazione si può trarre profitto nelle *pile secondarie* o negli *accumulatori*.

La corrente nei gas. Nuove radiazioni. Radioattività.

113. **Le due forme di corrente nei gas.** I gas sono, nelle condizioni normali, assolutamente isolanti; cosicchè tra due piatti portati a diverso potenziale non ha luogo alcuna corrente.

Quando però un gas venga sottoposto a speciali procedimenti, esso acquista una particolare conducibilità, che si è potuta riconoscere di natura convettiva, come negli elettroliti; l'agente che crea quella conducibilità determina nel gas la produzione di *ioni*, cioè di nuclei carichi di elettricità positiva e negativa. Gli ioni muovendosi tra i piatti a diverso potenziale, in virtù del campo da questi prodotto, e precipitandosi sui piatti medesimi, tendono a neutralizzarne le cariche, ed obbligano la pila ai cui estremi questi son rilegati a rifornirle in continuazione. Si ha così una *corrente* nel circuito che rilega i piatti alla pila, con lo stesso meccanismo studiato nell'elettrolisi.

Mentre però negli elettroliti la dissociazione elettrica del corpo sciolto fornisce sempre gli ioni necessari al trasporto delle cariche, e ne crea incessantemente dei nuovi, a misura che una piccola parte dei già esistenti si precipitano sugli elettrodi, nei gas la ionizzazione non è spontanea; anzi gli ioni formati dall'agente hanno una tendenza a ricombinarsi, e a perdere la qualità di ioni.

Inoltre essi non son costituiti, come gli elettrolitici, da mezze molecole cariche di elettricità opposte, ma interviene una *dissociazione dell'atomo*, come è dimostrato dal fatto che il fenomeno può aver luogo anche in alcuni gas la cui molecola è monoatomica, e che in taluni casi gli ioni ottenuti hanno una massa molto minore del più leggero tra gli atomi materiali conosciuti.

S'intende subito, da quanto precede, che le leggi dei conduttori metallici o elettrolitici non possono più applicarsi ai gas resi conduttori per la loro ionizzazione. E invero mentre l'agente ionizzante (per esempio i raggi speciali emessi dal *radio*) produce un determinato numero di ioni a ogni minuto secondo, gli ioni prodotti in parte si *ricombinano*, in parte si depositano sulle pareti del vaso perdendo le loro cariche, e solo i rimanenti viaggiano tra i due piatti. E quando il campo molto intenso riuscirà a ridurre al minimo le prime due parti, e a precipitare sui piatti, per la sua violenza, *tutti* gli ioni che si van formando, un ulteriore accrescimento della differenza di potenziale tra i piatti non potrà far accrescere ancora il numero di ioni che prendono parte alla conduzione, e la corrente assumerà un valore limite sensibilmente costante, qualunque siano gli ulteriori accrescimenti della differenza di potenziale.

Questa corrente limite, che corrisponde alla totale utilizzazione degli ioni creati dall'agente, dicesi *corrente di saturazione*; essa non può essere accresciuta che aumentando la rapidità con cui dall'agente son creati nuovi ioni, cioè aumentando il suo *potere ionizzante*.

I processi di ionizzazione sono stati studiati negli ultimi tempi con grandissima cura ed estensione, per la luce inattesa che ne è venuta alle moderne teorie dell'elettricità, e per gl'importantissimi fenomeni alla cui scoperta si è così stati condotti.

I processi speciali capaci di produrre l'ionizzazione dei gas possono classificarsi nel modo seguente:

a) Ionizzazione per riscaldamento; essa avviene nelle fiamme o al contatto di un solido incandescente.

b) Ionizzazione per urto di altri ioni; esse avviene specialmente quando alcuni *centri mobili elettrizzati*, gli elettroni di cui abbiamo fatto cenno nel capitolo precedente, animati da grande velocità urtano contro gli atomi neutri del gas.

c) Ionizzazione per la luce ultravioletta; essa ha luogo o direttamente, con assorbimento della luce medesima da parte del gas che ne risulta ionizzato, o indirettamente per gli elettroni che la luce violetta strappa dai solidi su cui cade, e che provocano nel gas circostante la ionizzazione come al caso b).

d) Ionizzazione per i raggi Roentgen, ottenuti come vedremo per mezzo di tubi a gas rarefatto traversati da una scarica elettrica.

e) Ionizzazione per i raggi di Becquerel, che sono certe radiazioni emesse dalle sostanze dette radioattive, come i sali d'uranio, di torio, di radio, ecc.

f) Ionizzazione per processi chimici, quali i processi di lenta ossidazione del fosforo.

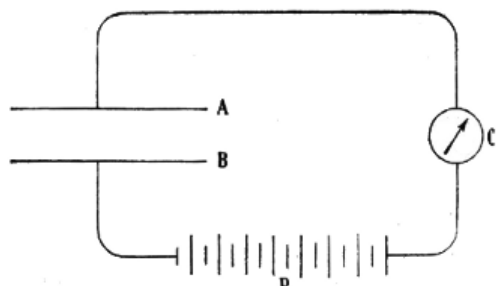


Fig. 140.

Il metodo generale di osservazione di queste correnti nei gas è il seguente: due larghi piatti, A, B (fig. 141) molto bene isolati, e immersi nel gas da studiare, son rilegati attraverso un galvanometro molto sensibile G, ai poli di una pila P composta di molti elementi, capace perciò di produrre una differenza di potenziale elevata tra A e B. Finchè il gas non è ionizzato nessuna corrente traversa il circuito, mentre il galvanometro accusa e misura

le correnti ottenute quando il gas tra A e B è sottoposto all'agente ionizzante. Quando poi la corrente, per la scarsa intensità dell'agente, è troppo debole rispetto alla sensibilità del galvanometro, si ricorre a dei metodi speciali, fondati sull'uso degli elettrometri; ma noi non possiamo occuparcene.

La corrente, come si è detto, aumenta in principio al crescere della f. e. m. della pila, ma si raggiunge a un certo punto un regime, detto di saturazione, a partire dal quale la corrente conserva un valore sensibilmente costante; nella curva della fig. 141, è appunto riprodotto l'andamento della corrente in uno di questi casi; lungo l'asse delle ascisse son riportate le forze e. m. della pila, mentre l'intensità della corrente è rappresentata dalle corrispondenti ordinate.

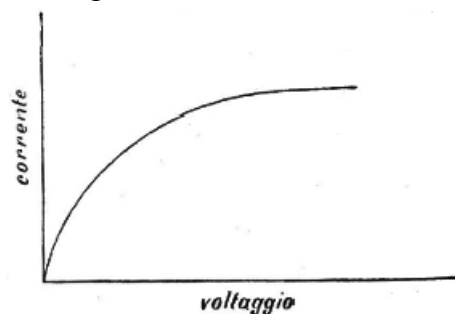


Fig. 141.

Ma un fenomeno importante ha luogo quando la f. e. m. tra i piatti viene molto accresciuta. La corrente che si era conservata per un buon tratto sensibilmente costante, a un certo punto (fig. 142) torna rapidamente ad aumentare; ed acquista un valore elevatissimo al di là di una certa f. e. m., come se il gas fosse divenuto improvvisamente un assai buon conduttore. Contemporaneamente si producono in una parte del gas dei sorprendenti fenomeni luminosi; esso viene solcato da una *scintilla* di breve durata, se i piatti erano in comunicazione con un condensatore carico ad alto potenziale, e si produce un fenomeno luminoso continuo, una specie di scintilla permanente, se i piatti sono rilegati a una pila di altissima forza elettromotrice.

Questo fenomeno del passaggio d'una intensa corrente per una f. e. m. abbastanza elevata avviene anche se tra i piatti, o in generale tra gli elettrodi, non agisce una speciale sorgente ionizzante; e perciò anche nell'aria ordinaria, che del resto non è mai del tutto sprovvista di ioni. Le scintille che noi abbiamo visto scoccare tra i poli di una macchina elettrostatica sono appunto dovute a queste correnti di cui adesso ci occupiamo. Ma occorrono, per produrle, differenze di potenziale elevatissime fra gli elettrodi, crescenti con la loro distanza quasi nello stesso rapporto.

La distanza esplosiva, cioè la distanza d a cui devon portarsi gli elettrodi perchè scocchi la scintilla, e la differenza di potenziale necessaria per produrla sono riportate in questa tabella, che si riferisce a due elettrodi sferici di 1 cm. di diametro.

<i>distanza fra le sfere in cm.</i>	<i>diff. di pot. in volta</i>
0,1	4 800
0,5	16 900
1,0	25 400
1,5	29 300
2	31 300
3	37 200
5	45 900

Da quanto abbiamo detto risulta che la corrente nei gas può avere due forme ben diverse:

1^a quella per la quale il gas acquista una grande conducibilità, e si porta all'incandescenza, sotto l'azione di un campo elettrico molto intenso,

2^a l'altra, di molto minore entità, che si ottiene sotto l'azione di campi elettrici non elevatissimi, ma con la presenza indispensabile d'un agente ionizzante.

Si ammette, dopo una lunga serie d'investigazioni in proposito, che nella prima forma (detta anche *auto-corrente*, o *corrente autonoma*, poichè non è necessaria la presenza di uno speciale ionizzatore), la corrente abbia ancora forma convettiva, e sia dovuta a una intensissima, quasi illimitata ionizzazione creata, come nel caso *b*, dai pochi ioni già presenti nel campo; questi, sollecitati con grande slancio dall'intenso campo esistente tra gli elettrodi, si muoverebbero con velocità grandissima, provocando con gli urti contro gli atomi incontrati per via la formazione di nuovi ioni, i quali alla loro volta ne generano degli altri nel loro cammino verso gli elettrodi e così via.

In questo caso, cioè, l'urto degli ioni esistenti contro gli atomi neutri dà origine a una grande produzione di ioni, che bastano a rendere il trasporto della elettricità molto rapido, come avviene nei liquidi per la spontanea dissociazione *molecolare*.

114. Natura della ionizzazione. — Con le numerose ricerche compiute negli ultimi tempi si è potuto precisare in che consista effettivamente la ionizzazione di un gas. E si è dimostrato che sotto l'azione dell'agente ionizzante alcuni atomi del gas perdono delle particelle piccolissime, cariche di elettricità negativa, e prive di ogni nocciuolo materiale, alle quali appunto venne dato, come si è detto, il nome di *elettroni*. Dopo il distacco si ha perciò un elettrone libero, mobile in virtù delle forze elettriche cui può eventualmente essere sottoposto, e un atomo privo di un elettrone, che era neutro prima e si manifesta, in seguito alla perdita della corrispondente carica negativa, come carico d'un'eguale quantità di elettricità positiva. L'elettrone e l'atomo residuo possono già funzionare da ioni; ma possono anche riunirsi ad atomi neutri, o anche a intere molecole, formando dei gruppi più o meno complessi, ma sempre carichi di elettricità, e che perciò saranno ancora degli *ioni*.

Gli ioni poi, semplici o complessi, e le molecole neutre si muoveranno incessantemente come richiede la teoria cinetica dei gas, soggiacendo a continui urti tra loro e contro le pareti; potrà, per l'incontro fra due ioni opposti, aver luogo la mutua neutralizzazione, o ricombinazione. Tutti i gruppi vaganti come una individualità, siano costituiti da un solo elettrone o da un gruppo pesante di diverse molecole riunite intorno all'elettrone, devono possedere, per la teoria cinetica dei gas, la stessa forza viva. E se si tratta di un elettrone si potrà ancora parlare della sua forza viva, malgrado esso non posseda massa materiale; noi vedremo invero che una pura carica elettrica, per il fatto che è animata da una certa velocità, presenta una inerzia o una massa apparente, si oppone cioè contro le cause che tendono a variare la velocità o la direzione del suo moto.

Tornando agli ioni in generale, la presenza d'un campo elettrico li spingerà verso gli elettrodi, come avviene degli ioni elettrolitici nelle soluzioni. E anche qui, se gli ioni non incontrassero ostacoli nel loro cammino, il loro moto sarebbe uniformemente accelerato, raggiungendosi presto velocità rilevanti, per la grande carica elettrica e la piccola massa reale o apparente.

In realtà il moto è ostacolato dagli incontri con le altre particelle del gas, incontri che si susseguono a intervalli brevissimi, cosicchè il moto finisce, in realtà, col divenire uniforme, ma con velocità tanto maggiore quanto più il campo è intenso. Sono state appunto determinate le *mobilità* degli ioni dei due segni, prodotti da cause diverse, sotto l'azione di un campo elettrico determinato; e si è visto che in generale le mobilità sono diverse, ma per le due specie di ioni prodotte con lo stesso mezzo il rapporto delle mobilità è sensibilmente costante, qualunque sia il mezzo impiegato, ed è maggiore quella degli ioni negativi.

115. **La dispersione elettrica** dei conduttori isolati nell'aria, quel fenomeno cioè per cui un conduttore perde a contatto dell'aria la sua carica più o meno rapidamente, si attribuiva in passato allo insufficiente isolamento dei sostegni; ma si è visto poi che anche eliminando l'influenza del cattivo isolamento del sostegno, la dispersione ha sempre luogo, in misura essenzialmente variabile, in virtù degli ioni che esistono sempre nel gas, e che attirati dal corpo elettrizzato ne diminuiscono lentamente la carica. Questa ionizzazione pseudo-spontanea dell'aria è dovuta in verità a diverse cause abbastanza bene accertate; e poichè gli ioni delle due specie hanno nell'aria secca diverse mobilità, e accorrono perciò con diversa rapidità sul corpo attirante, la dispersione di questo dipenderà dal segno della sua carica, e sarà in generale maggiore se esso è carico positivamente, poichè gli ioni negativi sono più mobili, a parità del campo, dei positivi.

Un gas fortemente ionizzato, con un agente opportuno, perde le sue qualità conduttrici più o meno rapidamente col tempo, a cagione della *ricombinazione* degli ioni di cui abbiamo fatto cenno. Anche su questo proposito sono state eseguite importanti ricerche, come pure si è determinato esattamente l'ammontare degli ioni presenti che vengono distrutti (nelle loro proprietà elettriche) per il contatto con le pareti.

116. **Il valore assoluto della carica d'un ione gassoso** è stato trovato con un metodo molto ingegnoso da Wilson e da J. J. Thomson, al quale si deve specialmente il grande impulso acquistato negli ultimi tempi dallo studio della conduzione dell'elettricità attraverso ai gas, e dalla teoria degli elettroni.

Si è profittato, per questa determinazione, del fenomeno detto della *condensazione in nebbia del vapor d'acqua soprasaturo*.

Era noto che, provocando una rapida espansione dell'aria satura di vapor d'acqua, per il conseguente raffreddamento il vapore prima contenuto diviene eccedente, e si precipita sotto forma di goccioline finissime; ma le gocce, per formarsi, han bisogno di un nucleo, per es. i granellini di pulviscolo sempre esistenti, mentre se l'aria è privata del pulviscolo (con successive espansioni e precipitazioni di vapore che trasporta con sè i granellini nelle gocce prodotte) la condensazione non ha più luogo, a meno che non si ricorra a un'energica espansione, tale da accrescere almeno da 1 a 1,4 il volume primitivo del gas. Sottoponendo questa aria priva di pulviscolo all'azione d'un agente ionizzatore, gli ioni fanno da centri di condensazione, e basta l'espansione da 1 a 1,25 perchè la precipitazione abbia luogo sugli ioni negativi; per un'espansione maggiore fanno anche da centri gli ioni positivi.

In ogni caso la totalità del vapor d'acqua eccedente si precipita sui nuovi centri; e le gocce saranno minutissime e molto numerose se i centri sono in gran numero, e avranno invece volume e peso maggiore se i centri sono in numero minore.

La nebbia formata discende lentamente, come una nuvola limitata superiormente da un piano, entro il pallone di vetro destinato all'esperienza. E dalla velocità della discesa del limite superiore, che è la velocità di caduta delle goccioline, si può per virtù di un calcolo dovuto a Stokes (vol. I, § 54) dedurre il diametro d'ogni goccia, e quindi il suo peso. Il peso totale delle gocce è pure conosciuto, perchè è il peso del vapore eccedente che si condensa con la espansione prodotta. *Si può quindi calcolare il numero totale delle goccioline, e quindi il numero effettivo di ioni negativi esistente nel pallone al momento dell'espansione.*

D'altra parte, lasciando agire l'agente ionizzatore come prima, si può precipitare tutti gli ioni negativi sopra un piatto metallico all'interno del pallone, per mezzo d'un intenso campo elettrico. La carica acquistata dal piatto sarà la carica totale che vi è trasportata dagli ioni, e quindi la carica totale di questi. Conoscendo così il numero totale degli ioni negativi, e la loro carica complessiva, si potè dedurre la carica elettrica portata da un ione.

Il risultato di queste esperienze meritamente celebri fu il seguente: la carica elettrica di un ione negativo, e quindi anche quella di uno positivo, è sempre la stessa, qualunque sia il mezzo con cui si è prodotta la ionizzazione; essa coincide in valore assoluto con la carica d'un elettrone, cioè con la carica trasportata nell'elettrolisi da un ione monovalente, che è eguale, come vedemmo, a $1,1 \times 10^{-19}$ coulomb.

117. **La scintilla all'aria libera.** — Noi dobbiamo contentarci dei brevissimi cenni dati intorno allo studio esauriente che si è fatto delle correnti d'ionizzazione nei gas. Torniamo adesso alle *auto-correnti*, che ci offrono un insieme di fenomeni molto complessi, sui quali solo negli ultimi tempi si è potuto svolgere qualche tentativo d'interpretazione.

Due conduttori a diverso potenziale, portati a conveniente distanza, danno luogo alla scintilla, e a traverso ad essa avviene la ricombinazione delle cariche opposte, convertendosi in calore l'energia elettrostatica accumulata nei conduttori medesimi. Il calore svolto nella scintilla dipenderà quindi dall'energia posseduta dai conduttori, e quindi, a parità di differenza di potenziale, dalla loro capacità. Sono perciò più rumorose e più brillanti le scintille ottenute con la scarica delle bottiglie di Leyda.

Ma in tutti questi casi il fenomeno della scarica è molto complesso, poichè, per ragioni che vedremo, in generale la scarica è *oscillante*, si succedono cioè delle correnti *inverse* dall'una all'altra armatura, via via sempre più deboli, e a intervalli rapidissimi; e nella scintilla si seguono tutte queste scariche successive nei due sensi. Il processo totale si compie in un tempo brevissimo, e solo esaminando la scintilla con uno specchio rapidamente rotante la si può *risolvere* in tante scintille parziali, il cui intervallo dipende dalla capacità del condensatore e dalla forma del circuito di scarica. La resistenza elettrica del circuito di scarica ha anche una grande influenza: la scarica è *oscillatoria* solo se quella resistenza è piccola, mentre con una grandissima resistenza la scarica torna a dividersi ancora in tante scariche parziali, ma tutte nel medesimo senso, e molto più deboli delle prime. In quest'ultimo caso l'energia elettrostatica disponibile si dissipa in gran parte nel conduttore di scarica, e solo in piccolissima parte nella scintilla.

Le scintille molto lunghe danno luogo a effetti luminosi svariatisimi; così nella forma detta a pennacchio, o effluvio elettrico, si ha una scarica continua silenziosa di piccola intensità, e che ha formato oggetto di speciali importanti ricerche.

Segnaleremo infine gli *effetti meccanici* della scintilla, per cui essa producendosi nel seno d'un isolante solido lo perfora e lo riduce talvolta in pezzi; le *azioni chimiche* per cui in conseguenza della sua elevata temperatura può provocare delle reazioni chimiche esplosive, come l'accensione del miscuglio tonante, ovvero per la sua azione continua può determinare la formazione lenta di prodotti endotermici, come la trasformazione dell'ossigeno in ozono con l'*effluvio elettrico*, e l'ossidazione lenta dell'azoto con le scariche molto energiche e frequenti; e infine le *azioni fisiologiche della scarica*, consistenti in scosse più o meno spiacevoli, e che possono divenire pericolose di vita se la scarica è troppo intensa. Su questi ultimi effetti delle correnti noi avremo occasione di tornare più in là.

118. **Scariche nei gas rarefatti.** — Molto più interessanti sono i fenomeni offerti dalla scintilla in un gas rarefatto, e che hanno presentato ai fisici materia indefinita di studio. Anche qui noi dobbiamo limitarci a dei brevissimi cenni.

Per l'investigazione di questi fenomeni si ricorre a dei tubi di vetro, che hanno avuto le più svariate forme; in essi si produce la rarefazione con le pompe già descritte, e si dà accesso alla scarica per mezzo di elettrodi metallici di diverse forme, comunicanti all'esterno con fili saldati a chiusura ermetica nel vetro. Si possono studiare, come nell'aria, o le correnti continue dovute a batterie di pile di assai elevata tensione, ovvero le scariche istantanee dei conduttori elettrizzati, come i poli della macchina elettrica o di un altro apparecchio che noi studieremo; è questo il rocchetto di Ruhmkorff, destinato a produrre delle brusche differenze di potenziale di breve durata, susseguentisi a intervalli più o meno rapidi.

Un primo effetto constatabile è la maggiore facilità con cui la scarica passa nel tubo a misura che si procede nella rarefazione; viene richiesta cioè una minore differenza di potenziale che non all'aria libera. Vale in proposito una legge importante dovuta a Paschen: *Diminuendo la pressione, e aumentando in corrispondenza la distanza degli elettrodi, in modo che il loro prodotto resti costante, la differenza di potenziale richiesta per la scarica resta pure costante*; cosicchè gli stessi 4800 volta occorrenti per produrre una scintilla tra due palline disposte a 1 mm. di distanza nell'aria alla pressione atmosferica basteranno per produrre una scintilla di 1 metro alla pressione di $\frac{1}{1000}$ di

atmosfera. Se invece si tiene costante la distanza degli elettrodi, al diminuire della pressione diminuisce in principio la differenza di potenziale occorrente per la scarica, raggiunge un valore minimo per una pressione detta *pressione critica*, e poi *torna ad aumentare*.

Il valore della pressione critica dipende dalla distanza degli elettrodi, ed è all'incirca inversamente proporzionale a quella distanza; cosicchè quanto più son vicini gli elettrodi tanto più presto si raggiunge la pressione alla quale la differenza di potenziale ha il minimo valore.

Risulta poi dalla legge di Paschen una conseguenza importante. In ogni caso la differenza di potenziale varia nello stesso senso aumentando la pressione, o aumentando la distanza; e viceversa. E poichè al di sotto della pressione critica un aumento della pressione produce, come si è detto, una facilitazione nel passaggio della scarica, lo stesso effetto si otterrà *aumentando la distanza*; si ha allora questo fenomeno paradossale, che cioè la scarica passa più facilmente, nello stesso ambiente, allontanando gli elettrodi.

Il valore della pressione critica p nell'aria, che dipende come si è detto dalla distanza d degli elettrodi, è dato all'incirca dalla formola

$$p = \frac{6}{d}$$

nella quale se d è espresso in mm., p viene calcolato in mm. di mercurio; così se gli elettrodi sono a 10 mm. di distanza quella pressione risulta di 0,6 mm.

A misura che per la rarefazione si modifica la differenza di potenziale occorrente alla scarica, delle importanti modificazioni si osservano nell'aspetto della scintilla entro il tubo. Essa va perdendo il carattere di un tratto sottile, biancastro; ma si va sempre più ingrossando, fino a invadere un grande volume compreso tra gli elettrodi, con delle colorazioni violacee. Le successive modificazioni, dipendenti dalle circostanze sperimentali, non sono facilmente descrivibili.

Ma non possiamo far a meno di mettere in luce certi caratteri generali, che si ritrovano in tutti i casi, e che hanno, come vedremo, una grande importanza.

A misura che aumenta la rarefazione la luminosità interna al tubo sembra staccarsi dal catodo,

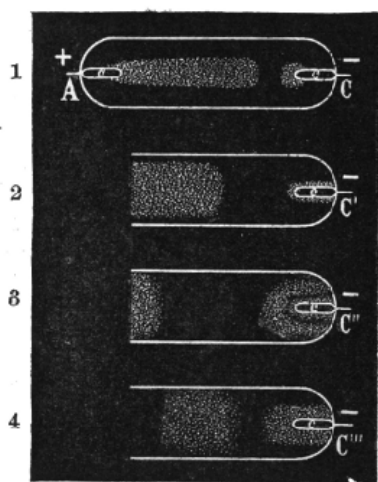


Fig. 143.

lasciando intorno a questo solo un'aureola (fig. 143, n.º 1); resta invece aderente all'anodo, e perciò le si è dato il nome di *colonna positiva*; tra la colonna positiva e l'aureola si vede uno spazio oscuro, detto *spazio oscuro di Faraday*. Aumentando ancora la rarefazione (come al n. 2) la colonna positiva si allarga accorciandosi sempre più, mentre l'aureola invade l'intero catodo e aumenta lo spazio di Faraday; poscia (n. 3) l'aureola si stacca dal catodo, che viene rivestito da un'altra aureola più tenue, separata dalla prima dallo *spazio oscuro catodico*, mentre lo spazio di Faraday si estende e la colonna positiva si accorcia sempre più. In generale in diversi di questi casi la colonna positiva è anche *stratificata*, cioè costituita da una successione di strati luminosi o oscuri. Per grandissime rarefazioni lo spazio oscuro invade quasi l'intero tubo, resta solo l'aureola sul catodo, ma insieme diviene vivissima una bella luce verde emessa dalle pareti del tubo di vetro, che si era già manifestata in misura crescente anche nei primi stadi.

119. Raggi catodici. — Questa luminosità verde del vetro ha origine dal catodo, ed è dovuta a qualche cosa che parte dallo elettrodo, normalmente alla sua superficie, e si propaga in direzione rettilinea, fino all'incontro del vetro, ove desta quella luce detta di *fluorescenza*. Cosicchè mentre nei primi stadi di rarefazione, quando dominava nel tubo la colonna positiva, questa invadeva l'intero tubo seguendone tutte le sinuosità e le piegature più capricciose, adesso la luminosità verde della *parete* si manifesta solo nelle parti del vetro che possono essere in linea retta colpiti dalle *radiazioni del catodo*, o dai *raggi catodici*. E se questi incontrano nel loro cammino un ostacolo

solido, come una croce metallica (fig. 144), un'ombra del corpo si disegna sulla parete del tubo contrapposta al catodo.

Le proprietà dei raggi catodici furono da tempo sottoposte a studi molto interessanti da Crookes e da Hittorf, Essi eccitano la *fosforescenza* o la *fluorescenza* di molti corpi che ne vengano colpiti, i quali divengono perciò temporaneamente luminosi. Il fenomeno è particolarmente brillante ricorrendo a un catodo a forma di specchio concavo sferico, con che i raggi vengono concentrati nel centro di curvatura, ove può disporsi il corpo che si vuol rendere luminoso, per esempio vetro, di diverse qualità, solfuro di calcio, rubino, ecc. Inoltre i corpi colpiti vengono fortemente riscaldati (si può così provocare la fusione di una laminetta di platino); e subiscono un'azione meccanica, come se i raggi consistessero in un bombardamento di particelle materiali.

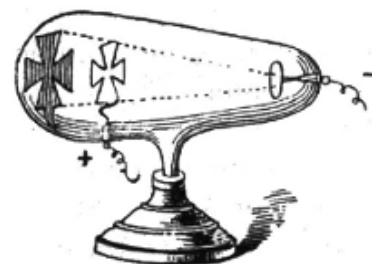


Fig. 144.

I raggi catodici vengono deviati da un campo magnetico, e la deviazione è perpendicolare, insieme, alla direzione del campo e a quella del raggio; essa avviene in tal senso da far assomigliare il raggio a un filo flessibile, percorso da una corrente elettrica, nel senso opposto alla propagazione dal catodo, e fissato nel punto in cui emerge dal catodo stesso. Queste deviazioni si possono mostrare facilmente col tubo a pera portante la croce (fig. 144) o

meglio col tubo di Braun (fig. 145), nel quale, attraverso a un foro sottile praticato in un disco D che intercetta i raggi, passa nella seconda metà del tubo un sottile pennello di raggi catodici, che producono un cerchietto luminoso su uno schermo fluorescente situato all'estremo.

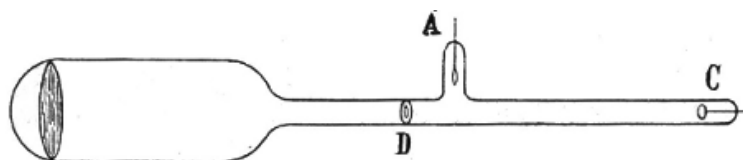


Fig. 145.

La posizione del cerchietto si sposta nel senso corrispondente alla deviazione del pennello, qualora si avvicini al tubo una calamita.

