

76/124

POLITECNICO DI TORINO
INVENTARIO N. 5NL
BIBLIOTECA CENTRALE

FOTOCOPIA DELL'ORIGINALE
PER GENTILE CONCESSIONE DELLO
OPERE
ISTITUTO ELETTROTECNICO NAZIONALE
"GALILEO FERRARIS"
GALILEO FERRARIS

PRESSO LA CUI BIBLIOTECA
L'ORIGINALE È CONSERVATO

2479

OPERE



GALILEO FERRARIS

PUBBLICATE PER CURA DELLA

ASSOCIAZIONE ELETTROTECNICA ITALIANA

OPERE

VOL. II

DI

con 32 incisioni e 2 tavole

GALILEO FERRARIS



ULRICO HOEPLI

EDIZIONE SUPERIORE DELLA REAL CASA
Milano - Tip. Fratelli di C. Rovati & C.
1903

OPERE
di
GALILEO FERRARIS

Milano, Tip. Bernardoni di C. Rebeschini e C.

2479

OPERE

INDICE

DI



GALILEO FERRARIS

R. Ist. Sup. Ingegneria - Torino

PUBBLICATE PER CURA DELLA

ASSOCIAZIONE ELETOTECNICA ITALIANA

VOL. II.

con 32 incisioni e 2 tavole.



ULRICO HOEPLI

EDITORE-LIBRAIO DELLA REAL CASA

1903.

INDICE

LE NUOVE MACCHINE DI INDUZIONE	Pag. 1
SULLA ILLUMINAZIONE ELETTRICA. CINQUE PUBBLICHE CONFERENZE:	
Conferenza prima. Equivalenza e conservazione dell'energia	17
Conferenza seconda. Della corrente elettrica	33
Conferenza terza. Delle macchine d'induzione.	51
Conferenza quarta. Sull'illuminazione per mezzo dell'arco voltaico	71
Conferenza quinta. Nuove lampade elettriche. — Divisione della luce elettrica. — Conclusioni	88
SULLE APPLICAZIONI INDUSTRIALI DELLA CORRENTE ELETTRICA ALLA MOSTRA INTERNAZIONALE DI ELETTICITÀ TENUTA IN PARIGI NEL 1881	117
Parte I. Produzione, accumulazione e distribuzione dell'e- nergia elettrica.	
§ 1.° Macchine magneto-elettriche e dinamo-elettriche	120
§ 2.° Accumulatori dell'energia elettrica	129
§ 3.° Distribuzione dell'energia per mezzo di correnti elettriche	155
Parte II. Applicazioni dell'energia elettrica.	
§ 1.° Trasmissione del lavoro meccanico a distanza	174
§ 2.° Illuminazione elettrica	208
§ 3.° Elettro-metallurgia	256
SUI LAVORI DELLA PRIMA SESSIONE DELLA CONFERENZA INTERNAZIO- NALE DI ELETTICITÀ.	271
Prima Commissione. Determinazione dell'ohm	272
Seconda Commissione. Correnti elettriche terrestri, elettricità atmosfera e parafulmini. Collegamento telegrafico degli osservatori meteorologici.	286
Terza Commissione. Scelta di un'unità di intensità di luce, ed esame dei metodi fotometrici	297
Conclusioni e proposte	311
RELAZIONE DELLA GIURIA INTERNAZIONALE PER LA SEZIONE DI ELET- TRICITÀ SUL CONFERIMENTO DEL PREMIO SPECIALE DI LIRE QUIN- DICIMILA STABILITO DAL GOVERNO E DAL MUNICIPIO DI TORINO.	317

L'ELETTROTECNICA ALL'ESPOSIZIONE UNIVERSALE DEL 1889 IN PARIGI:

Capo I. Le macchine dinamo elettriche. Pag. 337

Capo II. I sistemi di distribuzione » 364

Capo III. Applicazioni speciali. » 384

SUL CONGRESSO INTERNAZIONALE DI ELETTRICITÀ IN CHICAGO, 1893:

Capo I. Cenno sui Congressi anteriori » 419

Capo II. Congresso di Chicago » 427

Capo III. Considerazioni svolte nelle discussioni e riflessioni
intorno alle deliberazioni prese » 437

SULLA TRASMISSIONE ELETTRICA DELL'ENERGIA. (Lettura fatta alla R.
Accademia dei Lincei nella solenne adunanza del 3 giugno 1894.) » 445

NECROLOGIA. Luciano Gaulard. » 471

LE NUOVE MACCHINE DI INDUZIONE

(Nota pubblicata nell'*Ingegneria Civile e le Arti Industriali*, 1876.

Anno II, fasc. 6.)

Grazie alle recenti innovazioni, le macchine di induzione magneto-elettriche e dinamo-elettriche sono uscite dalla schiera di quelle destinate soltanto a ricerche scientifiche ed a dimostrazioni scolastiche, ed hanno preso posto fra le macchine industriali.

Oggetti di questa nota sono:

1.° Dire del principio sul quale si fonda la costruzione delle nuove macchine quanto basta perchè si possano apprezzare, senza esagerarli, i pregi che le distinguono dalle macchine anteriori.

2.° Descrivere fra i modelli più recenti delle macchine moderne quelli che sembrano destinati ad un migliore avvenire nel campo industriale.

1. Sono note le leggi di Lenz e di Neumann, le quali si possono riassumere così: se in presenza di correnti elettriche o di calamite *induttrici* si muove un circuito o parte di circuito chiuso, si manifestano in questo correnti *indotte* contrarie a quelle che dovrebbero esistervi acciocchè le attrazioni o le repulsioni mutue tra di esse e le correnti o le calamite induttrici producessero il medesimo movimento. La forza elettro-motrice indotta in una parte qualunque del circuito indotto è uguale al lavoro, riferito all'unità di tempo, che su di essa farebbero le attrazioni delle correnti o delle calamite induttrici, quando essa fosse percorsa da una corrente di intensità uguale all'unità. In altri termini, detto V il valore che avrebbe dopo il tempo t il potenziale del sistema induttore sul circuito indotto, se questo

fosse percorso da una corrente di intensità uguale ad uno, la forza elettro-motrice indotta nell'istante medesimo è espressa in unità assolute dalla derivata $\frac{dV}{dt}$. Questa derivata si annulla e cambia di segno quando la funzione V passa per un massimo o per un minimo; dunque la forza elettro-motrice indotta in una porzione del circuito indotto cambia di segno ogniqualvolta il potenziale delle attrazioni esercitate dall'induttore sopra di essa, supposta percorsa da una corrente di intensità uguale ad uno, è massimo o minimo.