I raggi vengono anche deviati da un campo elettrostatico, creato per es. per mezzo di due lamine parallele a diverso potenziale disposte entro il tubo; essi vengono deviati come se fossero particelle dotate d'inerzia, cariche di elettricità negativa, e animate da velocità grandissime nel senso di allontanarsi dal catodo. Questa ipotesi spiega pure il fenomeno della deviazione che essi subiscono da un magnete, poichè si dimostra che una carica elettrica in moto equivale a una corrente elettrica, e deve perciò esser deviata dal suo cammino, come un filo percorso da corrente, per l'azione d'un campo magnetico. In realtà si è potuto dimostrare che i raggi catodici, ricevuti in un cilindro metallico, vi trasportano cariche negative, cosicchè da tutto l'insieme delle proprietà di questi raggi si è potuto concludere nel modo più sicuro che *essi consistono in particelle dotate di inerzia, cariche di elettricità negativa, e proiettate dal catodo normalmente alla sua superficie con enorme velocità.*

Si è riconosciuto poi, (determinando con metodi svariatissimi, fondati sulla misura della deviazione elettrica e magnetica, la velocità delle particelle e il rapporto $\frac{e}{m}$ della loro carica elettrica per la massa), che esse sono addirittura gli *elettroni* di cui abbiamo fatto cenno più volte, cioè risultano da *pure cariche elettriche in moto*, e dotate d'inerzia *apparente* in virtù del loro movimento.

Il valore della massa apparente può essere invero dedotto dall'esperienza, conoscendo il valore del rapporto $\frac{e}{m}$, e la carica e , che è eguale a quella degli ioni elettrolitici monovalenti e degli ioni cui è dovuta la conduzione elettrica dei gas. Se ne deduce per m un valore dipendente, come si è detto, dalla velocità, e che è all'incirca $\frac{1}{1700}$ della massa d'un atomo d'idrogeno, qualunque sia la natura del gas contenuto nel tubo e la materia di cui son costituiti gli elettrodi. Dal modo con cui la massa apparente varia con la velocità, che coincide con la legge calcolata teoricamente per una pura

carica elettrica, si è potuto accertare che la carica elettrica, nella particella catodica, non è associata a un nucleo materiale; ma anche senza di ciò, dato il piccolissimo valore della massa *totale*, si poteva escludere che il nucleo fosse un *atomo* materiale di un corpo conosciuto.

120. **Interpretazione del fenomeno della scarica a basse pressioni.** — Abbiamo detto che le scariche sono *correnti autonome* di breve durata, dovute alla copiosa produzione di nuovi ioni in virtù dell'urto degli ioni esistenti, che animati per effetto del campo da grande velocità, incontrano lungo il cammino gli atomi neutri del gas.

È chiaro, intanto, che con la rarefazione, facendosi le molecole più diradate, e aumentando perciò *la lunghezza del libero percorso* di ogni particella tra due urti consecutivi, (vol. I § 98) un ione soggiacerà più a lungo, senza essere arrestato, all'azione acceleratrice del campo, e acquisterà perciò prima dell'urto una maggiore velocità, e con essa una maggiore facilità di ionizzare la molecola che incontra nel suo cammino. Basterà quindi un campo più debole per provocare la intensa ionizzazione caratteristica della corrente autonoma o della scarica. Così quando la lunghezza del libero percorso si raddoppia, per la riduzione della pressione a metà, basterà un campo d'intensità metà per rendere un ione atto all'autoionizzazione, e perciò a pari differenza di potenziale si potrà raddoppiare la distanza degli elettrodi. La legge di Paschen viene così giustificata.

Si è potuto riconoscere, con una serie di argomentazioni svolte specialmente da J. J. Thomson a cui essenzialmente si deve questa teoria della scarica, che gli elettroni già esistenti nel tubo in piccolo numero, o emessi addirittura dal catodo, acquistano la velocità necessaria, per provocare la ionizzazione delle molecole che incontrano, proprio entro lo spazio oscuro catodico. I nuovi elettroni creati si muovono nello stesso senso, e danno origine, dopo lo spazio oscuro di Faraday, a una ionizzazione continua o intermittente nella colonna positiva continua o stratificata.

Invece gli ioni positivi generati nel secondo strato si muovono verso il catodo, aumentano di velocità traversando lo spazio oscuro catodico, e giunti alla prima aureola, quella in contatto col catodo, hanno già una velocità sufficiente per dar luogo anche loro alla ionizzazione, creando così i nuovi elettroni che devono continuare il processo, e costituire il flusso permanente di raggi catodici.

Adunque nelle due aureole avverrebbe essenzialmente il processo continuo di ionizzazione che fornisce gli ioni occorrenti alla scarica. Quanto agli ioni positivi viaggianti verso il catodo, e che vanno acquistando una notevole velocità, essi finiranno col cadervi sopra, generando forse con ciò nuovi elettroni strappati al metallo; e se il catodo è forato potranno anche passare al di là, costituendo i cosiddetti **raggi canali**, i quali appunto, come si è dimostrato con la loro deviabilità magnetica ed elettrica (che è inversa e *più piccola* di quella dei raggi catodici), risultano da particelle aventi all'incirca la massa degli atomi materiali, e una carica positiva; sono cioè atomi materiali che han perduto un elettrone.

Quanto ai raggi catodici, essi continuano a propagarsi nel tubo anche dopo oltrepassato l'anodo, cioè anche dove il campo elettrico non esiste più, in virtù della velocità enorme acquistata; così come fa un proiettile dopo che abbandona la canna del fucile entro la quale ha subito l'azione acceleratrice. Se la rarefazione è molto grande, e gli elettroni non incontrano molte molecole nel loro cammino, si potranno propagare anche a grande distanza, possono traversare sottili lamine di metallo e passare in un secondo tubo, costituendo i raggi di Lenard, che hanno com'è naturale le stesse proprietà dei raggi catodici, pur essendo un po' meno veloci; e possono infine, come riuscì appunto al Lenard, uscire dalla lamina di metallo addirittura nell'aria libera, ove però sono rapidamente arrestati dalle molecole d'aria molto fitte, provocando una intensa ionizzazione di queste, e altre azioni interessanti, come l'impressione delle lastre fotografiche ecc.

Tutti questi fenomeni, scoperti sperimentalmente prima della teoria degli elettroni, apparivano incomprensibili, e diedero luogo alle più fantastiche spiegazioni; invece essi rientrano nella maniera più soddisfacente nel quadro dell'interpretazione elettronica.

E così tenendo conto dell'autoionizzazione e degli effetti dovuti ai solidi incandescenti, si spiega il funzionamento dell'*arco elettrico*, di cui noi ci occuperemo, solo dal punto di vista delle applicazioni, più in là.

121. **Raggi X.** — I tubi a vuoto, percorsi dalle scariche elettriche, danno ancora origine a un fenomeno importantissimo, scoperto dal Roentgen nel 1895. Il vetro colpito dai raggi catodici, e in generale qualunque corpo solido capace di assorbirli, emette dei raggi singolari, invisibili direttamente, e dotati delle seguenti proprietà:

1^a Essi si propagano, come la luce, in linea retta, dirigendosi in tutti i sensi dal punto che vien colpito dai raggi catodici.

2^a Nel loro percorso vengono più o meno assorbiti dai corpi che incontrano, dei quali alcuni si comportano come quasi perfettamente trasparenti, altri come più o meno opachi; ma la trasparenza o la opacità per i nuovi raggi non ha nulla da fare con quella degli stessi corpi per i raggi luminosi ordinari.

3^a Incontrando alcuni corpi speciali, come il platinocianuro di bario, il solfuro di zinco, li rendono luminosi per *fluorescenza*, come fanno i raggi catodici.

4^a Essi esercitano una intensa azione fotografica sui corpi, come i sali d'argento, capaci di impressionarsi per la luce ordinaria.

5^a Non subiscono alcuna deviazione sensibile da parte d'un campo elettrostatico o d'un campo magnetico.

6^a A seconda del tubo che li ha generati sono più o meno *penetranti*, cioè traversano con maggiore o minore facilità i corpi materiali che incontrano.

7^a Non sono suscettibili di riflessione regolare, nè di rifrazione; e non presentano i fenomeni di interferenze, nè di polarizzazione, nel senso che abbiamo dato a questa parola per i raggi luminosi; ma solo pare che subiscano la diffrazione.

8^a Rendono notevolmente conduttori i gas che attraversano provocandone la ionizzazione; e gli ioni generati manifestano le solite proprietà da noi già studiate. La stessa influenza esercitano sui solidi e sui liquidi isolanti.

9^o Incontrando una lamina solida capace di assorbirli, come una lamina di piombo, la riscaldano lievemente, e ne strappano degli elettroni con un meccanismo analogo a quello esercitato, su alcuni metalli, dalla luce violetta; generano inoltre delle *radiazioni secondarie* analoghe ai raggi incidenti, ma meno penetranti.

10^a Infine esercitano delle notevoli azioni fisiologiche, e forse anche terapeutiche, che si presentano come molto promettenti in medicina.

Ma la proprietà più caratteristica, che ha reso meritamente celebre anche nel pubblico non colto la scoperta del Roentgen, è il grado di trasparenza notevole, per questi nuovi raggi, di molti corpi opachi per la luce ordinaria, come il legno, la carta, il cuoio, i tessuti organici in genere, i metalli di piccolo peso atomico come l'alluminio, ecc.

Questa proprietà, unita a quella di rendere luminoso uno schermo ricoperto di platino-cianuro di bario, e d'impressionare la lastra fotografica, ha permesso la visione o la fotografia dei corpi opachi entro involucri trasparenti per i raggi X, ma non per la luce ordinaria.

E invero la loro propagazione in linea retta fa sì che, limitando alquanto la regione di emissione dei raggi medesimi, e interponendo un oggetto opaco tra la sorgente e lo schermo, *si disegna su questo l'ombra dell'oggetto*, tanto più nettamente quanto più limitata è la parte utilizzata della sorgente, e più prossimo l'oggetto allo schermo. Così interponendo tra il tubo e lo schermo una scatola di compassi chiusa, si vedono nettamente gli arnesi metallici contenuti, poichè l'involucro in legno è quasi perfettamente trasparente. L'effetto di questa esperienza è veramente meraviglioso.



Fig. 146.

In generale sono opachi i metalli di elevato peso atomico, anche allo stato di combinazione. E perciò mentre le parti molli e non molto spesse del nostro corpo son piuttosto trasparenti, e determinano delle ombre lievi, le ossa danno un'ombra molto più pronunziata per il calcio che contengono; e riescono perciò visibili, provocando una impressione indescrivibile in chi osserva il fenomeno per la prima volta. La fig. 146 riproduce appunto l'aspetto di una mano, quale si ottiene

eseguendo per ombra la fotografia della mano posata su uno chassis in legno, chiuso e contenente la lastra, o quale si può osservare, coi chiari e gli scuri invertiti, direttamente sullo schermo fluorescente. Ma si possono ora eseguire delle eccellenti *radiografie* di qualunque parte del corpo, ricorrendo a produttori di scariche abbastanza potenti, e ai moderni tubi a vuoto costruiti per lo scopo. E s'intende senz'altro la grande importanza di simili osservazioni in medicina e in chirurgia, poichè riescon visibili, oltre le ossa, anche gli organi principali interni, che spiccano sul fondo per la diversa trasparenza del loro contenuto.

Mentre si è sempre più migliorata la tecnica dei raggi X, in vista delle loro importanti applicazioni, nei Laboratori di Fisica si è proceduto con grande slancio a investigarne sempre meglio le proprietà, per trovare la spiegazione dell'importante fenomeno.

Quanto ai progressi tecnici noteremo che essendosi osservato un notevole miglioramento col concentrare i raggi catodici su una lamina interna di platino, anzichè sulla parete di vetro, si costruiscono i cosiddetti *tubi focus*, come quello della fig. 147. I raggi catodici, emessi da un catodo concavo, cadono su una laminetta di platino, che diviene centro d'emissione di raggi X molto intensi; la lamina, insieme all'anodo *a*, vien rilegata al polo positivo della sorgente elettrica. Nel tubo è fatto un vuoto molto spinto; quanto maggiore è la rarefazione, tanto più elevata è la tensione richiesta per il funzionamento; e il tubo emette raggi sempre più penetranti.

Quanto alle investigazioni teoriche esse hanno avuto di mira le altre proprietà già enunciate, specialmente la ionizzazione prodotta nei gas, che fu scoperta quasi contemporaneamente dal Prof. Righi e da Hurmuzescu. Noi non possiamo riferire l'insieme molto complesso dei risultati ottenuti. Diremo solo che tutte le proprietà finora osservate fanno pensare che i raggi X consistano in brusche perturbazioni dell'etere luminoso, causate dall'arresto improvviso dell'elettrone in moto contro l'ostacolo. Ne risulterebbero delle onde eteree singolari che sarebbero, rispetto alle onde *periodiche luminose*, ciò che è l'onda acustica dovuta a un'esplosione rispetto alle onde periodiche proprie del suono d'un diapason.

122. **Radioattività.** — Abbiamo incontrate, nei precedenti paragrafi, alquante specie di radiazioni nuove, producibili per mezzo dei tubi a vuoto: i raggi catodici, consistenti in elettroni lanciati dal catodo a grande velocità; i raggi di Lenard consistenti in raggi catodici che vengon fuori da una sottile laminetta metallica chiudente un foro della parete di vetro, e che conservano le più essenziali proprietà dei raggi catodici, propagandosi però anche nell'aria libera; i raggi canali che sono invece atomi materiali carichi positivamente per la perdita d'un elettrone, e muoventisi con grande velocità: infine i raggi X, che pare consistano in onde brusche dell'etere provocate dall'arresto improvviso di un bolide catodico incontrante un ostacolo.

Si deve a H. Becquerel la prima scoperta che condusse a tutte le altre relative ai *fenomeni radioattivi*, e consistente nella osservazione che i sali d'uranio emettono *spontaneamente* delle radiazioni singolari, le quali si son potute appresso quasi identificare con quelle ora enumerate. Si tratta cioè dell'emissione spontanea di raggi, chiamati α , che hanno le proprietà dei raggi canali; di raggi chiamati β che hanno le proprietà dei catodici e che si identificano coi raggi di Lenard; e infine di raggi detti γ , che s'identificano coi raggi X, cosicchè noi possiamo dispensarci dal riferirne le proprietà generali, già enunciate nei paragrafi precedenti.

La signora Curie fece la constatazione importante che mentre i sali puri d'uranio mostrano *un'attività*, misurata dalla intensità delle loro radiazioni, proporzionale al peso dell'elemento uranio contenuto, alcuni minerali complessi contenenti uranio si rivelano come più attivi di quello che ci si dovrebbe aspettare dalla conoscenza dell'uranio in essi presente, e superano perfino l'attività

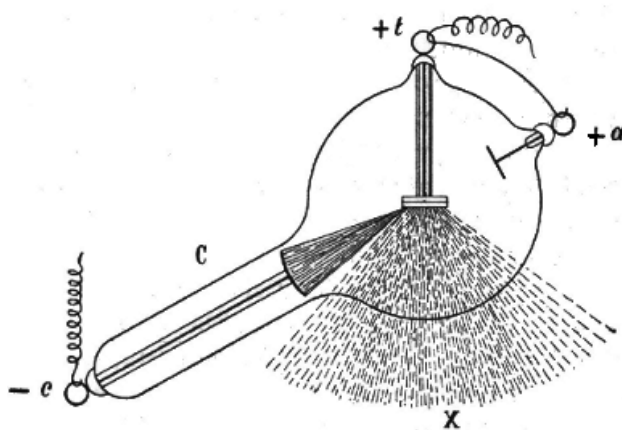


Fig. 147.

propria dell'uranio metallico. Partendo da questa scoperta i coniugi Curie iniziarono la celebre serie delle loro ricerche, destinate a isolare da quei minerali il supposto elemento più attivo dell'uranio, e al quale doveva attribuirsi il loro potere anormale.

Il minerale più caratteristico è la *pechblenda* di Joachimstahl, dalla quale, con una serie di procedimenti chimici assai complicati, si cercò di separare i molteplici elementi (uranio, piombo, calcio, silicio, alluminio, ferro, bario e in generale quasi tutti i metalli) contenuti allo stato di combinazione.

L'attività dei vari prodotti ottenuti veniva provata con la loro azione ionizzatrice sull'aria, cioè con la conducibilità da questa acquistata tra due piatti; scartando ogni volta i preparati successivi, nei quali l'attività si mostrava quasi insensibile, e ritenendo e sottoponendo a nuovi trattamenti quelli nei quali essa si trasferiva quasi interamente, si pervenne a ottenere, per ogni tonnellata di residui di pechblenda, una quindicina di chilogrammi di solfati di diversi metalli, la cui attività, a peso eguale, era circa otto volte maggiore di quella del primitivo minerale, e 60 volte maggiore di quella dell'uranio metallico.

La lotta venne quindi concentrata sui 15 Kg. di materiale ottenuto, e si riconobbe l'utilità di separarne il bario, al quale si trovò che era sempre accompagnata la massima attività; questa d'altra parte non è una proprietà del bario come tale, poichè quello estratto da altri minerali non è radioattivo; era dunque evidente che al bario era associato nella pechblenda un nuovo elemento chimico, avente le sue proprietà chimiche, e che lo seguiva perciò nelle successive separazioni.

Ed effettivamente il nuovo elemento fu trovato; e si poté isolarlo dall'inseparabile bario solo per la alquanto diversa solubilità in acqua dei cloruri rispettivi; si pervenne così a un cloruro del nuovo elemento, cui si diede il nome di **radio**, che conteneva solo poche tracce di bario, e la cui attività si mostrò, a pari peso, enormemente più grande di quella dell'uranio (da uno a due milioni di volte maggiore). Da una tonnellata di residui di pechblenda si ottengono così due o tre decigrammi di sale di radio, cui corrisponde oggi il valore commerciale di circa 100.000 lire.

Isolato il cloruro dell'elemento, che si può anche trasformare in bromuro ecc., se ne studiarono le proprietà; e si poté accertare che si aveva veramente da fare con un nuovo elemento chimico, per mezzo dello studio spettroscopico, il quale rivelò alquante righe speciali che caratterizzano appunto il radio; si è potuto anche dalla signora Curie determinarne il peso atomico, che risulta eguale a 225.

Il bario trascina, nel trattamento dei minerali radiferi, la massima parte dell'attività primitiva; ma anche il bismuto ne trascina una parte, che può sempre più concentrarsi, e che la signora Curie attribuì a un altro nuovo elemento, il *polonio*. Questo non è però stato isolato, come neanche il *radiotellurio* del Markwald, separato con altri procedimenti, e che si è dimostrato essere la stessa cosa del polonio.

Anche il torio manifestò proprietà simili a quelle dell'uranio; l'attività del torio è dovuta alla presenza tenuissima di un principio molto attivo, detto *radiotorio*, e la cui esistenza fu, per primo, rivelata dal Dottor Blanc di Roma.

Infine dalla pechblenda il Debierne estrasse un altro principio attivo, cui diede nome di *attinio*, e che ha ormai un'esistenza accertata dal punto di vista radioattivo, pur non essendo stato definitivamente caratterizzato come nuovo elemento chimico.

È utile notare sin da ora che i diversi principi radioattivi adesso citati si differenziano nei caratteri delle loro radiazioni; e in principio il riconoscere la loro identità o la loro sostanziale differenza era tutt'altro che agevole. I criteri, diciamo così, diagnostici si sono molto perfezionati negli ultimi tempi, e consistono essenzialmente nella legge con cui l'attività del preparato varia col tempo.

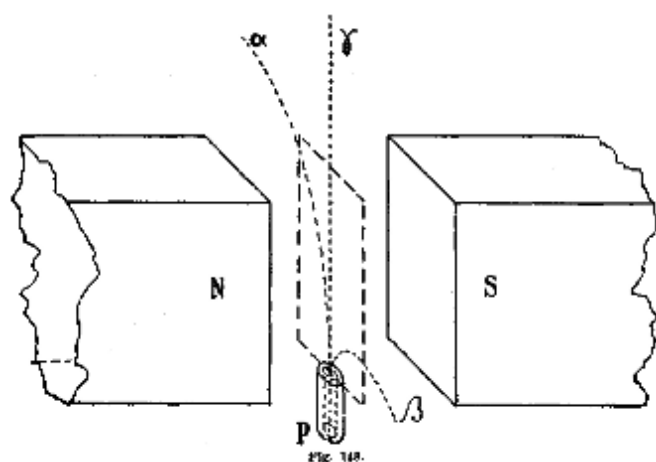
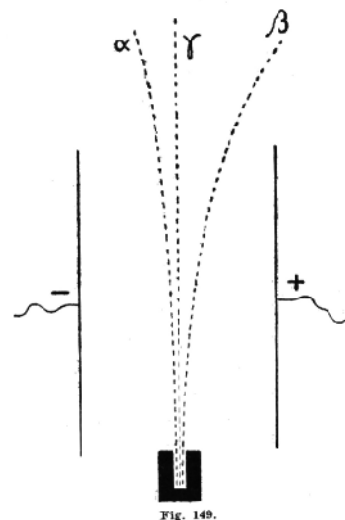
123. **Le proprietà dei raggi α , β , γ .** — Come si è detto esse coincidono con quelle dei corrispondenti raggi osservati nei tubi a vuoto. I raggi α trasportano cariche positive, e vengono emessi con grande velocità; mentre i β trasportano, pure a grandissima velocità, cariche negative; le due specie di raggi equivalgono perciò a due correnti elettriche di senso opposto, e vengono in conseguenza oppostamente deviate da un campo magnetico, come si vede nella fig. 148, nella quale P rappresenta un blocco di piombo munito di un canale cilindrico e avente al fondo un po' di radio.

Dal foro, procede un fascio di raggi multipli, che si propagheranno a grande distanza nel vuoto; il campo prodotto dall'elettrocalamita NS separerà le tre specie di raggi: gli α saranno deviati in un senso, i β in senso opposto, i γ , analoghi ai raggi X, resteranno indisturbati. Un'azione simile esercita un campo elettrico (fig. 149), dimostrando ugualmente che i raggi α trasportano cariche positive, e i β cariche negative: entrambe le cariche son dotate d'inerzia, ma i raggi α son dotati di massa *effettiva*, molto più grande: e si dimostra che la loro deviazione deve risultare molto più piccola, tanto da essere appena osservabile. Nelle figure si è amplificata questa deviazione, per renderla facilmente visibile.

Il *potere penetrante* dei raggi α è piccolissimo, cosicchè bastano pochi centimetri d'aria alla pressione atmosferica per assorbirli completamente, e per osservarli a distanza si deve operare nel vuoto; molto meno essi riescono a traversare i corpi solidi o liquidi; così una laminetta d'alluminio di soli 3 micron di spessore riduce quasi a metà i raggi α del radio. Cosicchè quando il radio è contenuto in un tubetto di vetro, al di fuori non sono constatabili che i raggi β e γ , e ne vengono enormemente ridotte l'attività ionizzante e l'azione fotografica, posseduta in grado molto maggiore dai raggi α che mancano.

Il fisico Rutherford, al quale si devono, dopo la scoperta dei Curie, le ricerche più interessanti sui fenomeni di radioattività, ha dimostrato, col misurare la deviazione elettrica e magnetica, che i raggi α provenienti da tutti i corpi radioattivi *hanno la stessa massa* e che per tutti la particella α coincide con mezzo atomo, o forse con un atomo intero di *elio*, un gas chimicamente inattivo recentemente scoperto.

È diversa invece la velocità con cui i vari corpi radioattivi emettono le particelle α ; essa è in generale all'incirca $\frac{1}{10}$ della velocità della luce.



Inoltre questa velocità va diminuendo a misura che i raggi α traversano dei corpi assorbenti; così traversando l'aria, la loro forza viva, enorme in rapporto alla piccolissima massa, va diminuendo, perchè compie il lavoro di ionizzare gli atomi incontrati, strappandone un elettrone. E quando si riduce a una certa frazione della primitiva, circa ai $\frac{7}{10}$, cessa la loro azione ionizzante e l'azione fotografica, nè ci si rivelano in alcun altro modo; anche la materia ordinaria potrebbe perciò emettere particelle α ,

che non ci si rivelerebbero per la loro insufficiente velocità.

I raggi β , pur essendo in fondo veri raggi catodici propagantisi all'aria libera, sono però in genere molto più penetranti, per quanto lo stesso corpo radioattivo ne emetta insieme dei poco e dei molto penetranti. Si è visto che ciò è dovuto alla diversa velocità iniziale degli elettroni costituenti i raggi medesimi, e che può divenire molto prossima a quella della luce. In generale all'aumentare

della velocità diminuisce il valore di $\frac{e}{m}$, cioè del rapporto tra la carica e la massa apparente,

determinato con le deviazioni elettriche e magnetiche; ciò prova che la massa apparente aumenta con la velocità, e si è trovato che la legge di variazione è ancora adesso esattamente quella prevista dalla teoria nell'ipotesi che si tratti di pure cariche elettriche in moto. Sempre poi quel rapporto è dell'ordine di grandezza trovato coi raggi catodici, come dello stesso ordine è il valore di quel rapporto per gli elettroni in moto dei raggi Lenard, o per quelli che si liberano alla superficie dei metalli col riscaldamento elevato e con l'illuminazione; e infine è ancora dello stesso ordine quello

cui si perviene nella spiegazione dei fenomeni magneto-ottici, fondata sulla ipotesi che i centri vibranti dell'emissione luminosa siano appunto gli elettroni contenuti nell'atomo.

Quanto ai raggi γ sono anch'essi in generale più penetranti dei raggi α ; e accompagnano inseparabilmente i raggi β alla cui intensità sono proporzionali. Si son potuti, ad esempio, ottenere dei preparati radioattivi, come il polonio, che emettono solo raggi α ; ma quando son presenti i β , si trovano pure i γ , cosicchè si ritiene che essi siano costituiti dagli urti dei raggi β contro gli atomi dello stesso corpo radioattivo.

124. **Le emanazioni radioattive.** — Il radio, il torio e l'attinio emettono, oltre ai raggi α , β , γ , qualche cosa di simile a un gas estremamente rarefatto, e dotato di energiche proprietà radioattive; Rutherford che scopre il fenomeno chiamò questa specie di gas *emanazione*.

Le proprietà radioattive dell'emanazione, che si trova in stato di grande diluizione nell'aeriforme, esempio l'aria, rimasto in contatto col corpo radioattivo, si va distruggendo col tempo, seguendo una legge per cui se in un certo tempo l'attività si riduce a metà, la rimanente si riduce nello stesso tempo pure a metà e così via. Questo tempo di riduzione a metà *caratterizza* la provenienza dell'emanazione: ed è di 57 secondi per il torio, di quattro giorni per il radio, di quattro secondi per l'attinio.

Esaminiamo il fenomeno nel caso del radio. La emanazione viene da esso prodotta continuamente, e imprigionata nel sale solido, raggiungendosi l'equilibrio tra quella che si va sempre producendo e quella che si distrugge nello stesso tempo. Ma la emanazione occlusa nel solido può esser portata via interamente, o riscaldando il sale di radio a temperatura elevata, o sciogliendolo in acqua e facendo gorgogliare alquanto aria nel liquido; l'aria si carica così della totalità dell'emanazione. Si constata allora che il sale di radio, ricavabile evaporando la soluzione, ha perduto i tre quarti della primitiva attività, che si è trasferita integralmente nella emanazione estratta. Inoltre il radio residuo emette solo raggi α , mentre l'emanazione emette insieme raggi, α , β , e γ . Ma lasciando a sè il sale *disemanato* e l'emanazione ricavata, nel primo si riforma poco a poco l'emanazione e si ripristinano le primitive proprietà, mentre la seconda perde in corrispondenza le sue; cosicchè dopo circa un mese l'emanazione estratta si è interamente distrutta, e il radio si è nuovamente arricchito della sua provvista normale di emanazione, che può nuovamente esser portata via. Non c'è dubbio perciò che il radio dà in continuazione origine a emanazione, che resta imprigionata nella massa del sale, in regime *d'equilibrio radioattivo* tra quella che si forma e quella che si distrugge. Vedremo però che l'emanazione non si distrugge, in realtà, ma si trasforma a sua volta.

Una proprietà importante dell'emanazione è quella di condensarsi alla temperatura di -150° , permettendo così di essere localizzata, sempre allo stato di grande tenuità, in piccolo volume. E riuscì a Ramsay di dimostrare che essa è un vero gas, simile ai gas inerti come l'argon dell'atmosfera, che obbedisce alla legge di Boyle, e che essa, separata dall'aeriforme con cui è mescolata, per esempio dal miscuglio tonante (idrogeno e ossigeno) che si svolge lentamente dalle soluzioni di radio, si presenta come un gas luminoso, che va progressivamente sparendo, mentre sulle pareti del vetro si condensa un volume triplo di *elio*. Questa scoperta fece grande rumore e diede luogo a molte contestazioni; ma ormai è fuori dubbio che l'emanazione nel distruggersi dà luogo, oltre ad alcuni derivati che incontreremo tra poco, a una continua produzione di elio, dovuta forse all'insieme delle particelle α che va emettendo nella sua azione radioattiva. L'emanazione ha anche uno spettro di righe caratteristico, che permette di qualificarlo come un vero elemento chimico, e che è stato descritto con grande cura da Rutherford.