Sopra questo principio generale è fondata la costruzione di tutte le macchine di induzione, delle più antiche come delle più recenti. In tutte poi il sistema induttore è costituito da calamite permanenti o da elettro-magneti attivate da correnti che si producono nella macchina stessa, ed il sistema indotto è formato da una o da più spirali con nucleo di ferro dolce, alle quali si imprime un moto di rotazione. Se una di tali spirali ha rispetto alle linee dei poli della calamita induttrice un moto angolare, il potenziale di questa sopra di essa è massimo o minimo quando l'asse del nucleo è parallelo alla linea dei poli; dunque la forza elettro-motrice indotta nella spirale cambia di segno quando l'asse di questo diventa parallelo alla retta dei poli. La posizione per cui si verifica questa condizione dicesi posizione *assiale*. La posizione della spirale, per cui l'asse del nucleo è perpendicolare alla linea dei poli dicesi invece *equatoriale*. Egli è quando le spirali passano per la posizione assiale, che in esse si inverte il segno della forza elettro-motrice indotta.

Ora v'hanno due modi di disporre le spirali indotte. O v'ha una spirale sola, o se ve ne sono parecchie, esse passano tutte contemporaneamente per la posizione assiale. Esse mandano allora nel circuito esterno correnti, le quali cambiano di segno periodicamente, ad ogni semi rivoluzione, e che, per essere utilizzate, richiedono per lo più di essere raccolte per mezzo di un commutatore destinato ad orientarle. Tale è la disposizione delle macchine d'induzione ordinarie, delle macchine di Pixii, di Saxton, di Clarke, di Siemens, di Wilde, di Ladd. Oppure v'hanno spirali disposte così, che le spire passino nella posizione assiale l'una dopo l'altra. Allora l'inversione di segno della forza elettro-motrice indotta avviene nelle singole spire successivamente. Tale è la disposizione delle macchine

più recenti, delle quali più specialmente noi ci vogliamo occupare. In queste macchine è possibile avere una corrente realmente continua e costante in intensità ed in direzione; e per questo motivo esse formano la soluzione di un problema importante nella scienza come nelle applicazioni. Chi per primo trovò questa soluzione fu il dott. Antonio Pacinotti, il quale fin dal 1860 costruì un apparecchio, di cui le moderne macchine non sono che modificazioni di particolari.¹

La parte essenziale dell'invenzione del Pacinotti sta in una forma nuova di spirale indotta, alla quale egli aveva dato il nome molto proprio di elettro-calamita trasversale, e che si denomina anche propriamente spirale od elettro-calamita *anulare* od *armillare*. Essa ha infatti la forma di un anello: è una elettro-magnete continua, senza fine, rientrante in sè stessa. Per farsene un'idea basta supporre che una elettro-magnete inizialmente dritta sia stata ripiegata in cerchio e che sieno state saldate insieme le sue estremità, nucleo con nucleo, filo con filo. Il nucleo adunque è un anello di ferro dolce, e la spirale di filo di rame isolato, che lo ricopre, non ha estremità. Questa spirale però non è d'un pezzo, ma è fatta di tanti pezzi o spirali elementari, unite tra di loro capo a capo coll'intermezzo di un pezzo metallico posto a nudo, contro cui possono appoggiarsi opportuni sfregatoi uniti agli estremi del circuito esterno. Descriveremo fra poco la disposizione ingegnosa data dal Gramme a questi pezzi; per ora ci basti sapere che col loro mezzo è possibile porre le estremità di un circuito esterno in comunicazione con punti diversi della spirale continua.

La descritta spirale anulare è posta fra i poli di una calamita permanente o temporaria e può farsi ruotare rapidamente sul suo asse. Per questo movimento nelle spirali elementari, di cui essa si compone, le quali si possono considerare come elettro-calamite dritte con nucleo cilindrico, si sviluppano forze elettro-motrici. L'asse del nucleo di una di esse è normale alla retta dei poli dell'induttore quando la spirale è affacciata ad uno di questi poli; è parallelo alla retta medesima quando, avendo l'anello rotato di 90° , la spirale si trova equidistante dai poli induttori. Nel primo caso la spirale è in posizione equatoriale, nel secondo essa è nella posizione assiale. Dunque in ogni spirale elementare si ha una forza elettro-motrice che

¹ *Nuovo Cimento*, fascicolo di giugno 1864.

cambia di segno ogniquale volta la spirale attraversa il piano condotto per l'asse di rotazione normalmente alla retta dei poli. In tutte le spirali elementari, che in un dato istante si trovano da una parte di questo piano, si ha una forza elettro-motrice diretta in un verso; in tutte quelle, che nel medesimo istante sono dall'altra parte del piano, si ha una forza elettro-motrice di segno contrario: in una metà della spirale anulare si ha una forza elettro-motrice di dato segno, nell'altra metà una forza elettro-motrice uguale e di segno contrario. Le due parti della spirale sono separate da un piano, che noi diremo *piano di inversione*.

Possiamo renderci altrimenti conto di questo fatto. L'anello di ferro dolce formante il nucleo della spirale, posto, come è, fra i poli della calamita induttrice, si trova magnetizzato per influenza: nella parte più vicina al polo *nord* di questa esso presenta un polo *sud*, e presenta un polo *nord* nella parte affacciata al polo *sud* dell'induttore. Sul diametro dell'anello parallelo alla retta dei poli dell'induttore si hanno i poli, sul diametro perpendicolare si hanno i punti neutri; l'anello rappresenta adunque un sistema di due calamite ripiegate a semicerchio ed unite coi poli omonimi.

I poli ed i punti neutri non seguono l'anello nella sua rotazione, ma stanno fissi nella posizione loro determinata dalle condizioni del sistema induttore; quindi i fenomeni che accompagnano la rotazione della spirale anulare debbono essere quelli, che succederebbero quando le spire girassero sole, e nel loro interno stessero immobili le due calamite semicircolari delle quali si è parlato. Ora è facile vedere quello che accadrebbe in questo caso. Immaginiamo a quest'uopo tagliato l'anello di ferro in uno dei poli, e disteso poi in linea retta. Così esso si riduce ad un sistema di due calamite rettilinee M, M' unite coi poli omonimi B, B' (fig. 1). Consideriamone per ora una soltanto, per esempio, la M , e supponiamo che una spirale X si avvicini rapidamente al polo A venendo dalla sinistra, e che si faccia avanzare verso B . Come è noto, si manifesta in questa spirale una forza elettro-motrice tendente a produrre una corrente contraria a quelle, che, secondo la teoria di Ampère, esistono nella calamita M . Seguitando a muovere la spirale nel medesimo verso, una forza elettro-motrice del medesimo segno seguita a manifestarsi, finchè la spirale arriva nella sezione neutra M ad uguali distanze dai poli. Oltrepassando questa

sezione, la forza elettro-motrice cambia di segno. Così nella intera corsa della spirale lungo la calamita M si debbono distinguere due periodi: nella prima metà della corsa la forza elettro-motrice è tale da produrre una corrente inversa rispetto a quelle di Ampère, nella seconda metà è tale da produrre una corrente diretta.

Se invece di camminare da sinistra a destra, come noi abbiamo supposto, la spirale si movesse da destra a sinistra, entrando dal polo B per uscire dalla parte del polo A , la forza elettro-motrice indotta sarebbe in ogni posizione della spirale contraria a quella che nell'ipotesi precedente corrisponde alla medesima posizione. Ora, se alla calamita AB è unita la $B'A'$ come mostra la figura, e se la spirale, che è entrata dall'estremità A , seguita a muoversi sempre nel medesimo verso, fino in A' , essa subisce lungo $B'A'$ la stessa induzione, che subirebbe percorrendo BA da destra verso sinistra. Quindi la forza elettro-motrice ha in $B'M'$ il verso che essa ha in MB , ed in $M'A'$ il verso che essa aveva in AM ; in una parola, la forza elettro-motrice cambia due volte di segno, in M ed in M' . Se immaginiamo l'anello rifatto e riposto a sito, noi troviamo i punti neutri M, M' in un piano prossimo a quello condotto per l'asse di rotazione perpendicolarmente alla retta dei poli della calamita induttrice; dunque ritroviamo quello che abbiamo visto già per altra via: che in tutte le spire, le quali in un dato istante si trovano da una medesima banda di questo piano, la forza elettro-motrice indotta ha il medesimo segno, e che in tutte le spire poste dall'altra banda del piano medesimo la forza elettro-motrice ha il segno contrario.

Detta S la lunghezza totale della spirale indotta, ed s la lunghezza di una parte di essa misurata in ogni istante a partire da uno dei punti che in quell'istante si trovano nel piano di inversione, noi possiamo dire, che in ogni elemento ds della spirale agisce una forza elettro-motrice $F ds$, e che F è una funzione continua di s , che si annulla e cambia di segno per $s=0$ e per $s=\frac{S}{2}$, e che per $s=S-\sigma$ ha il valore che ha per $s=\sigma$. La forza elettro-motrice totale

$$\int_0^S F ds$$

è adunque nulla, e se la spirale non è posta in comunicazione con circuiti esterni, in essa non si può manifestare una corrente continua.

In questo caso il solo effetto dell'induzione è di produrre nella spirale una distribuzione dell'elettricità libera diversa da quella, che corrisponde allo stato di riposo. Il potenziale P dell'elettricità libera, che nello stato di riposo ha un valore costante in tutti i punti del conduttore, diventa una funzione di s legata alla F dalla relazione:

$$\frac{dP}{ds} = F.$$

Questa uguaglianza prova, che P è massimo o minimo nei punti ove la forza elettro-motrice F è nulla; ma F è nulla e cambia segno nei punti ove la spirale è tagliata dal piano d'inversione; dunque il potenziale dell'elettricità libera prende, per effetto del movimento, valori diversi nei diversi punti della spirale, è massimo in uno dei punti situati nel piano di inversione, minimo nell'altro.

Se adunque noi mettiamo in contatto con due punti della spirale le estremità di un circuito esterno, questo sarà percorso da una corrente, la intensità della quale è proporzionale alla differenza dei potenziali di quei due punti. Si avrà una intensità massima, se i punti toccati sono quelli situati nel piano di inversione.

Così si fa nelle macchine ad armatura armillare; le estremità del circuito esterno sono unite a due sfregatoi, i quali vengono a contatto coi pezzi metallici uniti ai capi delle spirali elementari, nel momento in cui queste attraversano il piano di inversione.

Per farci un'idea concreta del fatto, possiamo osservare che le due metà della spirale anulare separate dal piano di inversione sono paragonabili a due pile di uguali forze elettro-motrici, fra loro congiunte co' poli omonimi. Nel circuito formato da queste due pile non può aversi corrente continua finchè esse non si congiungano con circuiti esterni; ma se ai due poli positivi tra loro uniti si attacca una delle estremità di un conduttore, che coll'altra estremità si colleghi coi due poli negativi, le due pile riescono congiunte *in quantità* e mandano nel circuito esterno una corrente. La resistenza delle due pile così

accoppiate è uguale alla metà di quella che presenterebbe ciascuna di esse: così la resistenza della spirale anulare nelle macchine di induzione riesce uguale ad un quarto di quella del filo con cui è formata.