125. **La radioattività indotta.** — I corpi ordinari, portati in contatto con l'emanazione del radio, del torio o dell'attinio, divengono temporaneamente radioattivi, come fu scoperto contemporaneamente dai Curie, per il radio, e da Rutherford per il torio. Anche questa radioattività indotta nei corpi è *temporanea*, e sembra dovuta al deposito di uno strato estremamente sottile di materia radioattiva alla superficie del corpo, reso molto più facile se il corpo stesso è carico di elettricità negativa. Il fenomeno è estremamente complesso, e solo la geniale laboriosità del Rutherford ha permesso di chiarirlo in tutti i suoi particolari, alla luce della sua celebre **teoria delle**

disintegrazioni radioattive. Secondo questa teoria l'atomo d'una sostanza radioattiva è sottoposto a una continua disintegrazione; e passa da uno stato a un altro per l'espulsione successiva di una particella α , o di una particella α e una β , o anche talvolta senza emissione di raggi. Con una serie d'indagini d'una ingegnosit  grandissima egli   riuscito a tracciare la storia radioattiva della famiglia del radio, dell'uranio, del torio e dell'attinio, stabilendo, col concorso anche di altri autori, delle parentele insospettabili, e abbracciando tutti i complessi fenomeni osservati in un insieme armonico e soddisfacente.

Cos  l'atomo di Uranio, il capo stipite della pi  importante famiglia, si trasforma in Uranio X (che fu isolato dal Crookes) per espulsione di una particella α ; l'Uranio X, attraverso a una serie di lenti prodotti di trasformazione, che comprende forse la serie dell'attinio, darebbe il radio propriamente detto, o radio disemanato; l'atomo di questo, per espulsione d'un'altra particella α , diverrebbe un atomo d'emanazione; l'atomo d'emanazione diverrebbe, per emissione d'una particella α , un atomo di radio A, che   il primo a depositarsi sui corpi dotati di radiotivit  indotta; il radio A si convertirebbe in radio B per espulsione di una particella α , e il B, senza emissione di raggi, in radio C, il quale espellendo una particella α , una β e raggi γ si converte in radio D e cos  di seguito fino al radio F, che per espulsione di un'altra particella α si converte in altri prodotti sconosciuti, perch  non sensibilmente radioattivi. L'ultimo, il radio F, coincide col *polonio* della signora Curie. La fig. 150 presenta un quadro delle successive trasformazioni.

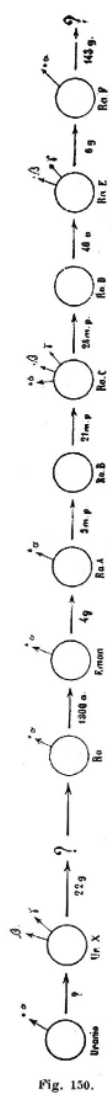


Fig. 150.

La durata delle successive disintegrazioni sarebbe molto diversa; cos  mentre il radio disemanato si converte per met  in emanazione in 1300 anni, l'emanazione si converte in radio A in 4 giorni; e alle successive trasformazioni a met  del radio A e dei suoi successori corrispondono le durate di 3 minuti, e le altre indicate nella figura, fino alla trasformazione di F in 143 giorni, che   appunto la durata a met  caratteristica del polonio.

Nel radio contenuto nei minerali sono presenti insieme tutti i prodotti successivi in *equilibrio radioattivo*; tale cio  che di ciascun prodotto intermedio se ne genera tanto dal precedente, quanto se ne trasforma nel consecutivo. In totale partendo dal radio, e giungendo al radio D si perdono 4 particelle α ; ed   chiaro che l'emanazione e la radiotivit  da essa indotta, che contiene il radio A, il B e il C, presenteranno anche l'emissione di raggi β e γ solo perch  a poco a poco si va formando il radio C, che   un prodotto a rapida trasformazione, e che emette, in questa, raggi α , β , e γ .

Una serie analoga si   trovata per la famiglia del torio.

Noteremo ancora che la discendenza del radio dall'uranio, intuita dal Rutherford, si   potuta ben accertare solo negli ultimi tempi, poich  si   dimostrato che l'uranio, reso privo di ogni traccia di radio, e abbandonato a s , manifesta dopo molto tempo la ricomparsa del radio, che si rivela specialmente per la sua emanazione.

126. Calore svolto dal radio. — Si deve a Curie la scoperta importantissima che il radio sviluppa continuamente calore, in misura costante, qualunque siano le condizioni ambientali, e che non diminuisce col tempo. Il calore svolto   all' incirca di 100 piccole calorie all'ora per ogni grammo di radio.

Questo calore, come pot  dimostrare anche quantitativamente il Rutherford, ha per origine la forza viva delle particelle α espulse con grande velocit  nell'interno del corpo radioattivo e che non giungono all'esterno perch  trattenute dalla stessa sua massa; infatti uno strato di cloruro di radio di soli 10 micron di spessore arresta i raggi α provenienti da maggiore profondit .

Inoltre il Rutherford dimostr  che il calore svolto dal radio   per circa tre quarti emesso dalla emanazione in esso contenuta, e che si va sempre distruggendo e riformando dal radio. L'emanazione contenuta in un grammo di radio in equilibrio radioattivo sviluppa perci  75 calorie all'ora, ma questo calore va diminuendo insieme con l'attivit ; e prima di distruggersi interamente l'emanazione svolge circa 10000 calorie.

Quell'emanazione, isolata come gas, occuperebbe 0,6 mm.³ circa di volume alla pressione atmosferica; e l'energia contenuta è perciò all'incirca otto milioni di volte maggiore di quella svolta dalla combinazione di un pari volume di miscuglio tonante.

Nè ci deve sorprendere questa enorme differenza; i processi radioattivi mettono in giuoco delle provviste di energia *interatomica*, mentre nelle reazioni chimiche si estrinsecano solo le azioni d'affinità tra gli atomi. Ed è anche per questo che l'energia emessa dal radio resta inalterata anche alla temperatura dell'idrogeno liquido, mentre in simili condizioni non si manifestano più quelle reazioni chimiche che alla temperatura ordinaria si compiono con grande violenza.

127. Radioattività diffusa. — L'atmosfera, il suolo, le acque termali o minerali e la materia in generale manifestano in grado tenuissimo le proprietà caratteristiche dei corpi radioattivi. Si deve per esempio a una emanazione analoga a quella del radio e del torio, ed emessa dal suolo, se l'aria atmosferica è sempre provvista di ioni, e se un filo carico di elettricità negativa esposto all'aria acquista una debole, ma misurabile radioattività indotta.

Si van facendo in proposito delle ricerche molto interessanti, ma noi dobbiamo contentarci di questo brevissimo cenno.

128. Vedute generali sulla teoria degli elettroni e la costituzione della materia. — I fenomeni ultimi, da noi passati in rassegna, hanno schiusa una nuova epoca nella storia delle nostre conoscenze sulla costituzione della materia e sulla natura dell'elettricità.

Essi dimostrano da un canto che da sostanze chimicamente diverse è possibile ricavare un componente comune, l'elettrone; e inoltre che questo componente ha una massa incomparabilmente più piccola di quella del leggerissimo atomo d'idrogeno. — La teoria atomica che proclamava nell'atomo l'estremo limite alla divisibilità della materia potè sembrare scossa nelle sue fondamenta.

La verità è però ben diversa.

Non la Chimica aveva asserito la indivisibilità dell'atomo; essa aveva solo affermato che nelle reazioni più svariate l'atomo dei corpi semplici interviene come una individualità persistente e indivisibile, cosicchè le reazioni stesse consistono in pure trasposizioni di atomi interi.

E in questa asserzione nulla c'è da cambiare anche adesso: anzi l'atomo, che poteva prima esser considerato come una concezione puramente ipotetica, ci si rivela ora come entità realmente esistente; ma nel manifestarsi ci avverte che noi lo avevamo battezzato male, e che, chiusa l'era delle disquisizioni sulla costituzione atomica della materia, un nuovo problema si impone alla Scienza: quello della costituzione interna dell'atomo, la cui esistenza è ormai definitivamente assodata.

Non altrimenti avverrebbe di un sociologo, il quale, dopo aver considerato l'uomo come una entità indivisibile nei fenomeni sociali, venisse ad apprendere che anche l'uomo è fisiologicamente costituito di sangue, di muscoli, di nervi e di altri tessuti; per la sociologia esso sarà ancora l'unità indivisibile, mentre altre scienze, l'anatomia e la fisiologia, sorgeranno al fianco di quella, e le potran fornire nuovi lumi e nuove risorse.

Del resto si sospettava già da gran tempo, per ragioni chimiche e fisiche, che l'atomo avesse una costituzione complessa.

Già il Proust, al principio del secolo XIX, aveva tentato di considerare gli atomi dei diversi corpi semplici come formati dalla riunione di diversi atomi d'idrogeno; inoltre la nozione della complessità dell'atomo era in certa guisa implicita nella legge che le proprietà chimiche degli elementi sono una funzione ricorrente, periodica del peso atomico. — Ma soprattutto le ricerche spettroscopiche, dimostrando la complessità dello spettro degli elementi e la sua variabilità, avevano indotto il Lockyer a ritenere che in determinate condizioni elettriche o termiche l'atomo degli elementi venisse dissociato.

Tornando agli elettroni il risultato più essenziale, dovuto alle ricerche di Abraham e Kaufmann, è quello per cui venne dimostrato che l'elettrone è soltanto una particella di elettricità negativa, non associata a un nucleo di vera materia. Adunque è ben vero che dagli atomi dei vari

elementi chimici si può ricavare un comune costituente, l'elettrone, però questo non è più materia, ma pura carica elettrica.

D'altra parte la presenza dell'elettrone entro l'atomo veniva riconosciuta per un ordine d'idee interamente diverso. Agli elettroni dell'atomo poté attribuirsi il suo potere di emettere, in date condizioni, luce di alquanti periodi caratteristici, di possedere cioè uno spettro di righe. Supposto che un elettrone oscilli entro un atomo intorno a una posizione di riposo, per virtù di forze di natura elettrica, esso trasmetterà nell'etere oscillazioni elettromagnetiche, che produrranno effetti luminosi se sono abbastanza rapide.

Questa ipotesi sulla origine degli spettri a righe dei metalli condusse alla importante scoperta di Zeeman, confermando le previsioni fatte teoricamente dal Lorentz.

Altre ricerche, che seguirono alla scoperta del fenomeno Zeeman, permisero poi che su quel fenomeno si fondasse una teoria molto semplice della polarizzazione rotatoria magnetica, la quale si era mostrata ribelle a ogni trattazione teorica. — Si poté così stabilire che agli elettroni vibranti nell'interno dell'atomo son dovute tutte le perturbazioni che la materia determina sulla luce che l'attraversa; come la rifrazione e l'assorbimento inuguale dei raggi di diverso periodo, e quindi la dispersione della luce e la colorazione dei corpi.

La teoria degli elettroni ha permesso inoltre che tutti i fenomeni del passaggio dell'elettricità a traverso i gas venissero raccolti e spiegati in un corpo di dottrina che è uno dei più brillanti della Fisica Moderna. E ne vengono completamente spiegati i caratteri e le proprietà della scintilla elettrica, in piena armonia con la teoria cinetica-molecolare dei gas; la natura dei raggi catodici, dei raggi canali, dei raggi Roentgen.

Ma è più specialmente nel campo della radioattività che la teoria elettronica della materia ha permesso, come si è intravisto dalla nostra breve esposizione, un orientamento sicuro per la ricerca, e una sintesi vasta quanto geniale dell'immenso materiale raccolto.

Tutto l'insieme di queste ricerche conduce alla conclusione: che l'atomo dei corpi radioattivi è in continua, lentissima evoluzione, la quale si è compiuta o si va compiendo senza risentire alcuna influenza dalle condizioni esterne in cui la materia si trova, cosicchè è stato possibile trarre delle induzioni ben sicure sull'epoca della formazione geologica di alcune rocce, fondandosi sul semplice esame fisico del loro contenuto radioattivo.

Anche la materia ordinaria potrebbe emettere, come si è visto, in continuazione particelle α non molto rapide, e sottostare anch'essa a una lenta evoluzione, senza che di ciò noi potessimo constatare alcun indizio. — Questa concezione evoluzionistica della materia è veramente, per le sostanze non radioattive, una ipotesi ardita, e per il momento non necessaria; in verità nessun esempio ci è noto di sostanze che attraverso ai secoli abbian cambiato natura; ma si può ben osservare che, di fronte ai lunghi decorsi di tempo che queste trasformazioni posson richiedere per manifestarsi a noi, le nostre epoche storiche rappresentano una ben misera cosa.

Comunque sia, resta accertato che nella costituzione interna dell'atomo all'elettrone spetta una parte fondamentale; purtroppo manca ancora un modello concreto e soddisfacente del modo come il resto dell'atomo debba ritenersi formato.

Fu per qualche tempo accolta come un tentativo ben promettente una teoria di J. J. Thomson, secondo la quale in una sfera permeabile costituita da elettricità positiva si aggirerebbero in gran numero gli elettroni negativi, in balia delle loro forze mutue repulsive e della forza attrattiva centripeta dovuta alla carica positiva della sfera. Il risultato più interessante della concezione del Thomson riguarda la spiegazione della legge periodica di Mendeleeff, poichè supponendo che il numero di elettroni liberi aumenti progressivamente col peso atomico dell'elemento, essi assumerebbero disposizioni simmetriche, capaci di riprodursi, nei loro caratteri essenziali, a intervalli consecutivi.

La teoria del Thomson, che non può qui essere esposta in tutti i suoi particolari, ridurrebbe la materia alla riunione pura e semplice di cariche elettriche positive e negative. La carica positiva non avrebbe alcun effetto sulla massa apparente dell'atomo, determinata solo dagli elettroni negativi presenti; inoltre la perdita o il guadagno di uno o più elettroni da parte dell'atomo neutro avrebbe

luogo con diversa facilità per atomi diversi; si otterrebbero con ciò gli *atomioni* positivi o negativi che abbiamo incontrato più volte.

Non solo la materia si ridurrebbe così alla riunione di semplici cariche elettriche, ma anche le forze di affinità chimiche che tengono uniti gli atomi nelle molecole avrebbero origine elettrica. Due atomi monovalenti come il Cloro e il Sodio si combinerebbero nella molecola di cloruro di sodio per l'azione elettrica tra l'atomo di sodio che ha perduto un elettrone, e l'atomo di cloro che ne ha guadagnato uno.

Adunque non più materia, ma cariche elettriche; non più affinità chimiche tra elementi diversi, ma sole forze elettrostatiche. — La Chimica intera e tutta la Meccanica e la Fisica e le Scienze che ne dipendono diverrebbero dei capitoli della Elettrologia!

Occorre però ben distinguere in queste ardite speculazioni ciò che è conseguenza immediata della ricerca positiva, da ciò che è anticipazione affrettata verso una sintesi alquanto prematura.

L'atomo è una conquista ormai definitiva, non meno dell'elettrone, del quale conosciamo già la natura puramente elettrica, la carica, la massa apparente e la variazione di questa al cambiare della velocità. La presenza degli elettroni nell'atomo è anch'essa un fatto assodato, che si rivela soprattutto nelle vibrazioni che essi eseguono, e a cui son dovute tutte le manifestazioni luminose della materia.

Gli elettroni possono sfuggire dall'interno dell'atomo, sotto l'azione di agenti speciali; e nei corpi conduttori metallici essi si troverebbero in gran numero vaganti negli spazi intermolecolari, come le molecole di un gas rinchiuso in un vaso; può così spiegarsi la conducibilità dei metalli per la elettricità e quella per il calore, attribuendole al moto degli elettroni. Su queste basi la teoria elettronica dei metalli, quale è stata sviluppata da Riecke, Drude e Thomson, è riuscita a render conto delle relazioni numeriche esistenti tra la conducibilità elettrica e la conducibilità termica della stessa sostanza, oltre che delle forze elettromotrici di contatto e di tanti altri fenomeni.

Esistono però ancora dei punti oscuri, e anche delle contraddizioni non lievi, che turbano l'armonia del meraviglioso edificio, e rendono ancora ben lontana una conoscenza sicura della struttura interatomica.

Così la vera natura del movimento degli elettroni entro l'atomo, capace di fornire una spiegazione soddisfacente delle particolarità degli spettri a righe dei vapori metallici, è ancora poco conosciuta, malgrado le poderose indagini dei Fisici teorici.

Inoltre, mentre secondo la primitiva ipotesi del Thomson in un atomo, per esempio, di mercurio sarebbero contenute molte centinaia di migliaia di elettroni, vaganti in una sfera positiva, secondo altre ricerche dello stesso Autore il numero totale di elettroni non sarebbe molto diverso da quello esprimente il peso atomico dell'elemento, e però ce ne sarebbero solo 200, all'incirca, nell'atomo di mercurio.

Questo risultato crea intanto nuove difficoltà per la spiegazione delle innumerevoli righe osservabili negli spettri dei vapori metallici; ma, quel che è più, porta alla conclusione che dell'intera massa atomica gli elettroni negativi costituirebbero solo una frazione insignificante; e ci resta a spiegare da che cosa può essere formato il resto, cioè quasi l'intero atomo.

Della carica positiva, e del suo sostegno entro l'atomo, noi sappiamo nulla o ben poco. Alcune recenti esperienze dimostrerebbero l'esistenza di particelle cariche di elettricità positiva, aventi anch'esse una massa molto piccola, come l'elettrone negativo. — Ma se si immagina l'atomo come la riunione di moltissimi elettroni positivi e negativi, quanti ne occorrono perchè si ottenga una massa totale corrispondente al peso atomico dell'elemento, si torna in fondo alla primitiva ipotesi del Thomson. Occorrerà perciò, anzitutto, rimuovere le difficoltà cui fu dianzi accennato, e per le quali lo stesso Thomson fu indotto a ritenere che il numero totale degli elettroni nell'atomo non sia molto grande.

Adunque finchè noi non sapremo abbastanza dell'altro componente dell'atomo, che ne è certo la parte più essenziale, non potremo escludere che in esso ci sia qualcosa di puramente materiale, diversa da sostanza a sostanza; e dovremo ritenere che la ipotesi la quale riconduce la materia puramente alle cariche elettriche è ancora ben lungi dall'essere dimostrata. D'altra parte se ogni elemento avesse qualcosa di caratteristico, si dovrebbe ritenere impossibile la trasformazione di un

corpo semplice in un altro qualsiasi; e ciò sembra contraddetto dalla meravigliosa scoperta annunciata dal Ramsay, il quale sarebbe riuscito, partendo dalla emanazione del radio, a ottenere, secondo le circostanze, o elio o argon o neon; e a trasformare con la sua presenza il rame in litio e forse in sodio e potassio.

Ma le esperienze del Ramsay, recentemente oppuguate nell'ultima parte dalla Sig.^a Curie, non possono esser considerate, malgrado l'autorità grandissima del celebre Chimico Inglese, come la prova definitiva che gli atomi dei vari corpi semplici risultano tutti da costituenti comuni.

Certo una tale idea domina ormai lo spirito di quasi tutti gli Uomini di Scienza, in specie dei più giovani; ed è perciò che le esperienze del Ramsay non destarono quel senso di sbalordimento con cui sarebbero state accolte dieci anni or sono; questo prova che l'epoca è matura perchè il sogno degli alchimisti diventi una realtà. Ma non bisogna confondere queste intuizioni piuttosto vaghe con la conoscenza positiva, che scaturisce sicura solo dalla prova dei fatti.

Induzione elettromagnetica. — Oscillazioni elettriche.

129. **Flusso di forza.** — Tracciando in un campo magnetico un numero limitato di linee di forza, tale che in una *data* superficie ad esse normale ne passi per ogni centimetro quadrato un numero eguale, o proporzionale, all'intensità del campo in quel punto, e che perciò la *densità* delle linee di forza risulti nei vari punti della superficie proporzionale all'intensità corrispondente del campo, si prolunghino in tutto il campo quelle linee, e quelle soltanto; si dimostra allora che in ogni punto del campo, e perciò anche fuori la superficie impiegata, la densità delle linee rappresenta l'intensità del campo. Abbiamo chiamato una simile rappresentazione del campo *rappresentazione di Faraday* (§§ 77, 90). Eseguito col pensiero il tracciamento richiesto da questo genere di rappresentazione, immaginiamo nel campo una superficie piana, limitata da un certo contorno; essa sarà traversata da un certo numero N delle linee di forza tracciate. *Questo numero N dicesi flusso di forza attraverso la superficie piana considerata.*

In questa definizione si deve ritenere che le due facce della superficie siano stabilmente contrassegnate, per esempio con due colori diversi. E al flusso si darà un valore algebrico positivo o negativo secondo che le linee di forza penetrano per l'una o per l'altra faccia.

Il flusso di forza attraverso a una superficie può farsi variare in diversi modi: o modificando l'intensità del campo, per esempio alterando la magnetizzazione delle calamite che lo producono, ovvero spostando nel campo la superficie, portandola per es. nelle regioni ove le linee tracciate son più fitte o più rare, ovvero orientando la superficie diversamente nel campo, con che varia il numero di linee che la traversano, e può pure mutare la faccia d'entrata; o anche estendendo o restringendo il contorno della superficie, in modo da includere o escludere alquante linee di forza.

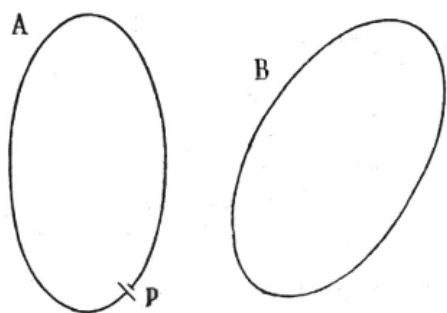


Fig. 151.

Un caso particolarmente importante è quello in cui il campo è creato da correnti elettriche. Siano, ad es., i circuiti A e B, dei quali il primo è percorso da una corrente creata da una pila locale P (fig. 151). Delle linee di forza create dalla corrente che circola in A, alcune traversano la superficie limitata dal contorno B, e generano perciò in B un certo flusso N_B . Se l'intensità della corrente in A si raddoppia, si raddoppierà anche il campo in tutti i punti dello spazio, e quindi la superficie limitata da B sarà traversata da un numero doppio di linee di forza; perciò il flusso in B è proporzionale alla corrente i nel circuito A, e si potrà scrivere

$$N_B = M i$$

ove M è un coefficiente di proporzionalità che dipende dalle dimensioni e dalla forma di A e B, e dalla loro posizione mutua. Lo si chiama *coefficiente d'induzione mutua di A e B*.

Ma anche A sarà traversato da un certo numero di linee di forza, o da un certo flusso N_A , per il campo da esso stesso creato. Lo si chiama *flusso proprio* del circuito A, e risulta anch'esso proporzionale a i , cosicchè si può scrivere

$$N_A = L i$$

ove L è un altro coefficiente di proporzionalità, che si chiama *coefficiente di auto-induzione* di A, e dipende dalla sua forma e dalle sue dimensioni.

In generale si parla indifferentemente di flusso che traversa la superficie, o di flusso abbracciato dal contorno; e poichè in tutti i casi che c'interessano questo contorno sarà costituito da un filo conduttore, si dice anche flusso abbracciato da un circuito o da un conduttore. Ma esistono dei casi in cui questa sostituzione genera delle incertezze che dobbiamo chiarire.

Si abbia in un campo un *solenoid* (fig. 152) costituito da un circuito chiuso: in tal caso il circuito non limita più alcuna superficie. Ma se si suppongono molto fitte le successive spire, cosicchè il principio e la fine di ciascuna siano molto ravvicinati, si potrà ritenere che ogni spira limiti una superficie piana, e considerare separatamente i flussi che traversano le diverse spire, le quali avranno in generale valori diversi.

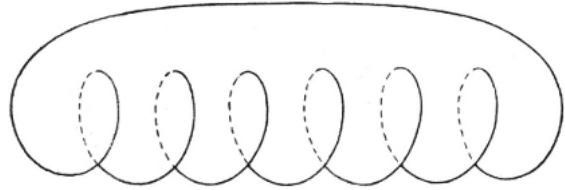


Fig. 152.

Si continua in tal caso a parlare di flusso attraverso al circuito solenoidale, intendendo con ciò, per definizione, la somma dei flussi che traversano le singole spire. Lo stesso dicasi per un solenoide a più strati, come un rocchetto.

E se il solenoide, o il rocchetto, è percorso da una corrente i , esisterà ancora, definito come sopra, un flusso proprio $L i$ e un coefficiente d'autoinduzione L che si calcola con dei procedimenti complicati in Fisica matematica. E si trova che per un solenoide molto lungo il coefficiente L aumenta col quadrato del numero totale di spire e con la loro superficie.

Infine la presenza, in tutto il campo, di un mezzo magnetico avente la permeabilità μ , rende il flusso di forza μ volte più grande. Praticamente lo stesso risultato si ottiene se in un solenoide percorso da corrente s'introduce un nucleo di sostanza fortemente magnetica. È perciò che il flusso proprio viene enormemente accresciuto per l'introduzione nel solenoide, o in un rocchetto, d'un nucleo di ferro dolce.

130. **Induzione.** — Or si deve a Faraday una scoperta capitale: *in un circuito conduttore chiuso disposto in un campo, producendo una variazione del flusso di forza abbracciato dal*

contorno, si sviluppa una corrente elettrica temporanea, che dura finchè dura la variazione del flusso. E se il circuito è interrotto in un punto, si manifesta agli estremi una forza elettromotrice, detta d'induzione, che dura anch'essa finchè dura la variazione del flusso.

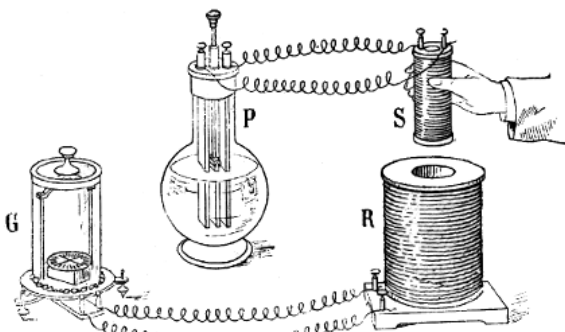


Fig. 153.

Si abbiano ad esempio, come nella fig. 153, un rocchetto S percorso dalla corrente di una pila P, e un altro rocchetto R rilegato a un galvanometro G. Introducendo S in R si constaterà una brusca deviazione dell'ago del galvanometro, che dopo torna alla posizione normale, e resta immobile tenendo S in una posizione invariabile. Estruendo

S, si ottiene una deviazione inversa, anch'essa di breve durata; e se mentre il rocchetto S è all'interno di R si interrompe o si stabilisce la corrente in S, si hanno in R gli stessi effetti come per la estrazione o l'introduzione di S.

Or è facile riconoscere che in tutti e quattro i casi, in cui si è constatato l'effetto, vi è variazione del flusso magnetico creato dal rocchetto *inducente* S nel circuito *indotto* R. Abbiamo da fare in verità, nel rocchetto R, con più spire consecutive elicoidali, anzichè con un contorno unico limitante una superficie piana; ma gli effetti ottenuti nelle singole spire, cioè le singole f. e. m. indotte, in tal caso si sommano, e ne risulta una f. e. m. complessiva tanto più grande quanto più son numerose le spire del circuito indotto. Del resto ricorrendo a un galvanometro sensibile si può constatare l'azione enunciata anche con una sola spira.

Analoghi effetti possono ottenersi introducendo in R una calamita o un'elettrocalamita, come, per es., armando il rocchetto S d'un nucleo interno di ferro. Anzi in quest'ultimo caso le correnti indotte son molto più intense che nel caso in cui il ferro non esisteva.

131. Leggi numeriche dell'induzione. — Quanto al senso della corrente indotta l'esperienza dimostra la seguente legge, formulata, in modo alquanto diverso, da Lenz: *Il senso della corrente indotta è tale che il flusso proprio da essa prodotto attenua la variazione esterna del flusso che l'ha generata.* Così nell'esperienza della figura 153 all'introduzione di S questo tende a creare un certo flusso N in R; ma la corrente indotta è di tal senso da sviluppare in R un flusso proprio opposto ad N ; esso può divenire in principio quasi eguale a N , ma va poi decrescendo, cosicchè il flusso totale in R varia più lentamente da zero a N , e raggiunge il valore finale solo alla cessazione del flusso opposto proprio decrescente. La corrente indotta in R sarà perciò *inversa* a quella di S. All'estrazione del rocchetto S o alla rottura della corrente primaria il flusso in R, se non esistesse la corrente indotta, passerebbe bruscamente dal valore massimo N a zero; invece la corrente indotta crea un flusso proprio, decrescente, che si sostituisce al primo, e per virtù di esso si raggiunge più lentamente il valore zero finale. La corrente sarà perciò nello stesso senso di quella di S.