Abbiamo supposto per semplicità che il piano di passaggio coincidesse col piano condotto per l'asse di rotazione perpendicolarmente alla retta dei poli della calamita induttrice. Ciò però non è esatto per due motivi. In primo luogo il ferro, con cui il nucleo è formato, non è mai assolutamente privo di forza coercitiva, la quale fa sì che gli stati magnetici seguano per un tratto l'anello nella sua rotazione. Ne risulta, che la linea dei poli dell'anello fa un angolo colla linea dei poli della calamita induttrice, che i poli dell'anello sono *in ritardo* rispetto a quelli della calamita induttrice e che questo ritardo cresce colla velocità.

In secondo luogo le correnti, che percorrono le due semi-spirali quando la macchina è in movimento, agiscono sulla distribuzione del magnetismo nel nucleo: se questo non fosse già altrimenti magnetizzato, si formerebbero i poli nel piano di inversione. Una tale distribuzione di magnetismo, sovrapponendosi a quella dovuta alla influenza della calamita induttrice, dà luogo ad una magnetizzazione risultante, per cui i poli sono in ritardo rispetto a quelli della magnetite induttrice. Il ritardo dovuto a questa seconda causa è tanto maggiore quanto è più intensa la corrente indotta; è adunque funzione non solo della velocità dell'armilla, ma anche della resistenza sua e di quella del circuito esterno.

Per questi motivi anche il piano di inversione è in ritardo rispetto a quello che passa per l'asse di rotazione ed è perpendicolare alla linea dei poli induttori. E siccome per avere nel circuito esterno la massima differenza dei valori del potenziale, per avere la massima intensità di corrente è necessario disporre gli sfregatoi in modo che essi comunichino sempre con quelle delle spirali elementari, le quali stanno attraversando il piano di inversione, così anche gli sfregatoi dovranno essere posti alquanto in ritardo rispetto al piano equatoriale. Il ritardo conveniente è in ogni caso determinato dall'esperienza: ma noi sappiamo che esso dipende dalla velocità di rotazione dell'anello e dalla resistenza del circuito.

Se, senza alterare le dimensioni delle singole spire, si immagina ridotto a zero il raggio di curvatura dell'asse del nucleo anulare, la spirale anulare riesce trasformata in un *gomitolo*,

senza che con ciò si cambino essenzialmente i fenomeni di induzione che vi si producono col movimento. Questa modificazione fu immaginata dallo stesso dott. Pacinotti¹ e dall'Hefner Alteneck, dietro le idee del quale Siemens ed Halske di Berlino costrussero macchine rimarchevoli. Scopo di tale modificazione era di aumentare l'induzione del nucleo sulle spire e di diminuire la resistenza di queste. Le esperienze fatte finora non sono ancora così numerose da bastare per decidere se la somma de' pregi di queste macchine superi quella degli inconvenienti. Sembra però che queste esperienze abbiano posto in chiaro un grave difetto; la spirale a gomito abbisognando di una grande velocità, la macchina si scalda molto in un lavoro continuato. È questo il difetto più grave che si rimproverasse alle macchine poderose ad armatura cilindrica del Siemens, del Wilde e del Ladd.

Quali pregi le macchine ad armatura anulare abbiano sopra le macchine di induzione ordinaria risulta dalla descrizione sommaria e dalla teoria che di loro abbiamo esposto:

1.° Mentre le macchine ordinarie danno correnti alternate che si annullano e cambiano di segno ad ogni semirivoluzione delle spirali, e che anche orientate con un commutatore non possono formare altro che una corrente di intensità periodica, la quale ad ogni mezzo giro delle spirali passa per un massimo e si annulla, nelle macchine moderne si ha una corrente diretta sempre nel medesimo verso e che può rendersi quasi assolutamente costante disponendo gli sfregatoi così che essi comunichino contemporaneamente con più d'una spirale elementare. Questa differenza costituisce il merito principale delle nuove macchine; nella scienza essa è la soluzione ingegnosa di un problema nuovo; nelle applicazioni industriali essa è talora condizione essenziale di buon esercizio, come nella galvanoplastica, ove è indispensabile una perfetta costanza della corrente; sempre è condizione utile per l'economia, siccome quella che diminuisce la perdita di energia e lo sciupio della macchina dovuti alle scintille, che nelle ordinarie macchine si producono inevitabilmente per la non mai esattissima posizione del commutatore.

2.° Costrutte col sistema delle macchine dinamo-elettriche di Siemens, di Wheatstone e di Ladd, ove alle calamite permanenti sono sostituite elettromagneti attivate da correnti indotte nella macchina stessa, le macchine ad armatura anulare hanno

¹ *Nuovo Cimento*, serie 2.^a, tomo XII, 1874, pag. 140.

con queste comune il merito di avere grande potenza con piccolo volume e piccolo peso, senza avere comune con le altre macchine di grande potenza il grave inconveniente di scaldarsi così da non permettere senza precauzioni incommode, e talora impossibili, un lavoro energico e continuato.

2. Se la possibilità di ottenere i vantaggi di cui abbiamo parlato sta nella nuova forma della spirale indotta, il merito di averli ottenuti praticamente spetta al Sig. Gramme, il quale (forse ignaro dei lavori anteriori del Pacinotti) seppe dare agli apparecchi disposizioni razionali ed ingegnose così, da trasformarli in perfette macchine industriali.¹ Noi descriveremo dapprima l'armatura anulare quale è costrutta dal Gramme; descriveremo in seguito gli ultimi modelli di macchine di induzione che questi fece costruire per le applicazioni più importanti.

La fig. 2.^a rappresenta la spirale anulare del Gramme. Il nucleo, fatto con un fascio di fili di ferro, è segnato con *A* e le spirali elementari di filo di rame rivestito sono segnate colla lettera *B*. Per facilitare l'intelligenza della sua costruzione, la spirale fu disegnata completa soltanto in una parte; in un'altra parte invece si sono supposte tolte alcune spirali, così da lasciare a nudo il nucleo di ferro; in un'ultima parte anche questo si è supposto tagliato. I capi di due spirali successive non sono congiunti immediatamente fra loro, ma sono attaccati ad una spranghetta radiale di rame *R*, la quale, ripiegandosi a squadra, passa nell'interno dell'anello e ne sporge dall'altra parte. Le parti sporgenti delle spranghette, le quali sono tante quante sono le spirali elementari componenti l'anello, e sono tra loro isolate, stanno sopra una superficie cilindrica avente per asse l'asse di rotazione dell'anello. Contro questa superficie cilindrica si appoggiano gli sfregatoi, ai quali si uniscono le estremità del circuito esterno.

Nella figura 3.^a rappresentante una piccola macchina di Gramme di uno dei modelli più antichi, si può vedere come questi sfregatoi sieno collocati. *SON* è una calamita permanente induttrice. Fra due ganasce di ferro unite alle estremità polari *S* ed *N* gira la spirale anulare *AMB M'* sul cui albero

¹ La macchina magneto-elettrica del Gramme fu presentata all'Accademia delle Scienze di Parigi nel luglio 1871. Essa è sommariamente descritta nei *Comptes rendus*, ed il sig. Niaudet-Breguet ne ha dato una descrizione particolareggiata nel numero de' *Mondes* del 28 marzo 1872.

vedesi una crosta cilindrica disegnata con righe bianche e nere: queste righe rappresentano le spranghette di rame R e gli strati coibenti che le separano. Questa crosta cilindrica è sfregata sulle due generatrici poste nel piano di inversione MM' da due spazzole o fasci di fili di rame argentati, in figura posti verticalmente, i quali comunicano coi serrafili a cui sono raccomandate le estremità del conduttore esterno.

La disposizione della spirale armillare che abbiamo descritto è quella di tutte le macchine del Gramme. Le differenze fra queste macchine stanno soltanto nella natura e nella disposizione delle magneti-induttrici, le quali per le piccole macchine da muoversi a mano sono, ne' modelli più recenti, calamite permanenti a lamine sovrapposte secondo il sistema del prof. Jamin, e nelle grandi macchine per uso industriale sono, come nelle macchine dinamo-elettriche del Siemens, del Wheatstone e del Ladd, elettro-magneti attivate dalla macchina stessa.

Nella figura 4 è disegnata nella scala $1/5$ una delle piccole macchine con calamita permanente, che il Gramme costruisce per uso scolastico o per le applicazioni terapeutiche. Vedesi verso il basso una piccola spirale anulare avente il diametro di 8 centimetri circa, la quale, mossa da una manovella coll'intermezzo di una ruota dentata e di un rocchetto, gira con piccolo giuoco fra due ceppi di ferro fissati sulla tavoletta di base della macchina. Questi ceppi di ferro formano le estremità polari di una calamita del sistema Jamin, la quale è fatta così: fermata con viti ad uno degli zoccoli una lamina di acciaio, questa è ripiegata e fermata all'altra estremità sul secondo zoccolo; nello stesso modo è fissata una seconda lamina di acciaio alquanto più lunga, che si adagia sulla prima; sulla seconda lamina è collocata una terza e così di seguito. La polarità magnetica del sistema cresce fino ad un limite col numero delle lamine, e può raggiungere valori che con calamite ordinarie di peso molto maggiore non si potrebbero ottenere.

Nelle macchine per uso industriale l'induttore è sempre un sistema di elettro-magneti. Queste sono sempre formate da un sistema di elettro-magneti diritte con nucleo cilindrico aventi un punto conseguente nel mezzo; tali sbarre cilindriche, riunite alle estremità con piastre di ghisa, costituiscono una grande calamita chiusa con due punti conseguenti, come è il nucleo anulare della spirale indotta. Furono però date a queste sbarre disposizioni diverse, e si variò il modo di attivarle.

Nelle prime macchine le sbarre formanti il nucleo delle elettro-magneti erano verticali e la corrente magnetizzante era somministrata da una spirale indotta apposita. Astrazione fatta dalla forma della spirale, la disposizione si assomigliava a quella delle macchine di Ladd: v'erano due o più spirali indotte, una (la minore se non ve n'erano che due) dava la corrente magnetizzante, la quale non usciva dalla macchina; gli sfregatoi corrispondenti comunicavano colla spirale magnetizzante delle elettro-calamite induttrici; l'altra o le altre davano la corrente esterna.

Le prime macchine per la galvanoplastica, costrutte nel 1872 pei signori Christofle e Comp. di Parigi, erano fatte con questo sistema. Esse avevano quattro sbarre verticali, fra le quali rotavano due spirali. Il corpo della macchina era di bronzo, il piede di legno.

Sullo stesso modello, ma con intelaiatura di ghisa, il Gramme costruì verso la fine del 1872 ed al principio del 1873 dieci altre macchine per la galvanoplastica, sei delle quali furono vendute alla casa Christofle e C. Una di queste è rappresentata nella fig. 5. Quattro sbarre di elettro-magneti verticali formano il sistema induttore. Esse sono fissate inferiormente al basamento di ghisa della macchina, e superiormente sono collegate da una piastra di ghisa; le spirali, che le ricoprono, sono avvolte in modo tale, che nei punti di mezzo delle sbarre si formano punti conseguenti; il tutto costituisce così una grande elettro-calamita chiusa con due punti conseguenti, o, se vuoi, rappresenta due elettro-calamite a ferro di cavallo riunite coi poli omonimi. Ai poli sono adattate appendici di ferro foggiate ad arco circolare, frammezzo alle quali girano le spirali anulari. Queste sono due e sono portate da un medesimo albero, al quale si trasmette il movimento d'una motrice per mezzo d'un cingolo. Ciascuna spirale ha i suoi sfregatoi: quelli dell'una sono in comunicazione con fasci di fili che trasmettono la corrente alle spirali magnetizzanti delle elettro-calamite induttrici, quelli dell'altra comunicano con serrafili ai quali si attaccano le estremità del circuito esterno. Queste macchine pesavano 750 chilogr. ciascuna; del quale peso 175 chilogr. erano dovuti al rame. Le loro dimensioni erano m. 1,30 di altezza e m. 0,80 di massima larghezza. La loro corrente produceva il deposito di 600 grammi d'argento all'ora, e richiedeva per esser prodotta un lavoro motore di un cavallo-vapore.