Quanto al valore della f. e. m. indotta vale, per i circuiti di forma invariabile, la seguente legge detta di *Neumann*: *La f. e. m. indotta è eguale alla variazione del flusso nell'unità di tempo.* Essa perciò sarà maggiore se la variazione si compie in un tempo più breve. Invece: *La quantità d'elettricità che circola nel circuito, durante l'intero processo induttivo, è eguale alla totale variazione del flusso divisa per la resistenza del circuito indotto, qualunque sia la durata della variazione.*

Se si vogliono misurare le f. e. m. in *volta*, e le quantità d'elettricità in *coulomb*, bisogna moltiplicare i risultati ottenuti con le due ultime leggi rispettivamente per 10^{-8} , e per 10^{-1} .

132. Autoinduzione. — Lo stabilire o l'interrompere la corrente in un circuito crea o distrugge il flusso proprio che lo attraversa; e per la legge generale deve pure crearsi una corrente indotta che si opponga, attenuandole, alle variazioni del flusso. Queste correnti furono appunto trovate dal Faraday, che le chiamò *correnti d'autoinduzione*, o *estracorrenti di chiusura e d'apertura*.

In virtù dell'estracorrente di chiusura, la corrente, dopo chiuso il circuito, non raggiunge

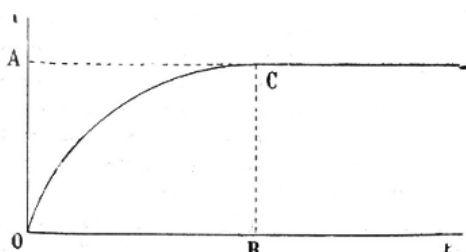


Fig. 154.

istantaneamente il suo valore normale, dato sempre dalla legge di Ohm, ma monta più o meno lentamente, secondo che è maggiore o minore il coefficiente d'autoinduzione. La forma della corrente di chiusura è all'incirca quella della fig. 154; e il valore finale OA viene praticamente raggiunto nei casi ordinari, dopo una molto piccola frazione di secondo. Solo per certi elettromagneti molto potenti il *periodo variabile* corrispondente al tempo OB, può divenire

di alquanti minuti secondi, per l'elevatissimo valore del coefficiente d'autoinduzione.

Molto più complessi sono i fenomeni alla rottura, se questa è ottenuta interrompendo il circuito in un punto. E invero per la rapida variazione della corrente, e quindi del flusso, si crea ai poli dell'interruzione una elevata f. e. m. d'autoinduzione, che stabilisce una specie d'arco luminoso conduttore, o di scintilla, tra i poli medesimi. In ogni caso si ha per effetto che la corrente, invece d'annullarsi bruscamente, *decresce* secondo una curva più o meno ripida. Il caso più semplice è quello in cui, *senza interrompere il circuito*, si sopprime la pila, facendo un *corto circuito* tra i suoi

estremi. Allora la corrente prosegue, sempre decrescendo, nel circuito; e segue una curva identica, come forma, alla OC, ma rovesciata.

Nella fig. 155 OC rappresenta la fase di chiusura, CE la corrente normale, ed EF la corrente finale che segue alla soppressione della pila operata in E.

Invece, per una rottura propriamente detta, la curva corrispondente è sempre molto più ripida di EF, e l'extracorrente dura per un tempo molto più breve.

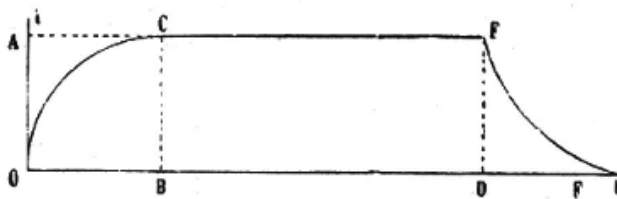


Fig. 155.

133. **Correnti indotte ed energia.** — Riprendiamo a considerare i due circuiti A e B della fig. 151, e supponiamo che in A si trovi un tasto che permetta di stabilire o interrompere la corrente dovuta alla pila P. Nel circuito B si potranno avere correnti indotte o cambiando la posizione mutua dei due circuiti, mentre in A circola la corrente, ovvero lasciandoli in una posizione costante e chiudendo o aprendo il circuito A. Or queste correnti indotte in B vi svolgeranno calore, o potranno produrre altri effetti. Donde proviene l'energia così ottenuta?

Il principio della conservazione dell'energia ci dice che questa produzione di correnti indotte non può essere gratuita. Nel caso del movimento è però facile riconoscere la sorgente dell'energia ottenuta: e invero appena il circuito B comincia a esser percorso dalla corrente, i due circuiti agiscono elettromagneticamente tra loro, come due lamine magnetiche, e si può riconoscere sulla base della legge di Lenz (§ 131), che qualunque sia il senso del movimento le forze elettromagnetiche si oppongono ad esso, e per compirlo loro malgrado *noi dobbiamo eseguire un lavoro*.

Eguagliando l'espressione del lavoro compiuto, e dell'energia elettrica sviluppata, si perviene all'enunciato della legge di Neumann, che è pure, come sappiamo, conforme all'esperienza. Nè poteva esser diversamente. In tutti i casi adunque in cui la corrente indotta è ottenuta per virtù di movimento, (questo avviene, ad esempio, nelle macchine dinamo-elettriche) essa è prodotta a spese del lavoro meccanico impiegato per eseguire il movimento. Ed è perciò che mentre le dinamo quando non creano corrente, cioè a circuito aperto, si possono tenere in moto con piccole potenze, destinate solo a vincere gli attriti, durante la produzione della corrente normale han bisogno dell'intervento di potenti motrici a vapore o a gas, capaci di sviluppare rilevantisime quantità di lavoro.

L'origine dell'energia delle correnti indotte è meno evidente quando esse son dovute a variazioni d'intensità della corrente inducente, o al suo stabilirsi, o al cessare. Ma si può dimostrare che in tal caso il lavoro è compiuto dalla pila P, e che perciò il lavoro chimico compiuto da questa serve, insieme, per l'energia elettrica convertita in calore nel circuito A e nel circuito B.

Il meccanismo è il seguente. Nella fase normale del passaggio della corrente di regime (tratto CE della fig. 155) il lavoro della pila è svolto integralmente nel circuito A come calore Joule; invece nel periodo variabile di chiusura OC la pila lavora un po' meno, ma il circuito A si scalda *molto* meno che nel regime normale.

E perciò c'è una frazione del lavoro compiuto dalla pila, durante il periodo variabile, che non si ritrova in A come calore, ma che serve in parte a sviluppare l'energia della prima corrente indotta in B, e per il resto rimane accumulata allo stato potenziale nel sistema dei due circuiti, o meglio nel *campo creato da A*, e viene restituita, come corrente di apertura in B e come extracorrente in A, qualora si sopprima bruscamente la pila. Di tutto ciò si dà esatto conto nella teoria.

Adunque la creazione d'un campo magnetico nello spazio implica l'impiego e l'immagazzinamento d'una certa quantità d'energia, che sarà restituita, come energia di correnti indotte nei circuiti presenti entro il campo, quando questo si annulla, per esempio per soppressione delle pile che intrattengono le correnti generatrici del campo, o per interruzione dei rispettivi circuiti. Si noti però che l'energia spesa per creare il campo viene impiegata solo all'atto della sua creazione, e non ne occorre altra per mantenerlo; il lavoro compiuto nel regime permanente dalle

pile serve solo a scaldare i fili percorsi dalle correnti permanenti, mentre l'energia accumulata nel campo resta costante.

Or si dimostra che l'energia intrinseca dell'intero campo creato da un circuito che abbia il coefficiente d'autoinduzione L , e sia percorso dalla corrente i , è data da

$$\frac{Li^2}{2}$$

Essa viene spesa nello stabilire la corrente, e integralmente restituita nell'extracorrente d'apertura, alla interruzione della corrente medesima.

Da questo punto di vista un circuito percorso da corrente può paragonarsi a una massa in moto; questa richiede un lavoro per acquistare una certa velocità, lo conserva come forza viva e lo restituisce integralmente nel ridursi in quiete. L'analogia è molto più intima e profonda di quel che già apparisce a prima vista. E la proprietà degli elettroni di possedere una massa apparente per virtù del loro movimento, ha appunto per causa il fenomeno dell'induzione.

134. Noi faremo un'applicazione immediata dell'analogia tra un circuito induttivo percorso da corrente, e una massa in movimento, per dedurre la spiegazione della **scarica oscillante di un condensatore**.

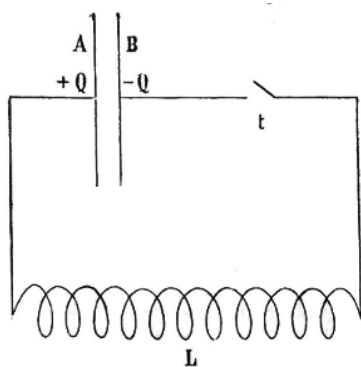


Fig. 156.

Sulle armature A, B d'un condensatore di capacità C (fig. 156) si abbiano le cariche $+Q$, $-Q$ corrispondenti alla differenza di potenziale V tra A e B: nel condensatore sarà accumulata la energia elettrostatica $\frac{1}{2} Q V$.

Per mezzo del tasto t si chiuda il circuito di scarica, dotato d'un notevole coefficiente d'autoinduzione L , e di resistenza elettrica che supponiamo per ora trascurabile. Si stabilirà la corrente con una certa lentezza, per l'autoinduzione L , e contemporaneamente andrà diminuendo la differenza di potenziale V tra A e B; avremo perciò diminuzione di energia elettrostatica e creazione di energia intrinseca elettromagnetica nel circuito L . A un certo punto la prima sarà del tutto sparita, e si sarà trasformata integralmente in energia elettromagnetica; detta perciò I l'intensità della corrente in quell'istante sarà

$$\frac{1}{2} Q V = \frac{L I^2}{2}$$

Ma la corrente I così stabilita prosegue per inerzia elettromagnetica, cioè come extracorrente, e continua a trasportare cariche dall'armatura A all'armatura B che erano già scariche, cosicchè il condensatore *si carica in senso inverso*, e l'energia elettromagnetica si torna a trasformare in energia elettrostatica; quando la trasformazione è compiuta la scarica si riprende in senso inverso al precedente, e così il fenomeno si proseguirà indefinitamente, per le trasformazioni reciproche dell'energia elettrostatica $\frac{1}{2} Q V$ e dell'elettromagnetica $\frac{1}{2} L I^2$, come avviene nelle oscillazioni d'un pendolo, per la trasformazione dell'energia potenziale e della forza viva della pallina.

Ma il circuito L ha sempre una certa resistenza, e quindi a ogni scarica che lo traversa, in qualunque senso, sciupa una certa quantità di energia che converte in calore; lo stesso avviene nel pendolo per l'attrito del mezzo in cui si muove; e, come nel caso del pendolo, si può riconoscere che l'effetto della dissipazione di energia nel conduttore consisterà in un progressivo smorzamento delle oscillazioni della corrente; questa rappresentata graficamente avrà la forma della figura 157.

Finchè lo smorzamento delle oscillazioni non è molto grande la durata delle oscillazioni è data dalla formola

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

nella quale L denota il coefficiente di a. i. e C la capacità; questa formola ci dice che le oscillazioni divengono sempre più rapide diminuendo l'a. i. del circuito di scarica e la capacità del condensatore.

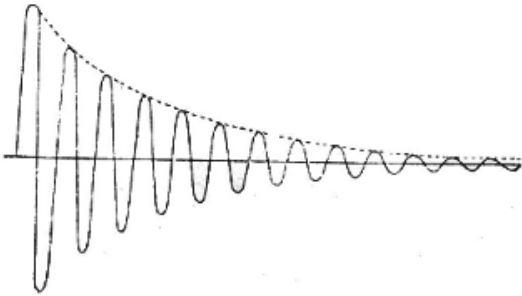


Fig. 157.

Il carattere oscillatorio viene a mancare quando la resistenza del circuito di scarica è molto elevata; così come spostando un pendolo dalla posizione di riposo in un mezzo molto vischioso, esso vi ritorna lentamente, senza oltrepassarla. Ma con resistenze piccole nel circuito di scarica le oscillazioni elettriche sono state osservate, sia con metodi speciali che permettono di tracciare automaticamente la forma della corrente, sia osservando con lo specchio girante a grande velocità

l'aspetto della scintilla. Così hanno ottenuto delle bellissime fotografie di scintille i Proff. Battelli e Magri; esse mettono nettamente in luce il carattere oscillatorio della scarica, e han permesso di verificare la formola che dà il periodo anche con oscillazioni rapidissime, di un milione a ogni minuto secondo.

135. Oscillazioni elettriche rapidissime. — Ma quando si rinunzi alla risoluzione della scintilla con lo specchio girante si possono ottenere oscillazioni ancora più rapide. E invero è già oscillatoria la scarica di due conduttori isolati, a diverso potenziale, quando scocca tra loro una scintilla.

In tutti questi casi è rapidamente variabile, con la corrente di scarica, anche la differenza di potenziale tra le armature del condensatore o tra i due conduttori. Si creerà perciò nello spazio circostante un campo elettrico e magnetico rapidamente variabile. Or si deve a Maxwell la dimostrazione teorica di questa proprietà importantissima dei campi variabili: che cioè le variazioni non si risentono in tutto lo spazio nel medesimo istante, ma con un certo ritardo, che è sempre più grande per i punti più lontani; cioè la perturbazione non si propaga istantaneamente, ma con una velocità finita, che è però molto grande. Maxwell dimostrò che questa velocità coincide con la velocità della luce.

È chiaro perciò che le oscillazioni del campo elettrico e magnetico non saranno sincrone in tutto lo spazio; e che perciò, come alle oscillazioni d'un corpo sonoro nell'aria corrisponde la formazione di onde sonore, anche alle oscillazioni elettriche della scarica di due conduttori a diverso potenziale corrisponderanno delle onde elettriche nello spazio. Il mezzo che presiede alla trasmissione ritardata delle variazioni del campo è lo stesso etere che trasmette le onde luminose; e anzi si è potuto negli ultimi tempi dimostrare che le onde luminose sono appunto onde elettriche di grandissima rapidità, che hanno per origine analoghe oscillazioni elettriche nella sorgente luminosa, e consistenti in vibrazioni degli elettroni entro l'atomo.

Si deve al Fisico Hertz la conferma sperimentale e l'estensione teorica delle vedute di Maxwell. Egli dimostrò con artifici molto ingegnosi che alle oscillazioni elettriche della scarica di due conduttori isolati attraverso una scintilla corrispondono delle vere onde, che si propagano con le leggi delle onde luminose. Malgrado la grande velocità di propagazione, Egli riuscì a creare oscillazioni così rapide che, nella durata di una, il cammino percorso nell'aria fosse appena di qualche metro; il che dimostra che quella durata era di circa un trecentomillesimo di secondo. Ma il nostro Prof. Righi riuscì, con una particolare forma data al suo celebre *oscillatore*, a produrre onde molto più corte, di un paio di centimetri. E poté con esse riprodurre tutte le esperienze d'ottica sulla riflessione, la rifrazione, l'interferenza, la diffrazione, ecc.

Sembra ormai accertato che nient'altro distingue queste onde elettriche dalle onde luminose se non la loro lunghezza d'onda alquanto maggiore; dalle più lunghe onde luminose finora sperimentato da Rubens (60 micron), alle più corte onde elettriche (quelle di 2 mm ottenute da Bose) l'intervallo è all'incirca metà dell'ampiezza totale dello spettro invisibile ultrarosso che noi conosciamo. Un'altra differenza si ha nei mezzi rivelatori delle onde; mentre noi ci serviamo del

bolometro per le onde termo-luminose, si suol ricorrere a ricevitori più adatti per le onde elettriche. Citeremo il *ricevitore o risonatore* di Righi, consistente in una sottile strisciolina d'argento deposta su vetro, che ha un piccolo solco trasversale a metà, cosicchè tra le due parti è interrotta la comunicazione metallica; la strisciolina ha come lunghezza all'incirca metà della lunghezza dell'onda; ed esposta all'azione di queste diviene sede di oscillazioni elettriche locali, per risonanza, e manifesta delle scintilline brillantissime nel taglio che interrompe la comunicazione metallica tra le due metà. Su un principio analogo funzionavano i *risonatori* di Hertz.

Un altro mezzo molto sensibile per rivelare le onde elettriche consiste nel farle agire su un blocchetto di polvere metallica, disposta tra due laminette metalliche, che fan parte d'un circuito con una pila e un galvanometro poco sensibile. La polvere oppone ordinariamente una grande resistenza elettrica, per gl'incerti contatti tra i granelli successivi; ma sotto l'azione delle onde, per un meccanismo ancora non ben conosciuto, essa diviene molto conduttrice, e si ottiene così una forte deviazione al galvanometro. Una piccola scossa restituisce alla polvere la primitiva resistenza. Un tale apparecchio, che ha ricevuto molti perfezionamenti utilissimi, dicesi *coherer*.

Altri artifici numerosi sono stati proposti e utilizzati per rivelare le onde, in vista specialmente dell'applicazione di queste alla telegrafia senza fili, di cui daremo un cenno più in là.

136. Il rocchetto di Ruhmkorff. — Serve per ottenere, utilizzando i fenomeni dell'induzione, delle elevatissime forze e. m., capaci di dar luogo a scintille molto lunghe, senza far uso delle macchine elettrostatiche.

Sullo stesso nucleo di ferro sono avvolti pochi strati di filo grosso, rilegati a una pila e a un interruttore, e moltissimi strati di filo sottile che fanno capo a due palline P, P (fig. 158). Chiudendo

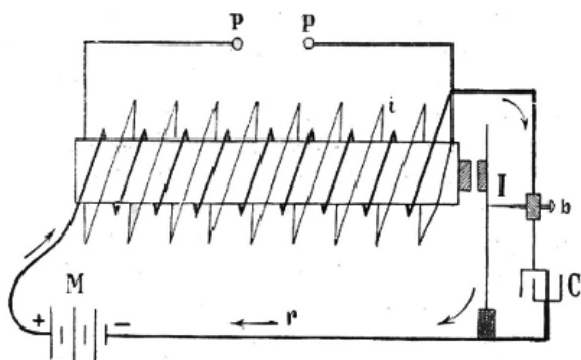


Fig. 158.

o interrompendo il circuito grosso (primario) viene indotta una f. e. m. nei circuito fine (secondario), la quale è molto elevata per il valore grandissimo acquistato dal flusso e per le sue rapide variazioni. La chiusura e l'interruzione della corrente primaria ha luogo automaticamente e a brevissimi intervalli; invero la corrente che proviene dalla pila M traversa il primario, e, per la punta I in contatto con una laminetta, ritorna alla pila. La laminetta è provvista d'un'appendice in ferro, affacciata al nucleo di ferro principale; cosicchè, appena la corrente passa e il ferro viene magnetizzato, la

laminetta è attirata, si stacca da I e interrompe il circuito. Con ciò la corrente primaria viene a cessare, e con essa la magnetizzazione del nucleo: la laminetta ritorna perciò, per la sua elasticità, in contatto con I; e ristabilisce la corrente, per poi interromperla ancora una volta e così via. A ogni chiusura e a ogni apertura si sviluppa agli estremi del secondario una f. e. m. indotta, che cambia di senso nelle due fasi successive.

La variazione del flusso è piuttosto lenta alla chiusura; perciò la f. e. m. di chiusura è piuttosto debole, e coincide all'incirca con la f. e. m. della pila moltiplicata per il rapporto tra il numero di spire secondarie e quello delle primarie. Questo rapporto è all'incirca 100 nei buoni rocchetti moderni, e perciò la f. e. m. di chiusura è solo 100 volte più grande di quella della pila.

Ma alla rottura, se questa si compie molto rapidamente, la f. e. m. può divenire incomparabilmente più elevata. Si è trovato utile a questo scopo far avvenire l'interruzione in un liquido isolante anzichè nell'aria, con che la coda EF della corrente primaria (fig. 155) viene molto ridotta e l'annullamento del flusso si compie molto più rapidamente. Ma l'artificio migliore consiste nel rilegare ai poli dell'interruzione, cioè tra la punta e la lamina, un condensatore C (fig. 158). Con ciò la scintilla d'extracorrente primaria viene rapidamente estinta, e la f. e. m. d'apertura nel primario è invece impiegata a caricare il condensatore. Si producono così a ogni apertura delle vere oscillazioni elettriche, tra il primario e il condensatore, e il flusso varia alternativamente, col periodo di quelle oscillazioni. Si otterrà quindi nel secondario una f. e. m. molto elevata e di carattere pure oscillatorio.

In ogni istante del periodo variabile d'apertura o di chiusura, se il secondario non è percorso da corrente ma costituisce un circuito aperto, la f. e. m. ai suoi estremi è eguale a quella variabile che esiste ai poli del primario moltiplicata per il solito rapporto tra i numeri di spire secondarie e primarie, che è come si è detto all'incirca eguale a 100. Si son costruiti rocchetti capaci di dar luogo, alla rottura del primario, a scintille di 1 metro e 20 centimetri tra gli estremi del secondario. Ma anche i rocchetti che si trovano nelle più modeste scuole di Fisica producono con facilità scintille di qualche decimetro.

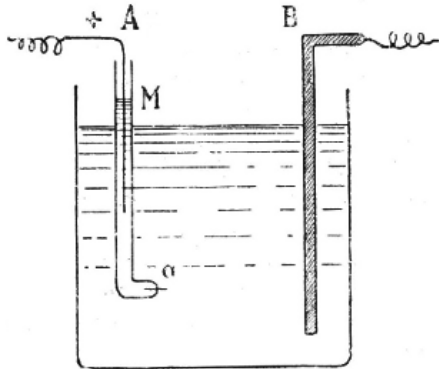


Fig. 159.

elettrodi: uno di piombo a grande superficie, e l'altro consistente in un corto filo di platino *a* che sporge da un tubetto di vetro chiuso in fondo, e contenente mercurio. L'apparecchio si rilega nel circuito primario come nella fig. 160, avendo cura di connettere il filo di platino dell'interruttore col polo positivo della pila, la quale in questo caso deve avere una tensione elevata.

Chiudendo il tasto si constata che la corrente primaria viene interrotta e ristabilita un numero grandissimo di volte a ogni minuto secondo (fino a 2000 all'incirca) e perciò scocca agli estremi del secondario un torrente fragoroso di scintille frequentissime, che per la loro successione rapida producono un suono di altezza corrispondente al numero delle interruzioni.

Si è dimostrato che le interruzioni della corrente primaria si compiono proprio al posto della punta di platino pescante nell'acido, che si presenta luminoso di luce rosea, mentre uno sconvolgimento molto vivo si manifesta nella massa del liquido, prendendo origine dalla produzione tumultuosa di bolle gassose nella punta medesima.

Con questo interruttore non occorre più il condensatore ai suoi estremi. Il funzionamento dell'apparecchio è stato completamente spiegato, ma noi non possiamo riferire le osservazioni che si son fatte in proposito. Diremo solo che l'interruzione della corrente è dovuta all'elevato riscaldamento del liquido, in contatto con la punta, prodotto dalla corrente; che perciò il liquido si vaporizza bruscamente, e la guaina di vapore interrompe la corrente; dopo di che il vapore si ricondensa, il liquido torna in contatto col filo di platino, e il fenomeno si riproduce periodicamente.

137. Correnti di Foucault. Trascinamento dei conduttori da parte di un campo rotante.

— Muovendo un blocco conduttore in un campo si destano nella sua massa, per induzione, delle correnti chiuse, le quali, reagendo sul campo, si oppongono ai moto. Così un disco di rame, mosso in un campo, ne risente una azione di freno, come se fosse in un mezzo viscoso. Il lavoro eseguito nel movimento si trasforma in calore nella massa metallica.

A queste correnti indotte nella massa si dà il nome di correnti di Foucault. Esse costituiscono una grave causa di perdita di lavoro meccanico, quando, come nelle dinamo, insieme coi fili ove si sviluppano le correnti utili, bisogna muovere delle masse metalliche, cioè i nuclei di ferro su cui i fili sono avvolti. E occorre perciò frazionare la massa conduttrice, con l'interposizione di strati isolanti convenientemente orientati, che impediscano la circolazione delle correnti di Foucault. Per la stessa ragione il nucleo di ferro del rocchetto di Ruhmkorff è costituito da fili verniciati, poichè essendo sottoposto a magnetizzazioni intermittenti, per l'interruzione periodica della corrente

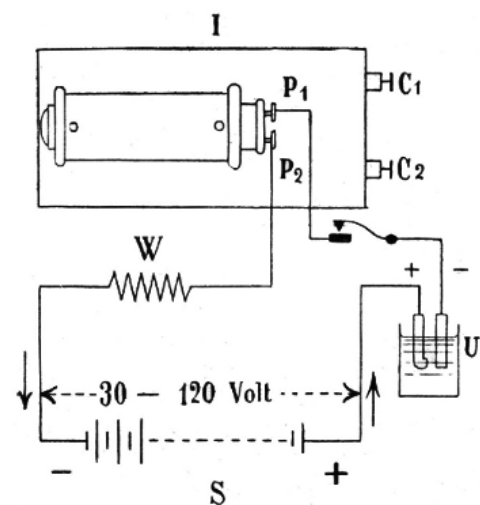


Fig. 160.

primaria, in un nucleo massiccio si desterebbero delle correnti circolanti come quelle delle spire indotte, e che dissiperebbero in riscaldamento nocivo del nucleo l'energia elettromagnetica di rottura, che si vuol invece raccogliere, come corrente indotta, nel secondario. Lo studio di queste correnti parassite, e dei mezzi per evitarle, ha avuto grande estensione in Elettrotecnica.

Tornando alle azioni dovute al movimento, è chiaro che le correnti son prodotte dal movimento *relativo* del conduttore e del campo; e come s'incontra un ostacolo a girare un disco al di sopra di una forte calamita ad esso parallela, così si dovrà compiere un lavoro per girare la calamita mentre il disco è fermo, come se tra la calamita mobile e il disco fermo esistessero dei filamenti elastici. E si può costatare un'azione interessante, che ha avuto grandi applicazioni nei cosiddetti *motori asincroni*: imprimendo un moto di rotazione alla calamita intorno a un asse verticale e rendendo mobile intorno allo stesso asse il disco sottostante, questo comincia a girare, più lentamente, nel medesimo senso, come se fosse trascinato dalla calamita. E così se si imprime un moto al disco (fig. 161) viene trascinato il magnete *ab* soprastante. Si tratta anche qui di azioni tra il magnete, e le correnti che il suo moto desta nella massa del disco.

Il magnete in rotazione genera nello spazio un *campo rotante*. Noi vedremo come si può ottenere lo stesso effetto coi campi generati da diverse correnti di variabile intensità, e circolanti in circuiti fissi.

ELETTROTECNICA

Produzione industriale della corrente elettrica.

138. **Pile.** — Abbiamo visto che l'energia elettrica può essere ottenuta a spese di energia chimica, come nelle pile idroelettriche, di energia termica, come nelle pile termoelettriche, o infine di energia meccanica, come nelle macchine dinamo-elettriche.

Del secondo modo non ci occuperemo in questo capitolo, perchè esso non ha avuto convenienti applicazioni industriali. Le pile termoelettriche sono disgraziatamente, finora, apparecchi di limitatissima potenzialità e di assai piccolo rendimento. La trasformazione diretta, e in buone condizioni, dell'energia termica in energia elettrica porterebbe una vera rivoluzione nel campo delle applicazioni, e avrebbe una portata pratica incalcolabile, ma essa è purtroppo un pio desiderio.

Può invece riuscire utile un accenno sui tipi di pile idroelettriche più comunemente impiegati.

Della pila di Volta, costituita da un bicchiere di acqua acidulata nella quale pescano una lamina di rame e una di zinco, abbiamo già detto. Una tale pila però dà luogo a una corrente che si indebolisce rapidamente. Questo indebolimento è dovuto a parecchie cause, che noi dobbiamo cercare di eliminare. Anzitutto la soluzione di acido solforico si va lentamente esaurendo, per la produzione di solfato di zinco. Tale inconveniente si produce però dopo un tempo non breve. Un'altra causa molto grave di indebolimento risulta da quanto abbiamo detto parlando dell'elettrolisi. Infatti la pila di Volta, mentre è per l'esterno un generatore di corrente, viene traversata internamente dalla stessa corrente che essa produce; poichè la corrente che va esternamente dal rame allo zinco si chiude attraverso il liquido della pila, come in un vero voltmetro, circolando *in essa* dallo zinco al rame.