Le macchine che il Gramme costruiva in quel tempo per la produzione della luce elettrica avevano la medesima disposizione. La prima di esse alimentava un arco voltaico di intensità luminosa equivalente a 900 becchi Carcel. Essa possedeva tre anelli mobili e sei sbarre di elettro-calamite. Una delle spirali anulari attivava le elettro-calamite, le due altre producevano la corrente che si raccoglieva nel circuito esterno. La macchina pesava in tutto 1000 chilogr., il rame avvolto sulle elettro-magneti induttrici 250 chilogr., quello delle tre spirali indotte 75 chilogrammi. Lo spazio occupato era di m. 0,80 di lato su m. 1,25 di altezza. Questa macchina ha servito per molto tempo per esperienze sulla torre di Westminster a Londra senza manifestare altro inconveniente che un leggero riscaldamento e la produzione di alcune scintille tra le lastre di rame e le spazzole sfreganti.

È affatto simile alla descritta la macchina di Gramme esistente nell'anfiteatro di fisica del R. Museo Industriale italiano in Torino. Questa ha, come quella di Westminster, sei sbarre verticali di elettro-magneti; ma ha due sole spirali anulari di dimensioni diverse. La minore, che riceve l'induzione da due delle sei sbarre, dà la corrente magnetizzante per le elettro-magneti; l'altra, che ha una larghezza di fronte doppia della prima, riceve l'induzione delle altre quattro sbarre e dà la corrente esterna. Il peso della macchina è di chilogr. 850; le dimensioni dello zoccolo di ghisa sono 0,73 per 0,68, l'altezza della macchina è di m. 0,96.

Collo scopo di diminuire le dimensioni e il peso della macchina, il Gramme ha modificato leggermente la disposizione che abbiamo descritto, trasformandola in quella disegnata nella fig. 6. La macchina rappresentata da questa figura ha ancora sei elettro-magneti diritte verticali, ma gli assi di queste, invece di essere disposti in due piani paralleli, come nelle macchine anteriori, sono situati lungo gli spigoli di due prismi a base triangolare. V'hanno ancora due anelli rotanti, ma invece di essere destinati unicamente l'uno a dar la corrente magnetizzante, l'altro a dare la corrente esterna, essi permettono o di mandare la corrente totale nelle spirali magnetizzanti, cosicchè la corrente magnetizzante sia la stessa corrente esterna, nel circuito della quale son poste le spirali, o di magnetizzare le elettro-magneti con una sola spirale anulare, riservando l'altra per dare la corrente esterna, o finalmente di dare due correnti

esterne e produrre così due archi voltaici in circuiti distinti. Questa modificazione nella disposizione delle spirali indotte ha reso necessaria una nuova disposizione degli sfregatoi, sulla quale ritorneremo. La macchina così modificata pesa 700 chilogr.; la sua altezza è di m. 0,90; la sua larghezza di m. 0,65. Il rame avvolto sopra le sbarre dell'elettro-magnete pesa 180 chilogr., quello formante le due spirali anulari pesa 40 chilogr. Essa produce una luce normale di 500 becchi Carcel, la quale in esperienze fatte con grandi velocità s'è elevata fino al doppio. Quando si dirige la corrente a due regolatori, ciascuno di questi dà 150 becchi Carcel.

Negli ultimi modelli delle macchine Gramme, costrutti dopo il 1874, la disposizione delle elettro-magneti induttrici e de' circuiti è affatto diversa. Le elettro-magneti sono ancora ad asse cilindrico ed a punti conseguenti, ma sono in numero di due soltanto e sono disposte orizzontalmente. La corrente magnetizzante è sempre quella stessa che si raccoglie all'esterno; talchè circuito esterno, spirale indotta e spirali magnetizzanti formano un circuito solo.

Una macchina del nuovo modello destinata alla galvanoplastica è disegnata nella fig. 7. Due montanti di ghisa sostengono tutta la macchina, le due sbarre d'elettro-magnete son situate coll'asse orizzontale, l'una alla parte superiore, l'altra verso il basso, e tengono riuniti i montanti; la spirale anulare unica è portata da un albero d'acciaio parallelo alle sbarre di elettro-magnete e posto nel loro piano. Il rivestimento delle elettro-magneti induttrici è fatto con un semplice nastro di rame, che colla sua larghezza occupa tutta la lunghezza di una mezza sbarra: non si ha in sostanza che una spira per ogni elettro-magnete semplice. La spirale indotta, invece che di filo rotondo come nelle macchine anteriori, è formata con filo piatto molto grosso, il quale offre una rigidità sufficiente per opporsi agli effetti della forza centrifuga. Questa macchina produce, come le antiche, il deposito di 600 grammi d'argento all'ora, ma la forza motrice necessaria per produrre questo lavoro è di soli 50 chilogrammetri al minuto secondo, e le dimensioni della macchina sono ridotte assai. Il peso totale dell'apparecchio è infatti di soli chilogr. 177,50; il peso di rame avvolto sulle elettro-magneti e sulle armature anulari è di 47 chilogr.; la massima larghezza è di m. 0,55, l'altezza di 0,60. Paragonato col modello del 1872, quello del 1874 ha adunque i vantaggi di occupare uno spazio

uguale alla metà di quello richiesto dal primo, di non pesare che i tre quarti di questo, di non richiedere per la sua costruzione che circa un quarto del peso di rame che l'altro richiedeva.

Una modificazione analoga hanno ricevuta le macchine destinate alla illuminazione elettrica. Vedesi dalla fig. 8, che rappresenta una di queste macchine, come essa abbia una disposizione identica a quelle per la galvano-plastica; un'intelaiatura fatta con due montanti di ghisa, due sbarre d'elettro-magnete a punti conseguenti, ed una sola spirale anulare portata da un asse parallelo alle sbarre delle calamite induttrici. Le differenze tra le due macchine sono sole due: 1.° le spirali magnetizzanti delle elettro-magneti induttrici sono fatte con filo; 2.° la spirale indotta è munita di due raccoglitori di correnti e da due coppie di sfregatoi. Questa disposizione ha per iscopo principale di sopprimere le scintille e di permettere di accoppiare la macchina in tensione od in quantità. L'economia di spazio e di materia che la nuova disposizione ha permesso, è considerevole; una macchina della potenza normale di 200 becchi Carcel non pesa che 183 chilogr.; non contiene più di 47 chilogrammi di rame, e non ha che 0^m,55 di lunghezza, 0^m,55 di larghezza e 0^m,60 di altezza. Questi numeri riescono realmente sorprendenti se si pensa che una macchina Nollet capace di dare un arco voltaico dell'intensità di 200 becchi pesa circa 2000 chilogr. ed occupa uno spazio di 1^m,70 in lunghezza, di 1^m,30 in larghezza e di 1^m,50 in altezza.

Fra le innovazioni fatte dal Gramme nella costruzione delle sue macchine dinamo-elettriche, delle quali abbiamo dato una idea per mezzo delle figure 6, 7 ed 8, abbiamo notato questa: che la corrente destinata a magnetizzare le elettro-magneti induttrici è data non più da una spirale indotta apposita, come nelle macchine anteriori, ma è la stessa corrente che si vuole utilizzare all'esterno, la quale prima di essere trasmessa ai circuiti esterni è mandata nelle spirali magnetizzanti. Questa disposizione, per la quale le nuove macchine si scostano dal tipo delle macchine dinamo-elettriche di Ladd, per avvicinarsi al tipo primitivo delle macchine dinamo-elettriche del Siemens e del Wheatstone, permise di ridurre di assai il peso di rame necessario per la costruzione delle macchine e le dimensioni di queste. Ma senza una nuova disposizione degli sfregatoi essa avrebbe portato seco in molti casi un inconveniente assai grave.

Quando la corrente è impiegata a produrre azioni chimiche, come nella galvanoplastica e in altri casi, al cessare di essa si manifesta nel circuito una corrente detta *secondaria*, diretta nel verso opposto alla principale. Ora se del circuito in cui questa si propaga fanno parte le spirali magnetizzanti delle elettromagneti induttrici, questa corrente secondaria produce nei nuclei di ferro una polarizzazione magnetica opposta a quella che si era formata durante il lavoro regolare dell'apparecchio. Questo effetto secondario può ridursi semplicemente a fare scomparire più prontamente lo stato magnetico preesistente, ma in taluni casi può invertire la polarità delle elettrocalamite. Se questo fatto si avverasse e se poi la macchina si rimettesse in azione, la corrente che essa produrrebbe sarebbe inversa alla prima: se essa fosse destinata a produrre un deposito galvanico, distruggerebbe il lavoro fatto prima della interruzione. Il signor Gramme ha evitato questo pericolo con una disposizione semplice quanto ingegnosa. Egli munì la macchina di un interruttore automatico, il quale interrompe il circuito appenachè la macchina si rallenti tanto da rendere possibile l'inversione della corrente. Questo interruttore non è altro che un piccolo pezzo mobile a contrappeso, il quale riunisce gli sfregatoi a spazzola alle elettromagneti; finchè la corrente, e con questa lo stato magnetico delle elettromagneti è abbastanza intenso, le elettromagneti tengono attratto il pezzo mobile, ma non appena la velocità della macchina diminuisce e lo stato magnetico delle elettromagneti si affievolisce, il contrappeso fa oscillare il pezzo mobile, ed in grazia di questo movimento la spazzola che gli è unita si allontana dalle lastrine di rame contro le quali essa strisciava. Così il circuito rimane aperto e le correnti secondarie non si possono produrre. Quando dopo una fermata si vuole riprendere il lavoro, non si ha che da ristabilire con una piccola lamina metallica la comunicazione tra la spirale indotta e le elettromagneti, cosicchè il circuito si trovi chiuso; appena cominciata, la corrente riconduce essa stessa la macchina alle condizioni normali.

Dell'importanza pratica del principio, che serve di base alla costruzione delle nuove macchine, e della bontà delle disposizioni, che, grazie alla abilità ed alla attività del Gramme, queste hanno ricevuto, è prova questo fatto, che colla comparsa delle macchine a spirale anulare rinacquero le speranze di fare dell'elettricità grandi applicazioni industriali e militari, ed i

tentativi di attuare questa speranza, i quali, dopo l'impresa dell'*Alliance*, si erano ridotti a rari studi sull'illuminazione elettrica dei fari, ricominciarono con una alacrità e con una lena, che dianzi non avevano mai avuto.

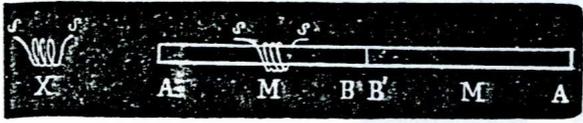


Fig. 1.

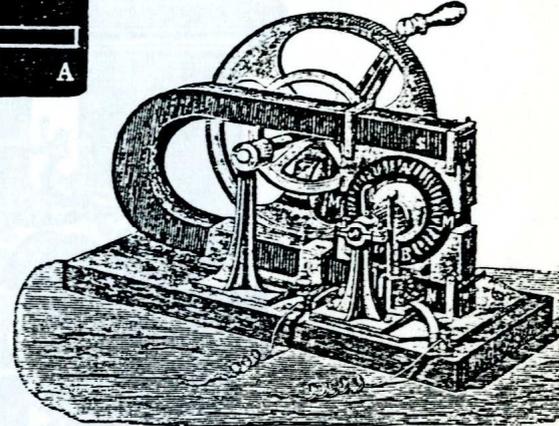


Fig. 3.