In conseguenza il liquido viene decomposto, e l'idrogeno vien trasportato dalla corrente sulla placca di rame. Contemporaneamente si produce il fenomeno della polarizzazione, cioè l'idrogeno depositato sulla lastra di rame tende a dare una corrente opposta alla principale, indebolendo così quest'ultima.

Per convincerci che le cose vanno proprio così basta ritirare la lastra di rame, e stropicciarla fortemente, in modo da portar via l'idrogeno che vi si è depositato; si vedrà allora che la corrente acquista il grande valore di prima.

A impedire la polarizzazione, e il conseguente indebolimento della pila, bisogna adunque evitare che l'idrogeno, trasportato dalla corrente interna, vada a depositarsi sulla lastra di rame, cioè sulla lastra che *esternamente* funziona da positiva.

Si ottiene lo scopo con le pile a due liquidi; in uno, il *liquido eccitatore*, che può essere una soluzione qualunque attaccante lo zinco, si introduce la lamina di questo metallo, mentre la lamina positiva, di rame o di platino o di carbone, si introduce nell'altro, *nel liquido depolarizzatore*, il quale, per la sua reazione chimica con l'idrogeno che si sviluppa, ne impedisce il deposito sulla stessa.

Per impedire ai due liquidi di mescolarsi, pur permettendo all'elettricità di circolare, si ricorre o a dei vasi di separazione in porcellana non verniciati o a qualche altro mezzo.

Queste condizioni sono realizzate più o meno convenientemente nella serie ormai illimitata delle nuove pile inventate. Ne descriveremo alcune.

139. **Tipi di pile a due liquidi.** — PILA DANIELL. — In un bicchiere di vetro (fig. 162) è contenuta la soluzione di acido solforico, e la lamina di zinco Z in forma di cilindro cavo. Entro questo è immerso un vaso poroso contenente una soluzione satura di solfato di rame, e un cilindro cavo di rame C. In questa pila l'idrogeno, invece di depositarsi sul rame, reagisce col solfato di rame, producendo acido solforico e rame metallico, che si deposita sulla lamina, senza inconvenienti, evitando la polarizzazione.

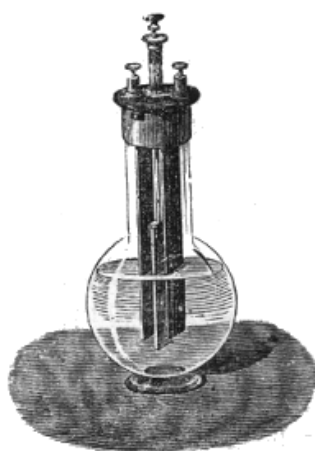


Fig. 163.

Nella pila Daniell si può ricorrere, invece che a una soluzione di acido solforico, a una soluzione di solfato di zinco (pila Carrè). La f. e. m. di una pila Daniell è di circa 0,98 Volta; la sua potenza specifica è di circa 0,3 Watt per ogni chilogrammo di peso della pila completa.

PILA BUNSEN. — Invece della soluzione di solfato di rame il liquido depolarizzante è costituito da acido nitrico; la lamina positiva è un prisma di carbone di storta.

In questa pila e nella precedente, per fare che lo zinco sia attaccato dal liquido eccitatore solo quando la pila è traversata dalla corrente, e in ragione della quantità di elettricità passata, il che è di grande importanza dal punto di vista economico, bisogna *amalgamare* la superficie dello zinco, cioè, mentre questa è ben pulita, stropicciarvi sopra del mercurio.

La pila Bunsen ha una f. e. m. di circa 1,8 volta. L'acqua acidulata deve contenere 1/20 in volume di acido solforico. L'acido nitrico deve essere concentrato a più di 30° Beaumé.

In queste condizioni la pila, per il passaggio della corrente di un ampère durante un'ora, consuma 1,3 grammi di zinco.

PILA GRENET. — In questa pila (fig. 163) il liquido depolarizzante è mescolato al liquido eccitatore; si ottiene tale miscuglio sciogliendo gr. 100 di bicromato di potassio in un litro di acqua bollente con gr. 50 di acido solforico.

Gli elettrodi sono uno di carbone e uno di zinco in lastre molto vicine; siccome lo zinco è attaccato anche in circuito aperto, un dispositivo semplice lo solleva dal liquido quando la pila non è in funzione. Questo elemento e i suoi derivati son poco economici nel funzionamento, ma permettono, per poco tempo, di aver correnti assai intense; infatti la loro f. e. m. è superiore a 2 volta, e la resistenza che oppone il liquido al passaggio della corrente è ben piccola, per l'assenza del vaso poroso, e la vicinanza degli elettrodi.

PILA LECLANCHÈ. — Questa pila (fig. 164), utile solo per correnti di breve durata, ha per liquido eccitatore una soluzione di cloruro di ammonio (sale ammoniaco) in cui pesca la bacchetta di zinco; e per depolarizzatore un miscuglio solido di coke polverizzato e biossido di manganese, circondante un prisma di carbone di storta.

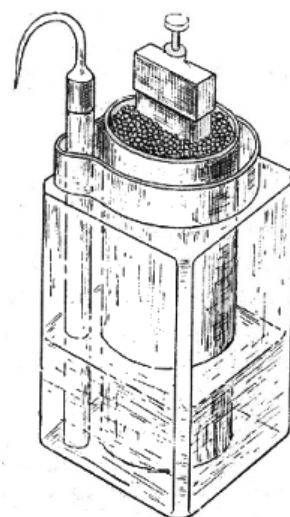


Fig. 164.

140. **Osservazioni generali sulle pile.** — In tutte le pile usuali si utilizza l'energia chimica dello zinco, che per il passaggio della corrente si scioglie nel liquido eccitatore. Per ogni ampér-ora

di quantità di elettricità circolata si dovrebbe distruggere teoricamente 1,2 gr. di zinco; abbiamo visto che in una pila Bunsen ben montata il consumo non supera 1,3 gr. Il consumo non è quindi gran che superiore al minimo teorico, corrispondente al miglior rendimento. Passando all'energia svolta, equivalente all'energia chimica dello zinco trasformato in sale, la pila idroelettrica è di un rendimento elevatissimo di fronte a quello della macchina a vapore, poichè tale rendimento può raggiungere il 90 per cento⁴. Pur tuttavia, come notammo in principio, le pile idroelettriche non sono molto convenienti industrialmente, poichè i corpi utilizzati son piuttosto costosi.

In quanto alla potenza che può svolgere la pila per ogni Kg. del suo peso, essa può divenire, nella pila Rénier, di 10 watt per Kg., mentre nella pila Daniell, come abbiamo visto, è solo di 0,3 watt per Kg.

141. Accoppiamento delle pile. — Una pila introdotta in un circuito vi stabilisce l'azione della sua f. e. m., ma nello stesso tempo accresce la resistenza totale, poichè alla esterna aggiunge la propria. Due elementi dello stesso tipo e di dimensioni differenti hanno la stessa f. e. m., ma resistenza interna diversa; quindi la loro introduzione in un circuito può produrre, nei vari casi, effetti diversi. Per esempio in un circuito avente una resistenza grandissima un elemento grande o piccolo produce sensibilmente lo stesso effetto, mentre, quando la resistenza esterna è molto piccola, è molto più efficace una pila di grandi dimensioni.

Volendo far agire, per accrescere gli effetti, un certo numero di pile, esse si possono disporre in vari modi: o rilegare tutti i poli positivi a un estremo del circuito e i poli negativi all'altro; le pile si dicono allora disposte in *quantità* o in *parallelo*; ovvero rilegare il polo positivo di una pila col negativo della successiva, e attaccare gli estremi del circuito di utilizzazione al positivo della prima e al negativo dell'ultima. In questo caso la corrente traversa successivamente i vari elementi, e questi si dicono rilegati in *serie* o in *tensione*.

Nel primo caso l'insieme delle pile equivale a un'unica pila avente la f. e. in. di una sola, e una superficie interna molto più grande, e quindi una resistenza interna molto più piccola. Questo modo di accoppiamento converrà quando il circuito esterno ha una resistenza piccolissima.

Invece nel secondo caso la resistenza complessiva delle pile è la somma delle resistenze di ciascuna di esse; e la forza e. m. è pure la somma delle f. e. m. di ognuna. Converrà questo tipo di accoppiamento quando la resistenza esterna sia molto grande.

Si può infine ricorrere a un accoppiamento misto, nel quale si ha la riunione in quantità di parecchi gruppi, in ciascuno dei quali gli elementi son rilegati in serie. Si dimostra che, disponendo gli elementi dati in tutti i modi possibili, si ottiene la maggiore intensità di corrente quando la resistenza esterna è eguale alla resistenza complessiva del sistema delle pile, nel tipo d'attacco scelto.

142. Accumulatori. — Si immaginino immerse in un bicchiere contenente acqua acidulata due lamine, p. es., di rame; se si fa passare una corrente elettrica attraverso a questa specie di voltmetro, esso si polarizzerà, diverrà cioè capace, cessata la corrente principale, di generare una corrente inversa, però di breve durata. Durante il passaggio di questa corrente inversa, nella lamina ove prima si sviluppo l'idrogeno, causa della polarizzazione, si svilupperà ora l'ossigeno, il quale, combinandosi poco a poco con l'idrogeno precedentemente accumulato, annullerà la polarizzazione, e quindi la corrente inversa che ne era l'effetto.

Un tale apparecchio costituisce il più semplice *accumulatore*, un apparecchio cioè che trasformi l'energia elettrica in energia chimica, accumulando quest'ultima, e che sia poi capace di restituirla nuovamente sotto forma di energia elettrica.

La potenzialità dell'accumulatore, cioè l'energia che esso è capace di accumulare e poi di restituire, dipenderà, per quanto si è detto, dalla quantità di idrogeno che una della lamine è capace di assorbire.

⁴ Si osservi però che parte dell'energia elettrica ottenuta non è utilizzabile, perchè si trasforma in calore nell'atto in cui la corrente traversa il liquido della pila, essendo soggetto anch'esso alla legge di Joule. E anzi, se si vuole ottenere all'esterno la massima potenza, una *quantità uguale* viene assorbita in riscaldamento della pila.

Planté fu il primo a rendere un tale apparecchio di applicabilità industriale, col farlo capace di accumulare una notevole quantità di energia.

Egli ebbe l'idea felice di ricorrere, come elettrodi, a due lamine di piombo di grande superficie; per il passaggio della corrente diretta, detta corrente di carica, l'idrogeno si sviluppa a una delle lamine, e l'ossigeno si combina con l'altra formando del biossido di piombo; per una nuova corrente in senso inverso, nel senso di quella che l'apparecchio tende a dare come corrente di scarica, il biossido di piombo formatosi in precedenza si combina con l'idrogeno che ora vi sviluppa la corrente, e dà luogo a del piombo metallico, molto più poroso della lamina primitiva, mentre l'altra lamina si ricopre alla sua volta di biossido di piombo. Così, con una successione di cariche in un senso e in senso opposto, si determina la trasformazione delle due lamine compatte di piombo in lamine ricoperte da uno spesso strato di piombo spugnoso, il quale permette che nella corrente diretta si accumuli in una di esse una più grande quantità di ossigeno, e che nella corrente inversa sia utilizzata, per *ridurre* la lamina, una maggior quantità di idrogeno. Effettivamente sarebbe inutile proseguire l'azione delle due correnti quando i gas sviluppati non trovano il posto ove fissarsi, e si svolgono liberamente dal liquido. Or appunto con questo processo si verifica che nelle successive cariche e scariche è richiesto un tempo più lungo perchè i gas si sprigionino, e quindi ogni volta l'apparecchio condensa una quantità di gas maggiore, e accumula una maggiore quantità di energia. Si esprime questo fatto dicendo che la *capacità* dell'accumulatore, piccolissima in principio, si va accrescendo nelle successive cariche e scariche, e che l'accumulatore con tale processo *si va formando*.

Una volta raggiunta la capacità richiesta, e caricato l'accumulatore in un senso, si può utilizzare la corrente che esso dà nella scarica, la quale si arresta quando le due lastre, rese prima dissimili dalla corrente di carica, tornano uguali. Da quel punto in poi conviene caricarlo *nello stesso senso di prima*, in modo che l'apparecchio abbia costantemente un senso di carica e un senso di scarica.

In definitivo adunque durante la carica si produce uno spostamento forzato di ossigeno, dalla lastra negativa alla positiva, con riduzione dell'una e sovrossidazione dell'altra, mentre nella scarica l'ossigeno ritorna da questa alla prima, ripristinando la loro eguaglianza.

Tale processo di formazione è piuttosto lungo e costoso, e noi vedremo di qui a poco che l'accumulatore Planté, eccellente in tutto il resto, è stato sostituito in gran parte dagli accumulatori detti del tipo Faure, a formazione immediata. Aggiungeremo, riguardo al processo chimico che avviene nell'accumulatore di piombo, che, quando l'apparecchio è carico, in una delle lastre, la positiva, il metallo si trova allo stato di piombo puro spugnoso. A misura che l'accumulatore si va scaricando, la corrente che esso stesso sviluppa, e che *nel suo interno* va dalla lamina negativa alla positiva, trasporta in questa l'idrogeno, che toglie al biossido di piombo parte dell'ossigeno, trasformandolo in ossido semplice di piombo; mentre sull'altra si trasporta dell'ossigeno, che compie una prima ossidazione del piombo metallico in ossido semplice di piombo. La corrente inversa cessa quando le due lamine son coperte ugualmente di ossido di piombo. Durante la carica l'idrogeno trasforma sulla negativa l'ossido di piombo in piombo metallico, mentre l'ossigeno trasforma sull'altra l'ossido in biossido.

L'interpretazione qui data serve solo a dare un'idea del fenomeno, che in realtà è molto più complesso, e sul quale si dissente ancora. Tali reazioni non avvengono in tutta la massa della lamina ma solo fino a una certa profondità, tanto maggiore quanto più lunga è stata la durata del processo di formazione. Si intende subito però che per mantenere alle lastre una certa solidità è necessario lasciare una parte interna che sia inattiva nel fenomeno. Questa parte inattiva, purtroppo necessaria, rende più pesante l'apparecchio.

Per eliminare gli inconvenienti e la spesa necessaria alla formazione lenta degli accumulatori, il Faure ebbe l'idea di disporre in una volta sola sulle lamine destinate a solo sostegno, le sostanze che si trovano negli strati attivi degli accumulatori formati. Siccome questo processo non sarebbe praticamente realizzabile, si suole, sulle indicazioni del Faure, depositare sulle lastre, con processi molto differenti, una pasta a base di litargirio per l'elettrodo negativo e di minio per il positivo.

Allora la prima corrente di carica riduce il litargirio in piombo metallico e sovrossida il minio in biossido di piombo, come nella carica dell'accumulatore Planté.

Non ci diffonderemo nella descrizione degli innumerevoli processi per la preparazione delle lastre, tra cui alcuni molto differenti da quelli descritti, e preferiamo venire senz'altro alle norme generali per l'uso degli accumulatori.

143. Sono **fattori caratteristici di un accumulatore**:

1° La *portata* cioè la corrente, in ampère, che l'accumulatore può fornire nella scarica. Tale corrente teoricamente non ha limite, poichè l'accumulatore conserva una certa quantità di elettricità che restituisce, in gran parte, alla scarica, con una corrente la cui intensità è data, per la legge di Ohm, dalla sua forza elettromotrice divisa per la resistenza totale del circuito. Quindi con lo stesso accumulatore si potrà avere, secondo il valore della resistenza esterna ed interna, una corrente intensa per un piccolo tempo, o una corrente debole per un tempo più lungo.

Però la pratica ha dimostrato che nella scarica non può superarsi per ogni accumulatore una certa intensità di corrente (corrente massima di carica), superata la quale si danneggia gravemente l'apparecchio.

2° La *forza elettromotrice*. Questa è sensibilmente la stessa per i vari tipi di accumulatori a piombo.

Durante la carica essa monta rapidamente a 2 volta e poi lentamente fino a 2,6 volta; durante la scarica scende rapidamente a circa 2,1 volta, poi lentamente fino a 1,9 volta, e da questo punto la tensione si annulla rapidamente. In regime normale di scarica questa non deve proseguirsi ulteriormente quando la tensione scende a 1,85 volta.

3° La *capacità dell'accumulatore*, cioè la quantità totale di elettricità che esso può restituire nella scarica. Essa dipende dalle dimensioni delle placche, ma dipende anche dalla durata della scarica stessa, nel senso che se l'accumulatore si scarica con intensità di corrente maggiore, e quindi in minor tempo, la quantità totale di elettricità restituita è minore. In genere non bisogna ricorrere a intensità di corrente di scarica tanto grandi che essa avvenga in meno di tre ore, tranne in certi accumulatori di costruzione recente detti *a ripulsione*. In generale la capacità degli accumulatori, riferita a 1 Kg. del peso del piombo, è di circa 10 ampère-ora.

4° Il *rendimento in quantità*, cioè il rapporto tra la quantità di elettricità restituita nella scarica e quella fornita nella scarica. Tale rendimento può raggiungere il 90 per cento.

5° L'*energia di scarica*, espressa in Watt-ora; è il prodotto della forza e. m. media di scarica per la quantità totale di elettricità restituita.

6° il *rendimento in energia*, rapporto tra l'energia elettrica restituita nella scarica e quella fornita nella carica. Tale rendimento è minore di quello in quantità; non supera, nelle migliori condizioni, l'85 per cento.

7° La *potenza dell'accumulatore*, prodotto della f. e. m. media per l'intensità normale di scarica.

8° La *potenza specifica per chilogrammo di placche*, cioè il quoziente della potenza per il peso totale delle placche. Essa è di circa 3 watt, per Kg.; ma in alcuni tipi Planté può raggiungere 26 watt.

144. Veniamo ora alle **norme per la carica e la scarica**.

Nella prima non bisogna superare una certa intensità, ordinariamente indicate dal fornitore. Parecchi indizi posson servire per riconoscere se la carica è finita. Anzitutto la carica sarà completa quando ogni accumulatore ha raggiunto la tensione di 2,6 volta all'incirca. Inoltre, quando la carica è completa, i gas sviluppati dall'elettrolisi non trovano più sostanza attiva su cui agire, e quindi si svolgono liberamente, il che può anche dare il segno che l'operazione è compiuta. Infine si può anche riconoscere il punto cui si è nella carica dalla densità della soluzione che, con essa, va crescendo continuamente.

Riguardo alla scarica bisogna curare che non si oltrepassi l'intensità prescritta, ed evitare i corti circuiti, cioè i contatti diretti con conduttori di piccola resistenza tra i poli. Infatti, avendo gli accumulatori una resistenza interna piccolissima, perchè si hanno molte placche positive a piccola

distanza dalle negative, con un corto circuito si raggiungono delle intensità molto elevate e dannose. Non bisogna, infine, proseguire la scarica quando la tensione di ciascun accumulatore è discesa a 1,85 volta. Sono poi da seguire delle prescrizioni più minuziose per garantire la durata della batteria, prescrizioni che i fornitori sogliono indicare con molti dettagli nelle istruzioni che accompagnano l'invio della batteria.

In quanto all'uso degli accumulatori esso presuppone naturalmente che si abbia a disposizione il mezzo di caricarli, cioè un generatore di energia elettrica. Malgrado questa restrizione essi rendono servizi preziosi alle applicazioni in moltissimi casi.

145. Macchine dinamo-elettriche. — Le vere applicazioni industriali dell'elettricità datano dall'invenzione delle macchine dinamo-elettriche, nelle quali l'energia meccanica è direttamente trasformata in energia elettrica, ricorrendo ai fenomeni d'induzione.

L'indole di questo libro ci costringe a essere molto modesti nella trattazione di tale argomento, e limitarci a dei pochi cenni generali sul funzionamento, senza venire ai dettagli di costruzione.

Si distinguono due grandi categorie di macchine dinamo-elettriche: quelle a correnti continue e quelle a correnti alternate.

Nelle prime la corrente generata, pur non essendo rigorosamente costante, circola sempre in un senso. Nelle altre invece la corrente circola alternativamente nei due sensi, invertendosi, nei casi

più comuni, un centinaio di volte a ogni minuto secondo, e determinando degli effetti sensibilmente costanti per quelle applicazioni in cui l'energia elettrica produce fenomeni identici qualunque sia il senso delle correnti: esempio tipico il riscaldamento dei conduttori, su cui si fonda l'illuminazione elettrica.

146. Dinamo a correnti alternate. — Immaginiamo un telaio (figura 165) sul quale sia avvolto del filo metallico in spire formanti unico circuito, e avente gli estremi saldati a due anelli a, b.

Si disponga il telaio in un campo magnetico, e gli si imprima un rapido moto di rotazione intorno a un asse perpendicolare al campo.

Durante la rotazione il flusso di forza attraverso il telaio, grandissimo se è intenso il campo e numerose le spire, cambierà di valore in modo continuo: esso sarà nullo quando il telaio ha le sue spire disposte parallelamente al campo, massimo se le spire son perpendicolari al campo stesso, e in quest'ultimo caso per

un mezzo giro il flusso tornerà a essere massimo, ma penetrerà nel telaio per la faccia opposta a quella per cui penetrava prima. In conseguenza di queste variazioni del flusso, tra gli estremi del circuito, cioè tra gli anelli, avremo una forza elettromotrice che sarà in un senso quando il flusso aumenta, in senso inverso quando il flusso diminuisce, che sarà cioè *alternata*. Una tale f. e. m. agendo agli estremi di un circuito collegato per mezzo di due contatti striscianti agli anelli, vi

genererà una corrente pure alternata, e precisamente tale che la corrente riprende il senso e il valore di prima a ogni rotazione intera del telaio.

In questo, come negli altri casi, il circuito disposto sul telaio prende il nome di *indotto* o *armatura*, il sistema che produce il campo in cui l'indotto si muove prende il nome di *sistema induttore*, e il sistema degli anelli e dei contatti striscianti (spazzole) destinato al raccoglimento delle correnti si dice *collettore*.

Se insieme al telaio precedente si muovono intorno allo stesso asse, e quindi nello stesso campo, due altri telai identici, in ciascuno dei tre si svilupperà una forza e. m. alternata. Ma se gli altri due telai passano per la posizione già occupata dal primo successivamente uno

dopo l'altro, e con l'intervallo di un terzo del periodo, il che avverrà se i piani dei tre telai sono inclinati tra di loro di un angolo di 120° , allora le tre f. e. m. generate in ciascuno avranno il loro massimo l'una dopo l'altra a $\frac{1}{3}$ di periodo di intervallo, si invertiranno con lo stesso ritardo, in una parola ognuna seguirà identicamente le stesse vicissitudini della precedente, ma tutto con un ritardo

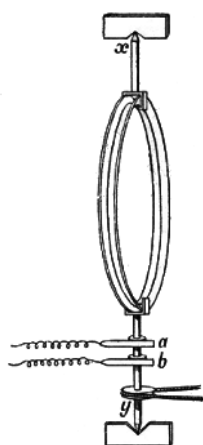


Fig. 165.

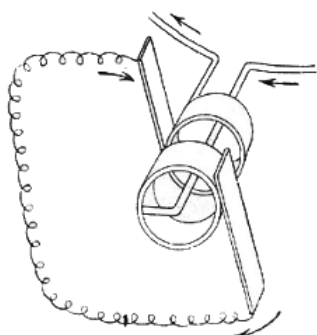


Fig. 166.

di $\frac{1}{3}$ di periodo. Se ai tre telai son rilegati tre circuiti identici, lo stesso avverrà delle correnti che traversano i tre circuiti. Ora queste tre correnti prendono il nome di correnti *trifasiche* ed hanno delle proprietà importantissime, soprattutto per i trasporti di energia a distanza. Per esempio, i tre telai possono avere un estremo comune, e gli altri tre estremi rilegati a tre fili contenenti i vari ricevitori, e facienti insieme capo a un punto comune.

È perciò che le correnti trifasiche vengono trasmesse a distanza per mezzo di tre fili soltanto invece di sei (tre per l'andata e tre per il ritorno), poichè data la natura alternante della corrente e lo spostamento delle alternazioni dall'una all'altra, ciascuna, come si dimostra, funziona da corrente di ritorno delle altre due.

147. Dinamo a correnti continue. — Riprendiamo l'unico telaio che ci servì di tipo per la produzione delle correnti alternate semplici, e, facendolo sempre girare in un campo magnetico, cambiamo la disposizione del collettore.

Al posto dei due anelli interi in cui si raccoglieva la corrente alternata (fig. 166) disponiamo un unico anello, tagliato nel senso dell'asse in due, e saldiamo i capi del filo del telaio alle due metà (fig. 167).

Appoggiamo alle due metà dell'anello due spazzole raccoglitrice, e disponiamo le cose in modo che nell'istante in cui la corrente indotta cambia di senso, una spazzola, (per la rotazione dell'anello) abbandoni la metà con cui era in comunicazione e vada in contatto dell'altra metà.

Si vede allora che, nell'istante in cui si capovolge la corrente nel telaio, sono invertite le comunicazioni dei suoi estremi col circuito esterno, e quindi la corrente in questo conserverà lo stesso senso di prima. Un tale collettore sarà quindi per l'esterno un raddrizzatore di correnti, le quali conserveranno perciò, al di là del telaio, sempre lo stesso senso, trasformandosi in correnti *continue*, per quanto non costanti.

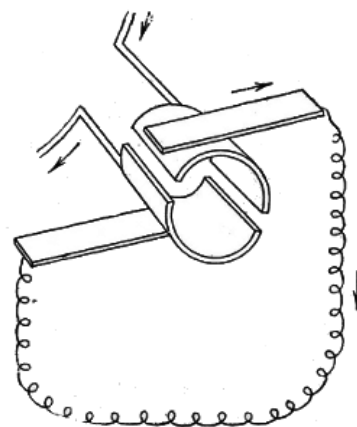


Fig. 167.

Con questo apparecchio si ottengono delle correnti sempre in un senso, ma ondulate. Si pensò quindi di ricorrere a degli artifici che attenuassero l'entità di queste ondulazioni, dando luogo a delle correnti costanti quanto più fosse possibile.

Il nostro Pacinotti ebbe il merito di risolvere questo problema col suo ingegnosissimo anello, che per le sue proprietà interessantissime costituisce forse la più feconda conquista dell'Elettrotecnica. L'anello di Pacinotti contiene in sé come la chiave della risoluzione di un gran numero di problemi cardinali della elettrotecnica, e solo chi conosce bene questa scienza può intenderne e apprezzarne l'alta portata.

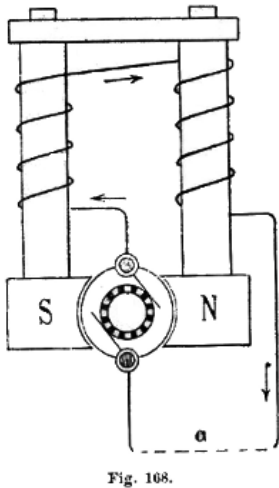
Esso è formato da un anello di fili di ferro, sul quale è avvolto, in modo da risultarne un'elica continua chiusa, un filo di rame. A intervalli angolari uguali, e separanti l'elica in tante bobine parziali, si partono dai punti di questa elica degli altri fili di rame che, formando come tanti raggi dell'anello, si connettono ad altrettante sbarre rettilinee, isolate fra loro, e disposte sulla superficie laterale di un cilindro, parallelamente all'asse di questo, che è normale al piano dell'anello. Tale cilindro prende, più specialmente che nelle altre dinamo, il nome di *collettore*; esso è trascinato dall'anello nella sua rotazione intorno all'asse del cilindro medesimo, rotazione che si fa tra i poli di un potente magnete, in modo che le linee di forza giacciono nel piano dell'anello rotante.

Si può dare una spiegazione elementare del funzionamento dell'anello di Pacinotti come generatore di correnti continue. Ci limiteremo a riferire il risultato. Se si appoggiano sulle sbarre del collettore in rotazione due spazzole diametralmente opposte, e in modo che la loro linea di congiunzione sia presso che perpendicolare alla direzione del campo esterno, durante la rotazione tra queste spazzole si stabilirà una f. e. m. praticamente costante.

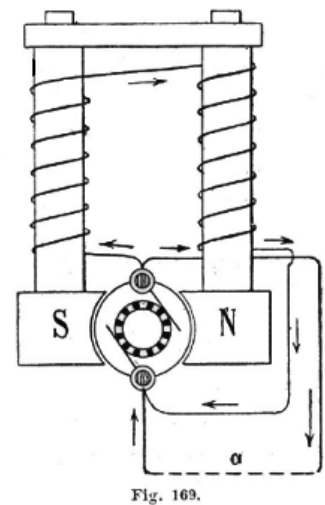
L'anello di Pacinotti, oltre alla funzione precedente e ad altre numerosissime, dà anche il mezzo più semplice di generazione delle correnti trifasiche.

148. Sistema induttore della dinamo. — In tutto quello che abbiamo detto è supposto che l'armatura della dinamo si muova in un campo generato da magneti o elettromagneti indipendenti.

Ma per le dinamo a correnti continue gli elettromagneti induttori si possono eccitare con tutta, o con parte della corrente che la stessa dinamo sviluppa. Se, per esempio, il circuito esterno per cui passerà la corrente sviluppata comprende anche la elettrocalamita induttrice, basterà la magnetizzazione residua del nucleo degli induttori, che non è mai nulla, per sviluppare una debole corrente, la quale, passando per il solenoide avvolgente l'induttore, se è in senso conveniente, ne accresce la magnetizzazione, con che si accrescerà la corrente indotta, e così via; si esprime ciò dicendo che la macchina è *autoeccitatrice*. La spiegazione che qui si è data della autoeccitazione non risponde interamente al vero, e anzi in certi casi conduce a dei risultati interamente opposti all'esperienza: ma ad ogni modo il fatto sussiste. Ora l'eccitazione degli induttori si può ottenere in tre modi: o si può far funzionare da corrente magnetizzante la totalità della corrente sviluppata dalla macchina, cioè far percorrere alla corrente stessa successivamente il circuito esterno e quello induttore, e allora la dinamo si dice in *serie* (fig. 168); ovvero si



può utilizzare la tensione esistente agli estremi del circuito esterno, cioè del collettore, per *derivare* una parte della corrente sviluppata nel circuito induttore, e allora la dinamo si dice in *derivazione* (fig. 169); ovvero si può ricorrere a un sistema misto, detto ed eccitazione *compound*.



Nel primo caso al diminuire della resistenza esterna cresce l'intensità della corrente, e con essa la magnetizzazione dell'induttore, e quindi la forza elettromotrice della macchina; cioè al crescere della portata della macchina in ampère, cresce la sua f. e. m.; nel secondo caso al crescere della resistenza esterna, e quindi al diminuire della portata in ampère, passa un'intensità maggiore nell'induttore, con che si accresce la f. e. m. della macchina; nel terzo caso infine, per una combinazione opportuna dei due sistemi, si comprende come si possa ottenere che la macchina dia una f. e. m. costante entro limiti piuttosto estesi dell'erogazione nel circuito esterno.

149. **Trasformatori.** — Postosi il problema di eseguire un trasporto di potenza, per esempio, a scopo d'illuminazione, l'energia elettrica può prodursi, trasportarsi e utilizzarsi in condizioni diverse. Così si può ricorrere a correnti continue, o a correnti alternate, o a correnti trifasiche, e in tutti i casi si possono utilizzare o correnti di piccola f. e. m. (*a bassa tensione*) e di grande intensità, ovvero correnti di grande f. e. m. (*ad alta tensione*) e di piccola intensità.

È di grande importanza poter generare l'energia elettrica nella forma più conveniente, prima di eseguire il trasporto *trasformarla* nella forma più adatta per quel caso di trasporto, e all'arrivo trasformarla ancora nella forma più adatta per quel caso di utilizzazione.

Si intende bene come sia difficile scegliere nei vari casi la forma più conveniente, e decidere fino a che punto la trasformazione, che produce sempre delle perdite, non diventi tanto onerosa da costringere a rinunziarvi. Comunque sia gli apparecchi che permettono tale trasformazione esistono, e prendono il nome appunto di *trasformatori*. A tal nome generico si fa seguire un'aggiunta, che esprime il genere di trasformazione per cui l'apparecchio fu costruito.

Si dicono *trasformatori di tensione* quegli apparecchi che trasformano una corrente di alta tensione e piccola intensità in una altra a bassa tensione e grande intensità, e viceversa. Tali trasformatori posson essere di due specie, secondo che si tratti di correnti continue o di correnti alternate.

Un'altra categoria di trasformatori permette poi di passare da una a un'altra qualunque delle tre forme di correnti: continue, alternate e trifasiche; con combinazione di vari apparecchi, e talvolta con un apparecchio solo, si riesce a eseguire oramai qualunque trasformazione.

150. Cominciamo dai **trasformatori di tensione**, e occupiamoci anzitutto della loro utilità.

Quando l'energia elettrica viene sviluppata a grande distanza dal posto dell'utilizzazione, come, p. es., quando con l'energia di una caduta d'acqua si vuole illuminare elettricamente una città piuttosto lontana, riguardo alla tensione si ha interesse che essa sia non molto elevata alla dinamo generatrice, elevatissima nella linea e molto bassa ai poli delle lampade elettriche.

Quanto alla tensione delle dinamo generatrici la necessità di non ricorrere a tensioni non troppo alte risulta da esigenze di costruzione e da criteri di sicurezza. Riguardo alla linea essa dovrà trasportare una certa quantità di energia per secondo, che è il prodotto della tensione di trasporto per l'intensità della corrente che traversa la linea. Ora il filo di linea si scalda anch'esso per effetto Joule; se non si vuol perdere, in gran parte, per via l'energia da trasportare, siccome è a spese di questa che si compie il riscaldamento della linea, bisogna cercare di ridurre tale riscaldamento.

Or la potenza che tale riscaldamento ci costa è, come sappiamo, data da RI^2 in cui R è la resistenza della linea e I l'intensità. Si cercherà quindi diminuire R ; ma ciò ha un limite, poichè diminuire R equivale a crescere molto la sezione del filo, e quindi a rendere la linea molto costosa, immobilizzando nella sua costruzione un gran capitale, e accrescendo le spese di collocazione.

È molto più utile diminuire I , il che si ottiene accrescendo appunto la tensione di trasporto: anzi tale diminuzione ha effetti molto più cospicui, perchè, essendo quella potenza proporzionale al *quadrato* dell'intensità, basterà rendere questa cento volte più piccola, e perciò la tensione 100 volte più grande, per far divenire quelle perdite *10.000 volte più piccole*.

Più necessario è però l'abbassamento della tensione all'arrivo, soprattutto nel caso dell'illuminazione.

E infatti le lampade elettriche non si sogliono costruire per tensioni superiori a 220 volti; nè è conveniente disporre le varie lampade in serie l'una dopo l'altra, in un circuito a tensione elevata, sia per ragioni di sicurezza, sia per dare alle singole lampade maggiore indipendenza.

Converrà adunque, riassumendo, elevare la tensione alla partenza e abbassarla all'arrivo. A ciò provvedono i trasformatori di tensione.

Finchè si tratta di correnti alternate tale trasformazione è molto facile, ed è soprattutto questo che rende le correnti alternate adatte per i trasporti a grandi distanze.

Avvolgiamo sopra uno stesso nucleo di fili di ferro, come nel rocchetto di Ruhmkorff, due circuiti: uno costituito di filo grosso in poche spire, e l'altro di filo sottile in spire più numerose; facendo passare per il primo una corrente alternata di grande intensità, avremo una magnetizzazione del nucleo anch'essa alternativa, e quindi, variando periodicamente il flusso di forza nel secondo circuito, otterremo agli estremi di questo un'altra f. e. m. alternativa. Si dimostra che se E è la forza elettromotrice agente nel primo circuito e I l'intensità che l'attraversa⁵, E' la f. e. m. generata agli estremi dell'altro e I' la corrente indotta ottenuta, si ha sensibilmente,

$$EI = E'I'$$

e perciò l'energia spesa nel primo circuito viene restituita, in realtà con una piccola perdita che può essere minore del 5 %, nell'altro; e inoltre E' è tanto più grande di E , quanto il numero di spire del secondo è maggiore di quello del primo; come nel rocchetto di Ruhmkoff.

Un tale apparecchio risolve quindi completamente il problema. Risulta infatti evidente che esso permetterà di elevare la tensione alla partenza, rilegando la dinamo al circuito grosso e la linea a quello sottile; e un apparecchio simile permetterà di abbassare la tensione all'arrivo, rilegando al circuito sottile la linea, e al circuito grosso i ricevitori a bassa tensione.

Questi trasformatori eseguono il loro ufficio con pezzi assolutamente fissi; si chiamano perciò trasformatori statici, e non richiedono quasi nessuna manutenzione e sorveglianza. Tale proprietà

⁵ Trattandosi di correnti alternate, tanto E che I hanno valori rapidamente variabili, talora positivi e talora negativi. Le relazioni seguenti valgono per le cosiddette forze elettromotrici e intensità *efficaci*, ottenute sommando i quadrati dei valori successivi delle grandezze stesse, prendendone la media, ed estraendo da questa la radice quadrata. Si dimostra allora che per la massima parte degli effetti delle correnti, p. es. per il riscaldamento dei conduttori e quindi per l'illuminazione, una corrente continua e una corrente alternata sono equivalenti se l'intensità efficace di questa è eguale all'intensità costante di quella. Si noti ancora che, per le lampade e in generale per i circuiti il cui coefficiente di auto-induzione non è troppo elevato, tra la f. e. m. efficace, la resistenza di un conduttore e l'intensità efficace che l'attraversa, vale la legge di Ohm: e così la potenza svolta in questo caso si esprime col prodotto della f. e. m. efficace per l'intensità efficace, come per le correnti continue.

preziosa non possiedono invece i trasformatori di tensione per correnti continue, i quali in fondo risultano dall'accoppiamento meccanico di due dinamo, di cui una riceve l'energia elettrica, e, funzionando da motore, mette in movimento l'altra, mentre questa genera la corrente a tensione diversa.

Questi apparecchi, oltre che dar luogo nella trasformazione a perdite maggiori, richiedono una sorveglianza continua.

In quanto alle trasformazioni dall'una all'altra delle tre forme di correnti: continue, alternate e trifasiche, dobbiamo limitarci a dire che tale trasformazione avviene per mezzo di apparecchi a rotazione, detti *trasformatori rotativi* o *commutatrici*.

Apparecchi industriali per le misure elettriche.

151. **Amperometri.** — Per la misura delle correnti impiegate nella pratica si ricorre a degli apparecchi molto più semplici dei galvanometri; in essi lo spostamento di un indice sopra un cerchio graduato indica direttamente il numero di *ampère* della corrente che circola nell'apparecchio. Essi sono fondati, quasi sempre, sulle azioni elettromagnetiche; così in alcuni un nucleo di ferro trattenuto da una molla è succhiato da un solenoide percorso dalla corrente, in altri si utilizza il principio del galvanometro a telaio mobile di Deprez e d'Arsonval (§ 100) e si oppone al suo moto una molla antagonista; questi movimenti si traducono con leve e ingranaggi opportuni in spostamenti dell'indice su un cerchio, che viene graduato per confronto con l'indicazione data, p. es., da un voltmetro ad argento o da un amperometro campione già tarato con questo.

Un altro genere di amperometri può anche servire per correnti alternate; essi sono fondati sul riscaldamento, e quindi sulle variazioni di dimensioni, di un conduttore percorso dalla corrente; danno quindi per lettura diretta l'intensità efficace della corrente, se essa è variabile.

152. **Voltimetri.** — A misurare le forze elettromotrici o le differenze di potenziale servono gli *elettrometri*, fondati sulle attrazioni e repulsioni dei conduttori elettrizzati. Nell'industria si ricorre invece ai *voltimetri*, fondati su azioni elettromagnetiche o elettrotermiche, che danno direttamente in volta la differenza di potenziale cercata.

Essi consistono in veri amperometri di grande sensibilità e di grandissima resistenza interna. Rilegando gli estremi dell'apparecchio, in derivazione, agli estremi di un circuito tra cui si vuol determinare la differenza di potenziale, passerà per lo strumento una piccola corrente derivata, la quale sarà d'intensità proporzionale alla differenza di potenziale esistente tra quei punti. Le deviazioni dell'indice mobile segnano direttamente i volta, per mezzo di una graduazione fatta dal costruttore con metodi opportuni. Risulta da quanto si è detto che gli amperometri, dovendo essere percorsi dalla totalità della corrente da misurare, devono essere collegati in serie col circuito principale, mentre il voltmetro va inserito in derivazione tra i punti di cui si vuol determinare la differenza di potenziale.

153. **Watt-metri.** — Servono a misurare la potenza spesa da una corrente in circuito. Constano di due spirali di cui una mobile, l'altra fissa, agenti l'una sull'altra: una delle spirali, di filo grosso, detta spirale amperometrica, è percorsa dalla totalità della corrente che traversa il circuito; l'altra, resistentissima, di filo lungo e sottile, detta spirale voltmetrica, è inserita in derivazione tra gli estremi del circuito; l'intensità che passa nella seconda è, come nei voltimetri, proporzionale alla differenza di potenziale tra quegli estremi. Or la deviazione della spirale mobile è proporzionale alle intensità delle correnti che circolano nell'una e nell'altra delle due spirali, e quindi al loro prodotto; ma la intensità che circola nella spirale voltmetrica è proporzionale alla differenza di potenziale tra gli estremi del circuito, quindi la deviazione, in definitivo, è proporzionale al prodotto EI della forza elettromotrice tra gli estremi del circuito per l'intensità che vi circola, cioè alla potenza elettrica spesa nel circuito. L'apparecchio è graduato con metodi speciali.

154. **Misuratori di energia elettrica, o contatori o wattorimetri.** — Sono gli apparecchi che le società fornitrici dell'energia elettrica collocano in ciascun impianto privato, per il computo

dell'energia consumata. Tale energia può valutarsi in joule, che è l'energia ricavata dall'impiego della potenza di un watt per un minuto secondo, ovvero in wattora, che è l'energia ricavata dall'impiego della potenza di un watt per un'ora. Si intende da sé il significato delle parole etto-watt-ora, kilo-watt-ora ecc.

Se ne conoscono moltissimi tipi. Daremo solo un cenno del funzionamento del misuratore di Thomson, da cui derivano moltissimi altri (misuratore Schücker ecc.).

Il misuratore Thomson è appunto un vero motorino elettrico, nel quale il campo induttore è dato da una spirale a filo grosso percorsa dalla totalità della corrente usufruita dall'abbonato, mentre l'indotto, resistentissimo perchè di filo molto fine, è, per mezzo di un piccolo collettore in argento disposto in derivazione ai poli del circuito dell'abbonato.

Nell'indotto passa sempre una corrente proporzionale, come nei Voltimetri, alla tensione esistente agli estremi nel circuito; appena in questo passa una corrente, per es., per l'accensione di lampade, il motorino si mette in azione.

L'albero dell'indotto porta un disco di rame che si muove tra i poli di alcune calamite; per fenomeni di induzione il movimento del disco viene allora ostacolato, come se le calamite destassero nell'intorno del disco una speciale viscosità.

E si dimostra che il numero totale di giri compiuto dall'apparecchio in un certo tempo è proporzionale all'energia consumata in quel tempo dall'abbonato; quindi quel numero di giri, valutato con un contagiri opportuno, potrà esser ridotto facilmente in watt-ora consumati. Ciò si fa direttamente coi numeri scritti sui quadranti nei quali si spostano le lancette del contagiri, e che permettono di leggere senz'altro il valore dell'energia consumata, come nei contatori a gas per il consumo in metri cubi.

I misuratori vengono ordinariamente forniti al pubblico dalle società esercenti la vendita dell'energia elettrica. Al contrario di quanto avviene per i misuratori a gas, nessuna legge finora prescrive che essi debbano venire controllati dalle Autorità Governative. Può quindi essere utile indicare come si possa procedere per tale verifica.

Bisogna disporre: di un amperometro di precisione, di una batteria di lampade, di un orologio, e, se la tensione fornita non è conosciuta in modo certo, anche di un voltmetro.

Si dispone quindi un circuito comprendente le lampade e l'amperometro, dopo aver prima valutato la tensione, qualora essa non sia nota di già.

Osservata la posizione iniziale del contatore, si chiude il circuito, segnando contemporaneamente l'ora segnata dall'orologio; si legge il numero di ampère della corrente utilizzata, e si aspetta un certo tempo, per esempio un'ora. In questo tempo l'amperometro darà indicazioni sensibilmente costanti, se anche la tensione è costante. Alla fine esatta dell'ora si interrompe la corrente, e si va a guardare la nuova indicazione del contatore. Per differenza con la precedente sua indicazione si avrà il numero di watt-ora registrati dall'apparecchio.

Questo numero deve trovarsi uguale a quello che si ottiene valutando direttamente l'energia consumata, cioè moltiplicando il numero di ampère per il numero di volta e per il tempo, che in questo esempio ha il valore uno, poichè l'esperienza è durata un'ora.

Ordinariamente i misuratori, per ragioni inerenti alla loro costruzione meccanica, non si mettono in moto se si utilizza una potenza che sia circa 1/50 della potenza massima per cui sono adatti. Così un misuratore adatto per valutare l'energia consumata da 50 lampade non si mette in moto se se ne accende una sola. Ma questo *limite di avviamento* non è lo stesso per i vari misuratori.

Distribuzione dell'energia elettrica.

155. **Generalità.** — Dal generatore elettrico al ricevitore l'energia viene trasportata per mezzo di conduttori metallici.

Perchè tali conduttori abbiano una piccola resistenza elettrica, si suol quasi sempre costruirli di rame, o di leghe in cui il rame è predominante. La sezione da dare a tali conduttori è determinata da molte condizioni che non hanno in tutti i casi la stessa influenza.

Anzitutto, se l'energia deve essere utilizzata a una certa distanza, bisogna tener conto dell'energia che vien perduta per via sotto forma di riscaldamento della conduttura; la quale, se è già fissata la tensione di esercizio, e la potenza da trasportare, sarà tanto minore quanto maggiore è la sezione del filo. D'altra parte bisogna tener conto del costo che acquista la conduttura, cioè del capitale che verrebbe immobilizzato nella conduttura stessa. Ci sono delle regole pratiche che fissano la sezione più economica del filo, cioè la sezione per cui sono minimi gli oneri derivanti insieme dalla perdita di energia lungo la linea e dalla spesa che questa sarà per costare.

In altri casi bisogna tener presenti anche altre condizioni. Così se l'intensità della corrente fosse troppo grande, relativamente alla sezione del filo, il riscaldamento di questo, a parte la perdita di energia che rappresenta, potrebbe diventare dannoso per sè. Bisogna quindi preoccuparsi che la sezione prescelta non sia tale da determinare nel filo un riscaldamento superiore a certi limiti assegnati dalla pratica, e in certi casi anche dalla legge. Infine talora è necessario che la tensione resti sensibilmente costante in qualche tratto di conduttura, per esempio dalle cassette di presa dell'abbonato al posto ove sono innestate le lampade. Ora, per la legge di Ohm, se la conduttura avesse in questo caso la resistenza di un ohm, e la corrente fosse di 10 ampère, lungo la sola conduttura la tensione stradale si abbasserebbe di 10 volta prima di arrivare alle lampade, e ciò porterebbe delle gravi perdite nel potere e nel rendimento luminoso di queste ultime.

156. Distribuzione in serie. — I vari ricevitori, per esempio le lampade, possono esser costruiti in modo da soddisfare a una di queste due condizioni: o che tutti richiedano, per funzionare regolarmente, di essere percorsi da una corrente della stessa intensità, o che tutti richiedano di essere sottoposti alla stessa tensione. Nei due casi si ottengono due sistemi fondamentali di distribuzione, detti a *intensità costante* o *in serie* nel primo caso, a *tensione costante* o *in derivazione* nel secondo caso.

Nella distribuzione in serie, qualunque sia il numero di lampade impiegato, l'intensità è costante in tutto il circuito, e quindi nel generatore e nei conduttori. Questi possono quindi avere una piccola sezione, poichè l'intensità richiesta da una lampada, e quindi da tutte, non può esser molto grande.

Viceversa la tensione del generatore deve essere la somma delle tensioni di ciascun ricevitore, e quindi, appena il numero dei ricevitori si accresce alquanto, la tensione del generatore comincia a diventare grandissima. Inoltre in questo sistema una interruzione del circuito in un punto qualunque determina la cessazione della corrente in tutti gli altri apparecchi; è necessario perciò, quando si spegne una delle lampade, mettere in corto circuito i suoi estremi per non spegnere tutte le altre.

Per tutte queste ragioni, e per la difficoltà di far variare la tensione del generatore entro grandi limiti, questo sistema non è generalmente adottato.

157. Distribuzione in derivazione. — In questo sistema i vari ricevitori funzionano sotto una determinata tensione, ed essi sono, per ottener ciò, rilegati a due conduttori provenienti dal generatore, in modo che per ciascun passi una corrente propria. In questo caso il generatore deve mantenere tra i due conduttori principali una differenza di potenziale costante, ma esso è traversato dalla *somma* delle correnti che traversano i vari ricevitori.

I conduttori principali, specialmente nei punti vicini al generatore, son traversati perciò da correnti molto intense, il che obbliga ad accrescere molto la loro sezione. In compenso i vari ricevitori hanno un funzionamento interamente indipendente, solo che il generatore sia capace di mantenere una tensione costante tra i due conduttori principali, qualunque sia il numero dei ricevitori inseriti. Ora questa condizione è assai difficile a realizzare:

1° perchè quando in una dinamo aumenta l'intensità della corrente che l'attraversa, la f. e. m. da essa sviluppata varia, in generale, a meno che non si tratti di una dinamo con induttori eccitati in maniera speciale.

2° perchè, data la corrente molto intensa che traversa i cavi principali, si produce in essi una perdita di tensione crescente con la distanza dal generatore, ed eguale alla somma dei prodotti delle resistenze dei vari tratti del cavo per le intensità delle correnti che li traversano; tali variazioni di tensione possono evitarsi solo dando ai cavi sezioni molto grandi, e quindi piccolissime

resistenze, il che porta ad accrescere, e molto, il peso del rame impiegato. Ciò è tanto più grave in quanto alcuni ricevitori, come le lampade male sopportano delle variazioni di tensioni superiori al due per cento.

158. **Reti di distribuzione e feeders.** — Il sistema impiegato per l'illuminazione dei centri importanti è derivato dal sistema precedente.

Si stabilisce nelle varie strade una vera rete di cavi distributori piuttosto grossi, dai quali nei vari posti si derivano le prese per i privati. Dall'officina poi si fanno partire numerosi altri cavi detti *alimentatori* o *arterie* o *feeders*, i quali vanno a rilegarsi alla rete in certi punti d'incrocio detti centri di distribuzione. Da questi centri di distribuzione alcuni fili sottili tornano all'officina, ove, per mezzo di voltimetri ad essi rilegati, si può conoscere a qualunque istante il valore della tensione esistente tra i due cavi in un punto qualunque della rete. Regolando convenientemente l'erogazione dei vari alimentatori, col modificare la tensione al punto di partenza o la resistenza di ciascuno di essi, si può ottenere che nei vari centri la tensione non presenti variazioni oltrepassanti un limite prestabilito.

159. **Sistema a tre fili.** — All'officina si rileghino i poli della dinamo a una batteria di accumulatori: questa permette di far lavorare la dinamo a una potenza media costante, accumulando l'energia prodotta quando nella rete c'è poca richiesta, e aiutando la deficiente produzione della dinamo nelle ore di maggior consumo.

Se dal punto di mezzo della batteria si fa partire un terzo cavo insieme a quelli che partono dagli estremi, la tensione tra i cavi estremi sarà doppia di quella esistente tra un cavo estremo e quello centrale. Così se il cavo centrale è rilegato alla terra, in modo da mantenerlo a potenziale zero, gli altri due si troveranno a potenziali eguali e contrari, per esempio uno a +150 volta l'altro a —150 volta; e allora, mentre i privati potranno avere le loro prese innestate alternativamente tra uno o l'altro dei cavi estremi e il cavo centrale, con la tensione di 150 volta, la differenza tra le tensioni dei cavi estremi, che è poi la tensione di lavoro della dinamo, sarà di 300 volta.

Quando le prese dei privati son distribuite uniformemente sui due cavi positivo e negativo, il cavo centrale non riporta all'officina nessuna corrente, e quindi può essere anche piuttosto sottile; invece i due cavi estremi trasportano dell'energia con tensione doppia e quindi, a pari energia che col sistema a due fili, con intensità metà. Ciò permette di ridurre notevolmente la loro sezione, ottenendosi, se l'impianto è ben fatto, un'economia complessiva del 37 per cento, malgrado l'aggiunta del terzo filo.

160. **Valvole fusibili. Interruttori.** — In tutti i casi in cui bisogna che in un circuito non si oltrepassi una certa intensità, si ricorre alle valvole fusibili, o agli interruttori automatici.

Le prime son costituite da laminette di piombo, o di stagnola, o da fili sottili, aventi tali dimensioni che, quando per un corto circuito o un altro accidente qualsiasi la corrente supera di alquanto l'intensità normale, la lamina si porta a tale temperatura da fondere, interrompendo così il circuito.

Gli interruttori automatici elettromagnetici portano invece una elettrocalamita la quale, finchè la corrente ha il suo valore normale, non produce alcun effetto, mentre quando lo supera, per l'attrazione accresciuta su opportuni nuclei di ferro, interrompe istantaneamente il circuito.

161. **La corrente elettrica e i pericoli per la vita umana.** — Quando la corrente elettrica traversa l'organismo umano produce due effetti: uno sul sistema nervoso, sotto forma di *scosse*, le quali con la corrente continua si avvertono solo al cominciare e al cessare della corrente, mentre sono permanenti con le correnti alternate; l'altro su tutto l'organismo, con dei fenomeni molto complessi e poco noti, dai quali può aversi un effetto dannoso e anche mortale se la corrente è intensa.

Cominciamo dalle correnti continue. Esse possono passare nell'organismo o quando due pezzi metallici, a diverso potenziale, vengono in contatto con due parti del corpo, ovvero quando, essendo i piedi in comunicazione col suolo senza interposizione di sostanze isolanti, si tocchi una conduttura a potenziale *determinato*.

È bene intendersi su questo. Se il generatore, la linea e i ricevitori, in altri termini *tutto il circuito*, sono perfettamente isolati dal suolo, allora rilegando un punto *solo* del circuito col solo intermediario di un conduttore qualunque o del corpo umano, esso non sarà percorso da *nessuna corrente permanente*. Il generatore non fa che stabilire una *differenza di potenziale determinata* tra i suoi poli; se tale differenza è per es., 1000 volta, allora il potenziale *assoluto* di ciascun polo è indeterminato, e così se il negativo è a potenziale zero, l'altro sarà a +1000 volta; se il negativo è a —500 volta l'altro sarà a +500 ecc.

Quindi, se tutto il circuito è isolato e lo si tocca in un punto questo si porterà al potenziale *zero*, e negli altri punti della linea i potenziali si distribuiranno secondo la legge di Ohm.

Da un altro punto di vista possiamo dire che se il circuito è tutto isolato, toccando in un punto, per stabilirsi una corrente permanente dal circuito al suolo, bisognerebbe che contemporaneamente se ne stabilisse un'altra, in un altro punto, dal suolo al circuito.

Invece se uno dei cavi A non è isolato bene, ma ha qualche connessione col suolo, toccando l'altro B si stabilirà una corrente continua, da B al suolo attraverso al corpo e dal suolo ad A attraverso la connessione.

Ora la pratica ha dimostrato che, nel caso di circuiti non bene isolati, toccando un cavo che presenti una differenza di potenziale col suolo, si ha pericolo di vita solo quando quella differenza di potenziale sia, anche dopo il contatto, superiore a 1000 volta; bene inteso che questa cifra non ha niente di assoluto, dipendendo l'intensità della corrente derivata dal modo come il corpo stabilisce il contatto col suolo, e non avendosi un valore *critico determinato* dell'intensità al di sopra della quale si produca per tutti gli organismi la morte. Pare, per es., che il pericolo, a pari tensione del cavo toccato, sia maggiore per i cavalli, medio per gli uomini, minore per i cani.

Con le correnti alternate le cose cambiano aspetto; anzitutto, anche se il circuito è bene isolato, e lo si tocca in un punto solo si possono avere ancora delle correnti alternate permanenti pericolosissime; in secondo luogo, oltre all'effetto proprio delle correnti continue, quelle alternate provocano delle contrazioni nervose e muscolari violente, che, intanto, rendono impossibile alla vittima di abbandonare il conduttore, e che posson produrre la morte per paralisi, se non si provvede in tempo a provocare, con la respirazione artificiale, la riattivazione delle arrestate funzioni respiratorie. È perciò che le correnti alternate sono già pericolose a una tensione notevolmente minore di quella fino a cui le correnti continue sono tollerabili.

Si vede subito che la corrente ad alta tensione è imposta da necessità economiche all' esercente l'industria elettrica, ma non deve essere desiderata, a parità delle altre condizioni, dagli utenti. E così, da questo punto di vista, son da preferire le correnti continue alle alternate.

Le condizioni di sicurezza degli impianti hanno formato una preoccupazione costante del pubblico, delle Autorità e dei tecnici. Anche questi ultimi infatti si preoccupano, e giustamente, dell'ostilità che incontrerebbe l'applicazione dell'elettricità all'illuminazione o ad altri servizi quando fossero frequenti le disgrazie, e delle responsabilità penali o finanziarie cui potrebbero andare incontro in caso di disgrazie. Esistono perciò in vari paesi dei regolamenti che contengono le *norme di sicurezza*, proposte da Associazioni scientifiche e industriali e talora rese obbligatorie dallo Stato.

Le lampade elettriche.

162. **Generalità.** — Quando una corrente i traversa un filo conduttore di una certa resistenza r sappiamo che vi sviluppa a ogni minuto secondo una quantità di calore eguale, in calorie, a $0,24 i^2 r$. Questo calore in principio viene impiegato a riscaldare il conduttore; ma, a misura che questo diviene più caldo dell'ambiente, va perdendo per irradiazione calore; la perdita anzi cresce rapidamente al crescere della temperatura, cosicchè a un certo punto viene disseminato all'ambiente tutto il calore che la corrente svolge nel filo; si è allora raggiunto l'equilibrio dinamico: se la perdita diminuisce, il calore si accumula nel filo finchè per l'accresciuta temperatura si abbia l'equilibrio; l'opposto avviene se si accrescon con un mezzo qualunque queste perdite.

L'energia viene irradiata sotto due forme: di radiazioni calorifiche invisibili e di radiazioni aventi insieme effetto luminoso e calorifico; e al crescere della temperatura del corpo luminoso aumenta il rapporto tra l'energia irradiata avente effetto luminoso e la totale energia irradiata, che nel caso attuale è quella svolta dalla corrente.

La corrente elettrica, permettendo lo sviluppo in piccoli corpi di quantità di calore grandi quanto si vuole, può produrre temperature comunque elevate nel filo; effettivamente, se questo resistesse alle temperature elevate senza fondersi e volatilizzarsi, non ci sarebbe alcun limite alle temperature raggiungibili. Se adunque l'elettrotecnica non ha risolto ancora il problema di dare la luce col costo minimo in energia, ciò non è da imputare alla scienza elettrica in sé, ma alla imperfezione dei conduttori che sono alla nostra portata, in quanto che essi non resistono a temperature tanto elevate.

Così, se si ricorre a un filamento di platino, ogni accidente che ne faccia aumentare la temperatura al di là di 1800° , che è una temperatura certo non altissima, fonde il filo e mette la lampada fuori servizio. E la superiorità del filamento di carbone su quello di platino consiste appunto nel fatto che esso permette si raggiunga per qualche istante una temperatura alquanto più alta.

163. La **lampada a incandescenza** oggi adoperata ha per organo essenziale un filamento sottile di carbone ottenuto per carbonizzazione o di fibre vegetali, o meglio di fili preparati facendo passare una pasta di cellulosa attraverso fori sottili. Per ottenere la carbonizzazione basta riscaldarli per qualche tempo a una temperatura elevata fuori il contatto dell'aria.

Gli estremi del filo si saldano a due fili di platino, con un processo speciale, e questi a una pera di vetro, da un estremo della quale si può fare il vuoto all'interno, a mezzo di una macchina pneumatica a mercurio. Saldando infine i fili di platino emergenti dal vetro a una ghiera metallica, composta di due pezzi, la lampada è pronta per essere avvitata nel portalampada, che mette in comunicazione i due estremi con la conduttura, avendo in taluni casi, un interruttore locale.

La determinazione della temperatura del filamento in condizioni normali di luminosità non è molto sicura. Da ricerche di Weber, confermate dalla massima parte degli sperimentatori successivi, per quanto contraddette da altri, pare che la temperatura normale sia di circa 1600° .

A temperature superiori comincerebbe la disaggregazione del filamento, con proiezione di particelle di carbonio sul palloncino, il che produce una diminuzione della luminosità del filo, e un annerimento del palloncino stesso. È importante ridurre la rarefazione nel palloncino, poichè l'aria presente raffredda per contatto il filamento, sottraendogli così dell'energia in forma di calore non luminoso.

La costruzione delle lampade a incandescenza costituisce una delle meraviglie dell'industria moderna; si costruiscono infatti delle lampade eccellenti nelle quali, malgrado il costo della materia prima (palloncino, filamento, fili di platino, ghiera metallica) e della lavorazione, certo non semplice, il prezzo di vendita di ciascuna lampada è inferiore a 60 centesimi.

In una stessa lampada a incandescenza al variare dell'intensità della corrente, e quindi dell'energia, varia moltissimo la luminosità. Dal complesso delle esperienze eseguite in proposito risulta che nelle vicinanze delle condizioni normali il potere luminoso è proporzionale al *cubo* dell'energia spesa. Ciò si spiega pensando al rapido accrescimento del rendimento luminoso con l'aumento della temperatura. In conseguenza un accrescimento dell'un per cento nell'energia consumata aumenterebbe del 3 per cento la quantità di luce ottenuta; entro gli stessi limiti pare che a ogni accrescimento della temperatura del filo di 1° , consegua l'aumento dell'1 per cento nel potere luminoso.

Si vede da ciò quanto interessi tener altissima la temperatura del filamento. Di tale temperatura sarà funzione il rendimento luminoso, o consumo specifico della lampada, che si può valutare dal numero di watt spesi per ottenere una candela; il consumo che è di 10 watt per candela alla temperatura di 1470° , diviene solo 2,4 watt alla temperatura di 1620° . Però, come abbiamo già accennato, quando una lampada lavora a una temperatura troppo elevata essa si consuma troppo rapidamente; è perciò che in pratica non si scende al di sotto del consumo di 3 watt circa. Però, tenuto conto del prezzo attuale elevato dell'energia elettrica, mentre il ricambio di una lampada

costa tanto poco, conviene ricorrere, sia pure cambiandole a proprie spese, a lampade di piccolo consumo; e si intende che per il cambio non bisogna aspettare che il filamento si rompa, poichè anche prima, per il suo assottigliamento e per l'annerimento del palloncino, il suo potere luminoso trovasi notevolmente diminuito.

Si noti infine che il consumo specifico non è qualche cosa di caratteristico per una data lampada. Così una lampada di grande consumo per una tensione di 150 volta può divenire *forzata*, e di piccolo consumo, per una tensione maggiore; se l'energia spesa cresce p. es. del due per cento, la luminosità si accrescerà del 6 per cento e il consumo specifico diminuirà sensibilmente. Per ottenere ciò basta che la tensione cui la lampada è sottoposta varii solo dell'uno per cento.

164. Le lampade Nernst e a filamento metallico. — Abbiamo visto che il limite alla elevazione del rendimento nelle lampade a incandescenza è dato dalla disaggregazione del filamento a temperature elevate.

Il Nernst ebbe la felice idea di ricorrere a delle sostanze, come la magnesia calcinata, che si fondono a temperature molto elevate. Tale corpo è ordinariamente cattivo conduttore, ma una volta che esso sia riscaldato a temperatura piuttosto elevata, con un mezzo *estraneo*, esso diventa conduttore, e quindi suscettibile di trasformare in riscaldamento e in luce l'energia elettrica. Lo scaldamento preventivo è ottenuto, per mezzo di una spirale di platino circondante il cilindretto di magnesia, e che viene staccata dal circuito quando il cilindretto è stato reso conduttore.

La magnesia è un elettrolito, cioè un corpo che il passaggio della corrente decompone; però esso si riforma per la presenza dell'ossigeno dell'aria. In questa lampada si ha il consumo di 2 watt circa per candela.

Accenneremo infine alle modernissime lampade a filamento metallico di osmio, di tantalio, di tungsteno ecc. che per la elevatissima temperatura di fusione e per una emissione selettiva nel campo dello spettro visibile, hanno permesso di produrre la luce con un consumo specifico molto ridotto; in qualcuna si ottiene all'incirca 1 candela per watt.

165. Il fenomeno dell'arco. — Questo fenomeno meraviglioso fu scoperto dal Davy nel 1836. Rilegando agli estremi di un circuito due sbarre di carbone di storta appuntite, portandole in contatto, e poi staccandole un poco, se la forza elettromotrice agente nel circuito è superiore a circa 40 volta, si forma tra le due punte un'atmosfera di vapori di carbonio incandescente, e le due punte si portano a temperatura elevatissima, ottenendosi una luce abbagliante.

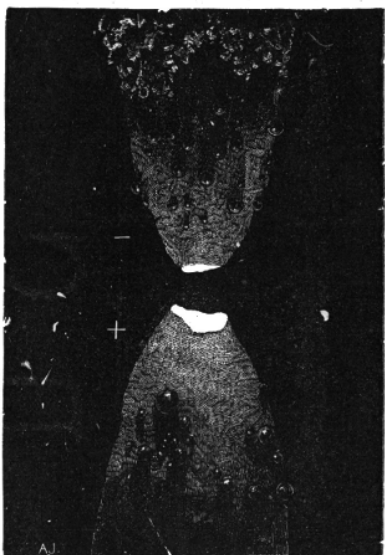


Fig. 170

L'enorme calore svolto dalla corrente volatilizza tra le punte il carbone, e l'atmosfera di vapori così formata mantiene il passaggio della corrente, malgrado le punte non siano in contatto.

Per avere un arco duraturo è necessario andar avvicinando i carboni, allo scopo di compensare il loro consumo, abbastanza rapido in un gas come l'aria che li brucia. Le punte dei due carboni acquistano, dopo un certo tempo, degli aspetti notevolmente differenti (fig. 170); il carbone positivo, cioè quello rilegato al polo positivo del circuito, presenta come una cavità più o meno profonda e di forma irregolare, che prende il nome di cratere, mentre sul carbone negativo si produce come una prominenzza appuntita, più o meno arrotondata. Tra le due punte si produce il vero arco, leggermente violaceo, e per conto proprio poco luminoso. Invece è più luminosa la punta negativa, luminosissimo, addirittura abbagliante, il cratere positivo, da cui

emana la quasi totalità della luce dell'arco (l'85 per cento).

Parimenti, quando i due carboni sono della stessa qualità e di uguali dimensioni, il consumo del carbone positivo, per la volatilizzazione e per la sua combustione, è circa doppio di quello del negativo.

La luce dell'arco elettrico presenta uno spettro continuo, solcato da alcune linee brillanti dovute al carbonio e ad alcune impurezze dei carboni stessi. In esso l'intensità delle radiazioni più rifrangibili è assai più grande che con qualunque altra sorgente terrestre; cosicchè tale luce è particolarmente adatta alla fotografia.

Dalla distribuzione dell'energia nei diversi posti dello spettro si può, in base alle considerazioni svolte nel § 66, dedurre la temperatura dell'arco e del cratere. Tale temperatura è stata anche valutata con altri metodi, e tutte le determinazioni concordano nell'attribuire al cratere una temperatura compresa tra 3500° e 3800°. E siccome, qualunque siano le condizioni di formazione dell'arco, la distribuzione dell'energia nel suo spettro è invariabile, pare che la diversa luminosità totale del cratere al variare della corrente, sia dovuta all'estensione di esso, mentre una superficie determinata di questo emetterebbe una quantità costante di luce. Così la temperatura del cratere sarebbe costante, qualunque sia la corrente impiegata, il che farebbe pensare che nel cratere avvenga un fenomeno a temperatura costante, forse l'ebollizione regolare del carbonio.

La costituzione dei carboni ha grande influenza sulle condizioni di buon funzionamento, e sul rendimento. Per favorire la formazione del cratere, che è di grande importanza per la luminosità, il carbone positivo, costituito di sostanza compatta e molto dura, porta un'anima di carbone più tenero e volatile. Inoltre il carbone positivo è ordinariamente più grosso del negativo, in modo che dei due se ne consumino eguali lunghezze, e che, collocando il negativo al di sotto, esso non produca ombra alla luce viva del cratere.

Anche nella fabbricazione dei carboni l'industria ha saputo ottenere eccellenti risultati. Con gli archi normali di 8 ampère, ottenuti con carboni rispettivamente di 12 e 8 mm. di diametro, il consumo orario è di circa 5 centimetri all'ora.

166. Arco a corrente alternata. — Si può avere un arco persistente anche con correnti alternate, nel qual caso i due carboni presentano un comportamento simile, sia nel consumo, che nella luminosità e nella forma.

Così mentre con le correnti continue, disponendo il carbone positivo in alto, il cratere proietta in basso la luce che in esso si genera, con le correnti alternate, nello spazio di sopra e al di sotto dell'arco, la luce è ugualmente distribuita.

Una differenza caratteristica con gli archi a corrente continua si ha nel valore della tensione da impiegare: mentre nel primo caso si ricorre a f. e. m. superiori a 40 volta, con le correnti alternate basta una tensione minore, da 23 volta in sopra. Il rendimento luminoso è però minore, a pari energia spesa, con le correnti alternate.

La luminosità di una lampada ad arco eccitata da correnti alternate non è costante, ma segue alquanto le rapide variazioni periodiche della corrente. Ciò non produce gravi inconvenienti con gli oggetti fissi, perchè l'occhio non avverte tali variazioni, per la persistenza delle immagini nella retina. Invece il fenomeno riesce marcatissimo con gli oggetti in moto, i quali si vedono diversamente illuminati nelle successive posizioni, generando degli effetti piuttosto spiacevoli. Qualche cosa di simile, ma in misura incomparabilmente minore, si verifica anche con le lampade a incandescenza.

167. Rendimento luminoso delle lampade ad arco. — Con due carboni verticali, esattamente l'uno sul prolungamento dell'altro, la luminosità della lampada non presenta notevoli differenze nei vari piani verticali passanti per i carboni. Invece in uno di questi la luminosità dipende moltissimo dall'inclinazione sotto cui si riceve la luce dell'arco.

Ciò si spiega pensando che negli archi a corrente continua la sorgente luminosa è costituita in fondo dal cratere positivo, che è disposto al di sopra e rivolto in basso. Avendosi una diversa intensità luminosa nelle varie direzioni, non si può più parlare che in base a convenzioni speciali dell'intensità luminosa della lampada. Si chiama *intensità media sferica* l'intensità di una sorgente che, irradiando ugualmente in tutte le direzioni, emetta un flusso luminoso totale eguale a quello emesso dalla sorgente reale.

Questa intensità media sferica è perciò la media delle intensità emesse in tutte le direzioni.

Per le lampade ad arco, la tensione variando poco, l'intensità luminosa dipende quasi esclusivamente dall'intensità della corrente, ed è all'incirca proporzionale ad essa.

Il consumo specifico per candela sarebbe in media mezzo watt, cioè 1/6 di quello relativo alle lampade a incandescenza e 1/4 di quello relativo alla lampada Nernst.

168. Regolatori delle lampade ad arco. Resistenza addizionale. — Per avvicinare i carboni, a misura che essi si van consumando, si ricorre ad alcuni meccanismi più o meno complicati, detti regolatori; tale meccanismo deve inoltre permettere che i carboni, all'istante dell'accensione della lampada, vengano prima messi in contatto, poi staccati e portati alla distanza voluta.

Tale risultato è ottenuto per mezzo di elettro-calamite convenientemente disposte. In certi casi il carbone negativo, disposto al di sotto, è fisso, e solo il positivo si va abbassando a misura che i carboni si consumano; ciò produce però l'inconveniente di spostare sempre verso il basso il punto luminoso.

Si hanno quindi degli altri regolatori, detti *a fuoco fisso*, nei quali vengono contemporaneamente spostati i due carboni.

Quando si abbia da fare, come è quasi sempre il caso, con un sistema di distribuzione in derivazione o a tensione costante, nessun regolatore è capace praticamente di impedire delle oscillazioni notevoli nell'intensità e, quel che è peggio, delle intensità elevatissime nell'istante in cui i carboni vengono in contatto.

A tal fine si dispone in serie con la lampada una resistenza metallica, detta *resistenza addizionale*, la quale, aggiungendosi alla resistenza bruscamente variabile dalla lampada, limita le oscillazioni dell'intensità. Effettivamente la pratica le ha riconosciuto di grandissima importanza sulla regolarità di funzionamento della lampada.

Naturalmente la resistenza aggiunta obbliga a ricorrere a una tensione superiore a quella che basterebbe per la lampada. Così se la resistenza è di due ohm, e la corrente che deve traversare la lampada ha l'intensità di dieci ampère, nella resistenza, per la legge di Ohm, si ha una perdita di tensione di 20 volt; e quindi se la lampada richiede 45 volta ai morsetti, la tensione totale da impiegare deve essere di 65 volt; pare che non si possa scendere al di sotto di questo valore se si vuole un funzionamento regolare. È evidente d'altra parte che ciò obbliga a una perdita di $20 \times 10 = 200$ watt in riscaldamento della resistenza addizionale, sopra 450 watt consumati dall'arco.

La resistenza addizionale può essere notevolmente diminuita quando parecchi archi son disposti in serie, poichè allora ognuno ha, fino a un certo punto, come resistenza addizionale l'insieme degli altri.

169. La luce emessa dalle varie sorgenti è irradiazione di energia che viene alla sorgente restituita o dalla combustione locale o dalla corrente elettrica. Sappiamo pure che la frazione di energia che ha effetto luminoso sulla totale energia luminosa ed oscura irradiata aumenta all'aumentare della temperatura.

Ma difficilmente si potrà elevare ancora la temperatura della sorgente, al di sopra di quella dell'arco, che corrisponderebbe alla ebollizione del carbone, mentre tutti gli altri corpi bollirebbero a temperature inferiori.

Or l'emissione di sola energia luminosa, o meglio di una grande frazione di energia luminosa sull'energia totale termo-luminosa irradiata, può ottenersi anche a temperature piuttosto basse coi fenomeni detti di luminescenza, quali si osservano con le scariche elettriche nei gas rarefatti, poichè in tal caso l'emissione non è più retta dalle leggi enunciate per i solidi o liquidi incandescenti, ed essa può trovarsi in gran parte limitata nel campo dello spettro luminoso.

Ciò avviene, ad esempio, in certi tipi di lucciole; ciò avviene in parte, nella nuova lampada di Cooper a vapori di mercurio, che possiede perciò un rendimento elevatissimo.

Motori elettrici e loro applicazioni.

170. Invertibilità delle dinamo a corrente continua. — Mentre una dinamo produce la corrente s'incontra uno sforzo per continuare la rotazione, e l'energia elettrica ottenuta è

l'equivalente del lavoro da noi compiuto. Si devono quindi esercitare delle azioni elettromagnetiche tra l'indotto e l'induttore, ed è facile riconoscere nel caso dell'anello di Pacinotti, il modo come queste azioni si producono, e dedurne che inviando nella dinamo, per virtù d'una sorgente esterna, la stessa corrente, l'indotto dovrà girare spontaneamente in senso inverso, sviluppando lavoro meccanico.

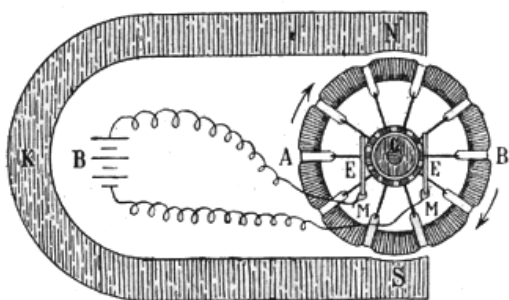


Fig. 171.

Si consideri, ad esempio, l'anello di Pacinotti della fig. 171, posto tra i poli d'un magnete, che può anch'essere un'elettrocalamita, e nel cui collettore, per mezzo delle spazzole E, si lancia la corrente d'una pila. La corrente, giunta a una delle spranghe del collettore, si divide nelle due serie di spire circondanti le metà dell'anello; le due correnti si ricongiungono, dopo traversate le spire, nella sbarra opposta, per tornare alla pila. — L'anello equivale, per virtù di queste correnti che gli girano intorno, a due calamite semicircolari coi poli omonimi affacciati in A e B; e il loro insieme forma così

come un magnete unico a sbarra, diretto appunto secondo AB. I poli opposti A, B subiranno in totale quattro azioni dai poli N, S dell'induttore, e queste quattro azioni cospirano per far girare l'anello in un dato senso. Ma appena la rotazione comincia, le spazzole, abbandonano i tasti del collettore con cui erano in contatto, passano sui tasti successivi, creando nell'anello una nuova distribuzione del magnetismo avente per asse la direzione AB, sensibilmente fissa nello spazio, e imprimendo perciò all'anello un moto continuo.

Durante la rotazione dell'anello, mobile in un campo, si sviluppa una forza e. m. come in una dinamo, proporzionale alla velocità di rotazione. Questa f. e. m. e si sottrae a quella E della pila, poichè per creare una corrente nel senso di quella della pila l'anello dovrebbe esser girato da noi in senso inverso a quello in cui ruota l'anello-motore. — La forza elettromotrice risultante $E-e$ darà nel circuito una corrente

$$i = \frac{E - e}{r}$$

ove r indica la resistenza totale. — Si deduce da questa formola

$$i r = E - e$$

e moltiplicando per i , e spostando convenientemente i vari termini, si ottiene infine

$$Ei = i^2 r + e i$$

la quale ci dice che il lavoro chimico compiuto dalla pila a ogni minuto secondo è maggiore del lavoro $i^2 r$ impiegato per l'effetto termico nel circuito; la differenza $e i$ rappresenta appunto il lavoro meccanico svolto dal motore, che non poteva essere creato dal nulla.

Adunque la *potenza meccanica* d'un motore è eguale al prodotto della sua forza controelettromotrice e , per l'intensità della corrente che traversa l'indotto. — Quanto alla forza controelettromotrice essa coincide con la f. e. m. che svilupperebbe la macchina, come dinamo, alla stessa velocità; ed è proporzionale alla velocità e all'intensità del campo creato dall'induttore.

In un buon motore la forza controelettromotrice e è molto prossima alla forza elettromotrice E della sorgente, mentre la resistenza totale del circuito è molto piccola. Ne viene che nel circuito sono in giuoco due forze elettromotrici opposte molto grandi rispetto alla resistenza r ; mentre è piccola la loro differenza $E-e$ cui corrisponde la corrente. — Per esempio nel circuito avente la resistenza di 1 ohm possono agire insieme la E eguale a 150, e la e eguale a 140 volt; la corrente sarà

$$i = \frac{150 - 140}{1} = 10 \text{ ampere}$$

Ma se bruscamente si arrestasse il motore, per un accidente qualsiasi, e si annullasse perciò la forza contro e. m. e che dipende solo dalla velocità, la corrente assumerebbe l'intensità disastrosa di 150 ampère, e l'indotto si fonderebbe sotto l'azione d'una corrente così elevata. S'interpongono perciò delle valvole fusibili per evitare i sovraccarichi d'intensità dovuti a un forte rallentamento della velocità del motore.

171. Motori a corrente alternata. — Il principio della invertibilità delle dinamo è generale: qualunque dinamo può servire come motore in condizioni opportune.

Il fenomeno è molto complesso con le macchine a corrente alternata; occorre cioè che la corrente esterna la cui energia si vuol convertire in lavoro con una dinamo sia anch'essa alternata, dello stesso periodo di quella che questa tende a produrre, e le inversioni della corrente si devono compiere in una determinata fase della rotazione dell'indotto. — La realizzazione di queste condizioni è molto delicata, e in ogni modo si resta obbligati a far muovere l'indotto con velocità rigorosamente legata a quella della macchina che crea la corrente alternata.

Ciò costituiva una grande inferiorità delle correnti alternate nei trasporti di forza, mentre d'altra parte proprio le correnti alternate son le più adatte ai trasporti a grandi distanze, per la facilità con cui si può trasformare la loro tensione; e questa inferiorità era decisiva nei tempi non molto recenti in cui le condizioni esatte di funzionamento di questi motori *sincroni* a corrente alternate non eran note come adesso. — S'intende da quanto precede l'importanza industriale della scoperta di Galileo Ferraris, la quale permise la costruzioni dei *motori a campo rotante* capaci di mettersi in moto con piena indipendenza dal periodo della corrente alimentatrice, e il cui funzionamento pratico è forse più semplice di quello dei motori a corrente continua.

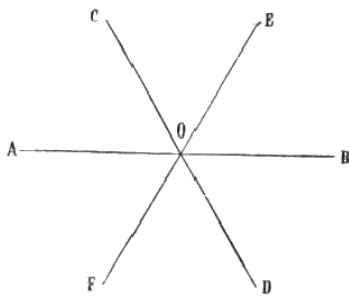


Fig. 172.

Ricordiamo che un sistema di telai, come i tre AB, CD, EF che si vedono in proiezione nella fig. 172, formanti fra loro angoli eguali, ruotando intorno all'asse O, normale al piano della figura, in un campo magnetico normale all'asse, genera nei tre telai tre correnti alternate trifasiche, o spostate di $\frac{1}{3}$ di periodo l'una dall'altra. Or il Ferraris prevede col calcolo e ritrovò con l'esperienza che inviando queste tre correnti in tre telai identici ma *fissi*, si genera nel loro interno un *campo magnetico rotante* intorno all'asse O dei telai, e capace perciò

(§ 137) di trascinare una massa metallica o un sistema opportuno di circuiti chiusi su se stessi, girevole intorno a O. — Sul sistema mobile, entro limiti molto larghi della sua velocità di rotazione, si esercita sempre uno sforzo, che è massimo per un certo valore di essa; e lo sforzo diviene nullo solo quando il sistema e il campo girano sincronamente.

Noi dobbiamo però contentarci di questi cenni rudimentali sul principio di funzionamento dei motori elettrici, che son divenuti insieme alle dinamo, dei meccanismi in cui c'è ormai ben poco da migliorare, grazie alla felice successione dei perfezionamenti costruttivi sempre suggeriti dallo studio teorico delle condizioni di funzionamento.

172. Applicazioni dei motori. — Le qualità preziose del motore elettrico, quali la regolarità del suo andamento, l'adattabilità a tutte le esigenze più svariate della tecnica, e la facilità con cui può trasmettersi ad esso, per mezzo di due semplici fili flessibili e per nulla ingombranti l'energia elettrica occorrente, concentrando in un piccolo volume una sorgente potentissima di forza motrice, hanno sempre più esteso il campo di applicazione di questo apparecchio.

Così il motore elettrico ha permesso la soluzione di due problemi industriali importantissimi: il trasporto della forza a distanza, ed il frazionamento della forza negli opifici. — Non occorre neanche ricordare come la trasformazione dell'energia delle cadute d'acqua in energia elettrica, la sua trasmissione in condutture estendentisi per centinaia di chilometri, e la sua riconversione in energia meccanica hanno permesso lo sfruttamento di sorgenti formidabili di forza, che restavano

inopere per la difficoltà di costruire in luoghi inaccessibili le grandi officine d'utilizzazione, o di trasportare in condizioni economiche remunerative la materia prima e i prodotti manufatturati. — E ci porterebbe molto fuori dei limiti che ci sono imposti il solo enumerare gli impianti prodigiosi, che han permesso di trasformare in regioni industriali di prim'ordine alcuni paesi che mai, utilizzando le motrici termiche, avrebbero potuto sostener la concorrenza con gli altri, i quali trovano sul posto il carbone occorrente.

Meno grandiosa, ma pure molto utile, è l'applicazione dei motori al frazionamento della forza. — Il grande opificio moderno, ove l'operaio ha a disposizione il motorino indipendente che ne centuplica la produzione, mentre in una grande sala una sola motrice crea comodamente e a buon patto l'energia elettrica, che si diffonde nel modo più semplice ai più remoti angoli dell'edificio; il grande opificio così diverso dall'antica officina, ingombra di trasmissioni aeree o sotterranee, e quindi di cinghie, roteggi, alberi telodinamici (sempre di portata limitatissima), deve la sua attuale struttura, tanto efficace, all'applicazione dei motori elettrici.

Può considerarsi come un caso di frazionamento di forza la applicazione dei motori alla trazione elettrica. — All'officina una dinamo stabilisce una differenza di potenziale tra una rete aerea e le rotaie; la corrente sviluppata traversa l'asta reggente la carrucola o *trolley* che serve per stabilire il contatto, mette in movimento i motori e per le rotaie si riporta alla dinamo, cosicchè questa può considerarsi come una pompa che aspiri l'acqua da una condotta aperta, a lieve declivio nel suolo, e la cacci sotto pressione in una condotta forzata, dalla quale dopo aver perduta la pressione attraverso a una turbina, l'acqua ritorna alla prima condotta e alla pompa.

Meno incoraggiante sembra la prova fatta dall'energia elettrica nell'automobilismo. Certo incontrando per via il tranquillo automobile elettrico spinto dall'azione continua e dolcissima del suo motore a corrente continua, non si resta troppo contenti del suo turbolento e fortunato rivale a benzina, che procede tra scosse, fremiti e fumo rivoltante. Ma finchè non sarà risolti il problema dell'accumulatore di grande capacità e potenza e piccolo peso, l'automobile elettrico resterà sempre un veicolo di lusso, e in ogni caso non potrà mai essere adatto per le grandissime percorrenze.

Telegrafia e telefonia.

173. Avvisatori elettrici. — La fig. 173 mostra il modo di funzionare d'una soneria elettrica; M è il *bottone*, che premuto contro due lamine metalliche ne determina il contatto, e permette alla corrente della pila P di stabilirsi in un circuito. Questo comprende un'elettrocalamita E e un'ancora che, per una molletta toccante l'estremo di una vite, tiene chiuso il circuito; ma appena passa la corrente l'ancora è attirata, e la corrente interrotta periodicamente come nel primario d'un rochetto di Ruhmkorff. Il moto alternativo dall'ancora, portante un martelletto B produce lo scampanio.

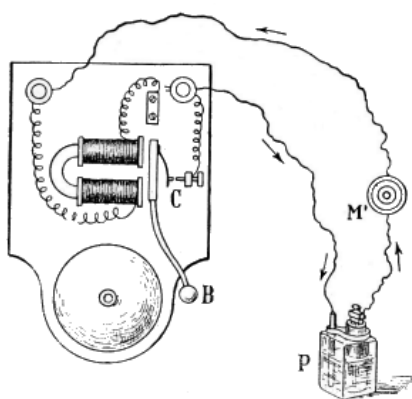


Fig. 173.

174. Telegrafo Morse. — Il tipo più semplice e primitivo di telegrafo, che è ancora abbastanza in uso, è quello di Morse, fondato sulle proprietà delle elettrocalamite. — Con esso l'ufficio trasmettitore invia delle correnti di durata più o meno breve in un filo conduttore; la corrente all'ufficio ricevitore traversa un'elettrocalamita, che attira un'ancora e imprime un segno più o meno lungo su un nastro di carta messo in movimento da un sistema d'orologeria. — La descrizione del ricevitore, cioè dell'apparecchio nel quale si compie la ricezione della corrente, e l'impressione sulla carta dei segni trasmessi, non è agevole non avendo un modello sotto mano — e in ogni modo non ci apprenderebbe nulla d'importante.

Sarà molto più utile esaminare lo schema della fig. 174 che mostra come si possa con *un solo* filo di linea rilegare due stazioni, mettendole in grado di funzionare entrambe come trasmettitrice o come ricevitrice.

L'organo essenziale è il tasto S, che è una leva imperniata nel mezzo e comunicante in permanenza, in entrambe le stazioni, col filo di linea LL'. — Nella posizione di riposo la parte posteriore del tasto mette la linea (come nella figura) in comunicazione col ricevitore e poi con un conduttore T saldato ad una placca metallica in buona comunicazione col suolo.

Esiste inoltre in ciascuna stazione una pila M di alquanti elementi, che ha un polo in comunicazione pure con la terra e l'altro con un dischetto metallico B sottostante a un bottone corrispondente della parte anteriore del tasto.

Se ora nella stazione di sinistra, per esempio, si preme il tasto la linea non sarà più in comunicazione con R ma con B, la corrente traverserà la linea, e giunta alla stazione di destra passerà per il tasto, per il ricevitore, per il filo T, e a traverso alla terra si ricondurrà alla pila, facendo così la terra da conduttore di ritorno.

Allo stesso modo il ricevitore di sinistra sarebbe impressionato dai segnali inviati dalla stazione di destra.

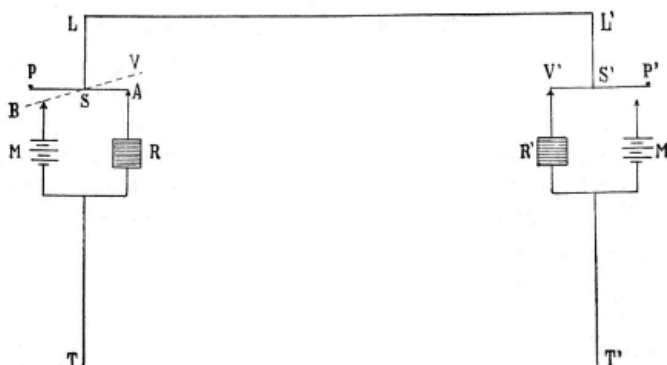


Fig. 171.

E s'intende subito come si possa, per mezzo di una combinazione opportuna di segni brevi o lunghi, rappresentare le lettere alfabetiche, i numeri ecc.

Anche la telegrafia, i cui impianti si van facendo sempre più imponenti, ha fatto dei progressi rilevantissimi. — Citeremo l'ingegnossissimo telegrafo autostampante di Hugues, che permette la impressione diretta delle lettere alfabetiche, con una trasmissione più sollecita che nel sistema Morse; le macchine Wheatstone che hanno reso enormemente più rapida la trasmissione dei segnali; il sistema di telegrafia multipla, che permette di servirsi d'un unico filo per trasmettere *contemporaneamente* alquante segnalazioni diverse. Ma il più importante successo della telegrafia si deve all'audace impresa di stabilire delle lunghe canalizzazioni elettriche sottomarine, traversando degli estesissimi Oceani. Il *cavo sottomarino*, che serve a tal uopo, è costituito essenzialmente da un sistema di conduttori interni, bene isolati, e circondato da un'armatura metallica, per dare all'insieme la necessaria consistenza meccanica, e da un rivestimento opportuno per preservarlo dall'azione corrosiva delle acque del mare.

La trasmissione d'una corrente intermittente si compie con delle gravi perturbazioni in un tale conduttore, dotato di notevole capacità elettrica e di autoinduzione; così una corrente inviata a un estremo raggiunge il suo valore normale all'altro estremo solo dopo alquanti minuti secondi; e perdura dopo un tempo dello stesso ordine di grandezza, anche dopo che si è interrotta al primo estremo la comunicazione con la pila, come avverrebbe d'una corrente d'acqua in un condotto molto ampio e lungo, di cui s'intercettino periodicamente all'origine la comunicazione con un serbatoio. — La trasmissione dei segnali richiederebbe così un tempo enorme.

Si è ovviato a questo inconveniente sostituendo ai segni del Morse, prodotti da correnti tutte in un senso ma di diversa durata, delle correnti nei due sensi, di cui la prima traccia giunge abbastanza presto all'estremo opposto della linea, e in misura sufficiente per imprimere una deviazione nei due sensi a una specie di galvanometro registratore a telaio mobile (il *siphon recorder* di Lord Kelvin).

174. Telegrafia senza fili. — Quando i Fisici si diedero allo studio minuzioso e interessante delle onde elettriche, dimostrandone l'identità con le onde luminose, non ebbero di mira che il problema scientifico importantissimo, schiuso dalle ricerche teoriche di Maxwell e dalle esperienze di Hertz. — Ma appena il nostro Marconi, concepita l'idea fortunata di applicare quelle onde alla trasmissione senza fili di segnali telegrafici, attuò l'idea semplice e in principio azzardata, con una lunga serie di tentativi tenaci e ingegnosi a un tempo, le ricerche sulle onde elettriche cambiarono bruscamente d'indirizzo; poichè mentre da Hertz in poi lo studio delle onde era spinto nel senso di accorciarne la lunghezza, per renderle più prossime a quelle luminose, con Marconi si mise in luce

la necessità di produrre e studiare onde molto più lunghe, delle hertziane. Solo queste onde di alcune centinaia di metri si prestano infatti a un'energica irradiazione nello spazio, e a un facile raccoglimento a distanze grandissime.

Il Marconi prese le mosse dall'oscillatore del Righi (fig. 175), costituito da due sfere isolate AB, immerse parzialmente nell'olio di vasellina, e che ricevono da due palline laterali, comunicanti coi poli d'una macchina elettrica, le cariche occorrenti perchè tra A e B scocchi una scintilla nell'olio. Le due scintille tra le palline laterali e le sfere A, B servono a caricare queste ultime, mentre, quando la scintilla scocca nell'olio, le due palline laterali restano escluse dal processo oscillatorio rapidissimo che si compie solo tra A e B. — Le onde ottenute, molto brevi, permisero al Righi di mettere in evidenza, come abbiamo già detto, la loro identità di comportamento con quelle luminose.

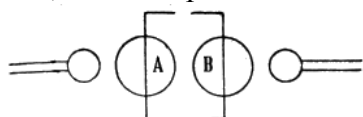


Fig. 175.

Or l'aggiunta operata dal Marconi di una lunga antenna isolata comunicante con A, mentre B comunicava col suolo, aumentò di molto la capacità elettrica e l'autoinduzione del sistema oscillante, e le onde divennero incomparabilmente più lunghe. — Egli però non ebbe di mira l'aumento del periodo delle onde, intuì solo che l'antenna all'oscillatore, e un'antenna simile annessa al ricevitore, avrebbero resa molto più facile la trasmissione; e la prova confermò la sua felice intuizione. — Nacque così il primo dispositivo di telegrafia Marconiana.

L'antenna ricevitrice raccoglieva a distanza una frazione piccolissima dell'energia delle onde, capace però di render conduttore un *coherer* e di far passare una corrente notevole in un circuito locale costituito dal coherer, da una pila e da un segnalatore qualsiasi della corrente ottenuta. — Un martelletto messo in moto automaticamente serviva a restituire al coherer la primitiva resistenza, e a renderlo così atto alla ricezione d'un nuovo segnale; mentre alla stazione trasmittitrice l'oscillatore era azionato da un rocchetto di Ruhmkorff, funzionante a intervalli per la chiusura o l'apertura d'un tasto incluso nel circuito primario.

D'allora il sistema Marconi, e quelli degli altri inventori che, presa l'idea fondamentale, ne han modificato l'attuazione copiandosi spesso l'un l'altro, si son via via alquanto modificati, cosicchè adesso si ritrova ben poco di diverso tra i vari sistemi che si contendono il campo, differendo talvolta per dei particolari insignificanti, quanto basta cioè, e basta ben poco, per strappare un brevetto. — Il risultato principale di queste innovazioni è in fondo questo: che all'oscillatore tipo Hertz-Righi si è poco a poco sostituito un dispositivo che somiglia invece molto a quello con cui il Tesla produsse le sue correnti ad alta frequenza.

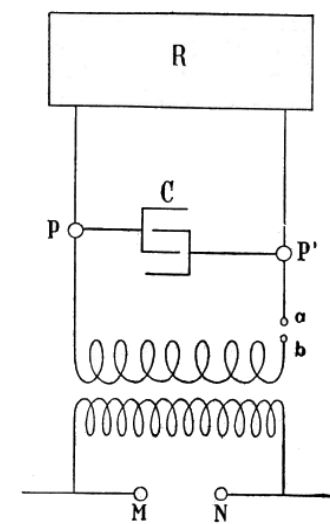


Fig. 176.

Il rocchetto R (fig. 176) messo in azione da un interruttore, o anche direttamente dalla corrente di una dinamo a corrente alternata, crea periodicamente una differenza di potenziale tra le palline a, b, caricando insieme il condensatore C rilegato ai suoi estremi. Raggiunta ogni volta la differenza di potenziale sufficiente, una scintilla scocca tra a e b; e si originano le scariche oscillanti del condensatore, le quali traversano le spire di filo corto e grosso del primario d'un trasformatore di tensione. Ai poli M e N del secondario di questo si produce così una f. e. m. alternata d'alta frequenza, che ha per periodo quello delle correnti oscillatorie traversanti il primario. Del circuito secondario, più o meno

direttamente, fa parte l'antenna.

Le oscillazioni così ottenute sono molto più lente delle Hertziane, e anche più energiche; ma, quel che è più, sono molto meno smorzate.

L'effetto del debole smorzamento è capitale nella trasmissione *sintonica* delle onde. E invero allo scopo d'impedire che diversi trasmettitori agenti insieme si disturbino mutuamente, impressionando contemporaneamente i ricevitori ovunque distribuiti, si è cercato di concatenare ciascun ricevitore a un determinato trasmettitore, sottraendolo all'azione disturbatrice degli altri.

Si potrebbe ottenere ciò nel modo migliore facendo che il ricevitore abbia un periodo proprio d'oscillazione ben definito, e sia perciò capace d'essere impressionato, per risonanza, solo quando è investito da onde del proprio periodo. Ma a causa dello smorzamento delle onde incidenti il trasmettitore equivale a un insieme di molti trasmettitori, funzionanti nello stesso tempo e con periodi alquanto diversi.

Ne risulta che lo smorzamento rende difficile la sintonia, cioè l'accordo esclusivo d'un trasmettitore con un ricevitore, e perciò le onde di uno, specialmente se molto intense, agiranno, più o meno, su tutti i ricevitori abbastanza vicini. L'inconveniente sarà reso minore diminuendo quanto più è possibile lo smorzamento delle onde emanate.

L'ideale sarebbe perciò il poter trasmettere delle onde rapide ma d'ampiezza costante, cioè delle vere correnti alternate persistenti di alta frequenza (le correnti alternate industriali hanno per periodo da $\frac{1}{25}$ a $\frac{1}{100}$ di secondo, mentre per la telegrafia senza fili occorrono dei periodi non inferiori a un milionesimo di secondo). Con queste onde la sintonia sarebbe completamente assicurata; e così vi è riuscito il Paulsen, applicando in condizioni opportune un dispositivo dovuto a Duddell.

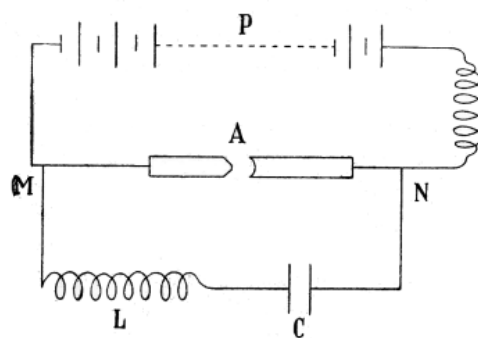


Fig. 177.

Un arco a corrente continua (fig. 177) A è alimentato da una batteria d'accumulatori P; e ai suoi poli M, N è derivato un circuito, costituito da un solenoide senza ferro L e da un condensatore C. In queste condizioni il circuito derivato è percorso da correnti alternate d'ampiezza costante, e di periodo rapido determinabile, come nelle scariche oscillanti, con la formola

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

Le correnti di Duddell non possono superare la frequenza di poche decine di migliaia al secondo. Ma il Paulsen è riuscito, raffreddando un polo dell'arco, e producendo questo in seno al gas illuminante e in presenza d'un elettromagnete opportunamente alimentato, a ottenere oscillazioni rapidissime, atte alla telegrafia senza fili. E ha potuto così trasmettere nello spazio delle onde regolari, per quanto di debole intensità, che pare siano ancora sensibili a grandi distanze, e che certo assicurano la soluzione più razionale del problema della sintonia.

Finiremo questi brevi cenni sull'importante argomento col riferire che al primitivo ricevitore, il coherer, si van sostituendo sempre nuovi ricevitori più adatti, di cui esiste ormai un gran numero, e che gareggiano per la regolarità di funzionamento e per l'elevata sensibilità.

175. Telefono. — Il telefono, inventato dall'Italiano Meucci e noto col nome di telefono Bell è costituito da un'asta d'acciaio magnetizzata A (fig. 178) avente a un estremo un rocchetto B di filo di rame che fa capo ai serrafili V, V'; avanti all'estremo dell'asta circondato dal rocchetto trovasi una lamina circolare di ferro dolce, tenuta ferma, lungo la periferia, da una scatola di legno, e che trovasi in uno stato di lieve deformazione elastica, per l'attrazione che subisce il suo centro dal vicinissimo polo del magnete.

Producendo un suono avanti all'imboccatura, la lamina entra in vibrazione, e poichè essa è magnetizzata per influenza, avvicinandosi e allontanandosi dal rocchetto B sviluppa in questo una corrente indotta variabile, e che riprodurrà con le sue variazioni d'intensità la legge di vibrazione della lamina. — Se la corrente ottenuta si riceve su un apparecchio identico, il rocchetto B corrispondente rinforzerà o indebolirà più o meno, per le correnti variabili che lo traversano, la magnetizzazione del nucleo, e quindi l'attrazione esercitata sulla lamina. Questa eseguirà perciò delle vibrazioni identiche a quelle compiute dalla lamina trasmettitrice, e solo un poco più deboli; si genera perciò nell'aria ambiente, come nella riproduzione fonografica, il suono prodotto avanti alla prima lamina, in tutti i suoi particolari.

Il ricevitore telefonico è uno squisito rivelatore delle correnti rapidamente variabili, ed è

anche molto adoperato per scopi diversi dalla trasmissione del suono. Ma come apparecchio produttore di correnti variabili, con la legge della vibrazione sonora, non è molto efficace. È stato perciò sostituito dal *microfono*, nel quale le onde sonore determinano variazioni periodiche di resistenza elettrica, per le compressioni esercitate da una lamina su una massa pulveriforme o granulosa di carbone. —

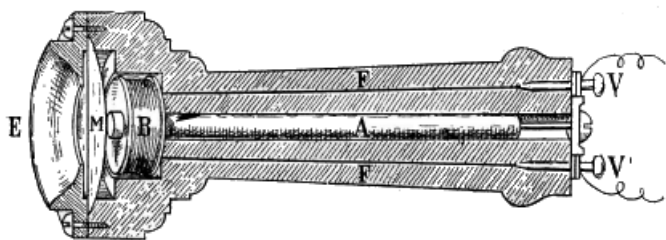


Fig. 178.

Inserendo perciò il microfono, insieme con un telefono, in un circuito che contiene anche una pila, e producendo un suono avanti alla lamina del microfono, la resistenza elettrica parziale del microfono, e perciò anche la totale del circuito, varia periodicamente e varia con essa l'intensità della corrente, seguendo le vicissitudini della vibrazione sonora. Il telefono inserito riprodurrà perciò il suono medesimo con grande intensità, poichè adesso la sorgente produttrice delle onde di corrente non è più l'energia sonora, ma l'energia della pila. Il limite all'intensità del suono ottenuto, accrescendo la f. e. m. della pila, è dato solo dal riscaldamento eccessivo del microfono, percorso da correnti troppo forti quando la f. e. m. della pila supera un certo limite.

Con l'uso del microfono la distanza cui posson trasmettersi i suoni viene molto accresciuta, cioè si può superare più facilmente la resistenza maggiore delle lunghe linee. Ma anche col microfono la portata non è molto estesa, trasmettendo sulla linea direttamente la corrente microfonica, formando cioè unico circuito col microfono, la pila, la linea, e il telefono ricevitore. E invero quando la resistenza della linea aumenta troppo, le variazioni della resistenza parziale del

microfono rappresentano una frazione sempre più piccola della resistenza totale, e i *limiti estremi* tra cui varia la corrente, da cui dipende l'ampiezza delle vibrazioni della lamina ricevitrice, si van facendo sempre più piccoli.

L'artificio di Edison ovvia in larga misura a questo inconveniente. — Alla stazione trasmettitrice (fig.179) si dispone un circuito microfonico di assai piccola resistenza comprendente il primario A d'un trasformatore-elevatore di tensione (§ 150).

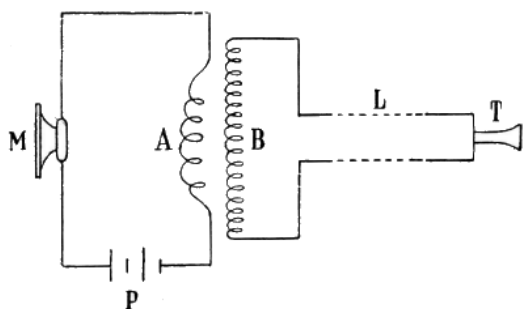


Fig. 179.

La variazione della corrente primaria, molto intensa poichè la resistenza del circuito è data quasi esclusivamente dal microfono M, dà luogo nel secondario B a correnti alternate, (seguenti la vibrazione sonora), *d'alta tensione e piccola intensità*, capaci perciò, come si è visto al paragrafo 150 citato, di superare grandi distanze di linea. — All'arrivo è disposto il solito ricevitore telefonico T.

Ma quando le linee son molto lunghe, si manifestano altri inconvenienti dei quali solo di recente s'è data la spiegazione teorica; questa ha indicato insieme la via per eliminarli.

Si tratta in fondo di questo. La linea presenta, oltre alla sua resistenza ohmica, una certa capacità elettrica, poichè il filo costituisce, con la superficie del suolo, una specie di condensatore. D'altra parte le correnti alternate che la percorrono hanno come legge di variazione quella della vibrazione sonora, e ai diversi suoni armonici del fondamentale il cui insieme costituisce il timbro e permette il riconoscimento della parola, corrispondono perciò correnti alternate sovrapposte di diversi periodi, secondo la serie dei suoni armonici. — Or si dimostra che queste correnti alternate semplici di diverso periodo, in una linea dotata di resistenza e di capacità, subiscono un doppio effetto; s'indeboliscono nel propagarsi all'altro estremo della linea, e vi giungono con un certo ritardo; e l'indebolimento, e il ritardo dipendono molto dal periodo.

Se perciò alla partenza il suono consta del fondamentale d'ampiezza A_1 e degli armonici d'ampiezze A_2, A_3, A_4 ecc., all'arrivo i diversi armonici giungono in proporzione diversa, e con ritardi diversi, e non ricostituiranno perciò un suono identico al primitivo, specialmente se al primo

suono ne segue un altro diverso, e poi altri ancora, come avviene nella irregolarissima successione di suoni che costituisce la parola.

Il risultato sarà una grande confusione tra i suoni parziali all'arrivo, e perciò sfuggiranno facilmente quelle finissime sfumature di timbro da cui noi ricaviamo l'audizione della parola.

A questo inconveniente si è cercato di riparare compensando gli effetti della capacità con l'autoinduzione della linea, poichè si dimostra che gli effetti di questa sulle onde parziali sono di tal natura che perturberebbero egualmente, da soli, la buona trasmissione, mentre, agendo insieme l'autoinduzione e la capacità, i loro effetti disastrosi si attenuano reciprocamente in gran parte. Fu questa la soluzione data al problema dal Pupin, che è riuscito con opportuni artifici, ispirati da una profonda trattazione matematica dell'argomento, ad accrescere di molto *la portata* delle trasmissioni, adoperando un egual peso totale di rame nella linea.

FINE.

INDICE.

Calore.

Termometria e calorimetria.

Quantità di calore e temperatura
Variazioni di volume dovute al calore
Quantità di calore e sua misura
Propagazione del calore
Conduzione del calore
Dilatazione dei solidi
Dilatazione dei liquidi
Dilatazione di gas
Temperatura assoluta
Calore specifico

Teoria meccanica e sorgenti del calore

Trasformazione reciproca del lavoro meccanico e sorgenti del calore
Calore e moto molecolare
I due calori specifici dei gas
Il secondo principio o principio di Carnot
Sorgenti chimiche
Energia animale
Calore solare

Fusione e solidificazione

Temperatura di fusione
Variazioni di volume nella fusione. Rigelo
Soluzione. Miscugli frigoriferi
Leghe metalliche

Evaporazione e liquefazione

Vapori saturi
Influenza della temperatura
Principio della parete fredda
Caso in cui son presenti insieme un gas e un vapore
Meccanismo dell'evaporazione. Calore di vaporizzazione
Ebollizione
Igrometria
Isoterma di un gas e di un vapore
Temperatura critica

Macchine termiche

Macchina a vapore
Il rendimento della macchina
Motori a gas

Ottica.

Ottica geometrica

Propagazione della luce – Fotometria – Riflessione

Corpi luminosi e illuminati. Raggi luminosi
Camera oscura
Ombra e penombra
La luce trasporta energia
Velocità della luce
Fotometria
Riflessione della luce
Specchi concavi
Specchi convessi

Rifrazione e dispersione della luce

Leggi della rifrazione
Riflessione totale
Rifrazione attraverso a un prisma
Lenti sferiche
Lenti convergenti
Lenti divergenti
L'occhio umano
Dispersione della luce bianca

Colori dei corpi
Acromatismo nelle lenti
Strumenti ottici

Ottica fisica

Teoria ondulatoria — Diffrazione — Interferenza — Polarizzazione

Teoria dell'emissione e delle ondulazioni
Principio d'Huyghens-Fresnel
Esperienza di Young - Specchi di Fresnel
Colori delle lamine sottili
Forma delle vibrazioni luminose. Polarizzazione
Doppia rifrazione. Produzione della luce polarizzata
Polarizzazione cromatica e rotatoria

Spettroscopia

Particolarità dello spettro solare. Righe di Fraunhofer
Spettro invisibile ultrarosso
Spettro ultravioletto
L'emissione e l'assorbimento dei solidi, Leggi di Kirchoff, di Stefan, di Wien
Emissione e assorbimento dei gas incandescenti. Spettroscopio
Inversione dello spettro

Elettricità e magnetismo

Elettrostatica

Fenomeni generali

Corpi elettrizzati. Due stati elettrici. Conduttori e isolanti
Elettroscopio a foglie d'oro
Elettrizzazione per influenza
Influenza sui corpi in comunicazione col suolo
Forze tra cariche elettriche e tra corpi elettrizzati
Legge di Coulomb
Elettrizzazione superficiale dei conduttori

Campo e potenziale elettrico

Campo elettrico
Potenziale elettrico
Movimento spontaneo delle cariche e dei corpi elettrizzati. Potenziale d'un conduttore
Potenziale del suolo
Distribuzione dell'elettricità sui conduttori. Potere delle punte

Condensatori e macchine elettrostatiche

Capacità elettrica
Energia d'un conduttore carico
Unità di misura della capacità
Misura dei potenziali
Dielettrici
Macchine elettrostatiche

Magnetismo

Calamite
Legge di Coulomb
Campo magnetico. Linee di forza
Induzione magnetica
Interpretazione dei fenomeni magnetici
Permeabilità magnetica. Isteresi
Metodi per calamitare
Magnetismo terrestre

La corrente elettrica

La corrente elettrica nei conduttori metallici

Generalità
Intensità della corrente
La pila di Volta
Effetti magnetici della corrente
Galvanometri
Elettro-calamite
Resistenza elettrica
Legge di Ohm
Calore svolto dalla corrente

- Correnti termo-elettriche
- Effetto Peltier
- La corrente negli elettroliti*
 - Fenomeno dell'elettrolisi
 - Leggi di Faraday
 - Interpretazione dei fenomeni elettrolitici
 - La spiegazione delle leggi di Faraday
 - Teoria della pila
 - Polarizzazione
- La corrente nei gas. Nuove radiazioni. Radioattività*
 - Le due forme di corrente nei gas
 - Natura della ionizzazione
 - La dispersione elettrica
 - Il valore assoluto della carica d'un ione gassoso
 - La scintilla all'aria libera
 - Scariche nei gas rarefatti
 - Raggi catodici
 - Interpretazione del fenomeno della scarica a basse pressioni
 - Raggi X
 - Radioattività
 - Le proprietà dei raggi α , β , γ
 - Le emanazioni radioattive
 - La radioattività indotta
 - Calore svolto dal radio
 - Radioattività diffusa
 - Vedute generali sulla teoria degli elettroni e la costituzione della materia
- Induzione elettromagnetica — Oscillazioni elettriche*
 - Flusso di forza
 - Induzione
 - Leggi numeriche dell'induzione
 - Autoinduzione
 - Correnti indotte ed energia
 - Oscillazioni elettriche rapidissime
 - Il rocchetto di Ruhmkorff
 - Correnti di Foucault. Trascinamento dei conduttori da parte di un campo rotante

Elettrotecnica

- Produzione industriale della corrente elettrica*
 - Pile
 - Tipi di pile a due liquidi
 - Osservazioni generali sulle pile
 - Accoppiamento delle pile
 - Accumulatori
 - Macchine dinamo-elettriche
 - Dinamo a correnti alternate
 - Dinamo a correnti continue
 - Sistema induttore della dinamo
 - Trasformatori
- Apparecchi industriali per le misure elettriche*
 - Amperometri
 - Voltimetri
 - Watt-metri
 - Misuratori di energia elettrica, o contatori wattorimetri
- Distribuzione dell'energia elettrica*
 - Generalità
 - Distribuzione in serie
 - Distribuzione in derivazione
 - Reti di distribuzione e feeders
 - Sistema a tre fili
 - Valvole fusibili. Interruttori
 - La corrente elettrica e i pericoli per la vita umana
- Le lampade elettriche*
 - Generalità
 - La lampada a incandescenza

Le lampade Nernst e a filamento metallico
Il fenomeno dell'arco
Arco a corrente alternata
Rendimento luminoso delle lampade ad arco
Regolatori delle lampade ad arco. Resistenza addizionale

Motori elettrici e loro applicazioni

Invertibilità delle dinamo a corrente continua
Motori a corrente alternata
Applicazioni dei motori

Telegrafia e telefonia

Avvisatori elettrici
Telegrafo Morse
Telegrafia senza fili
Telefono