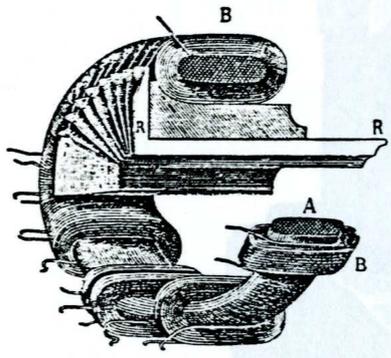


Fig. 2.

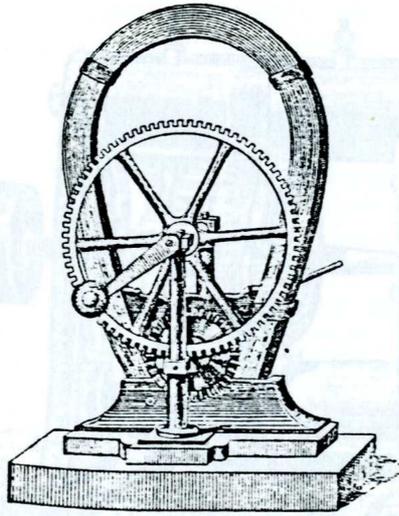


Fig. 4.

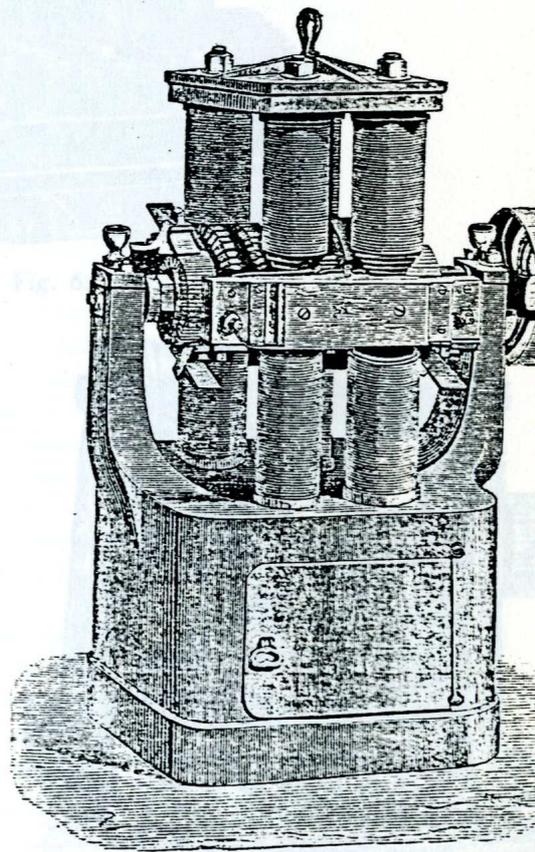


Fig. 5.

testata di legno per
la stampa di carta
e di altri materiali

Fig. 1
Macchina per la stampa di carta
e di altri materiali

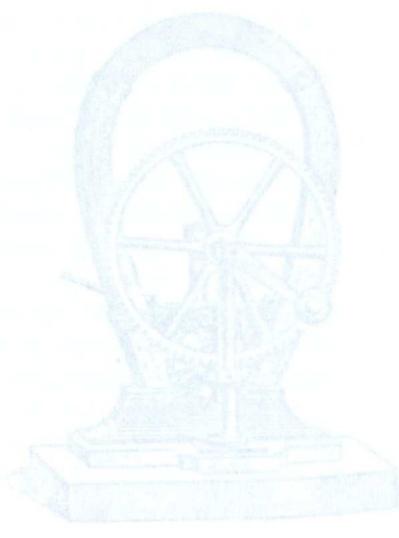
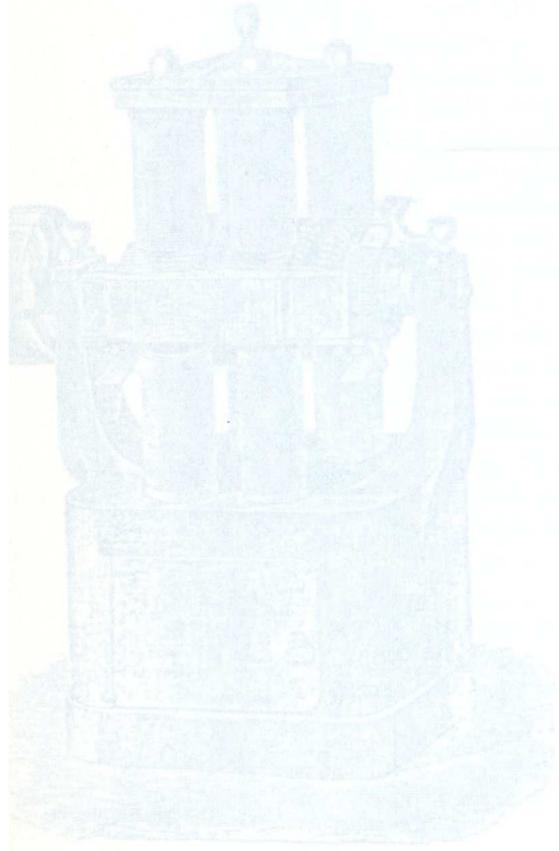
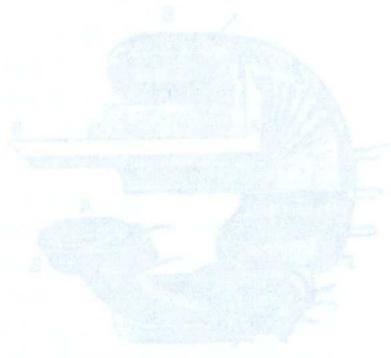


Fig. 2

Fig. 4

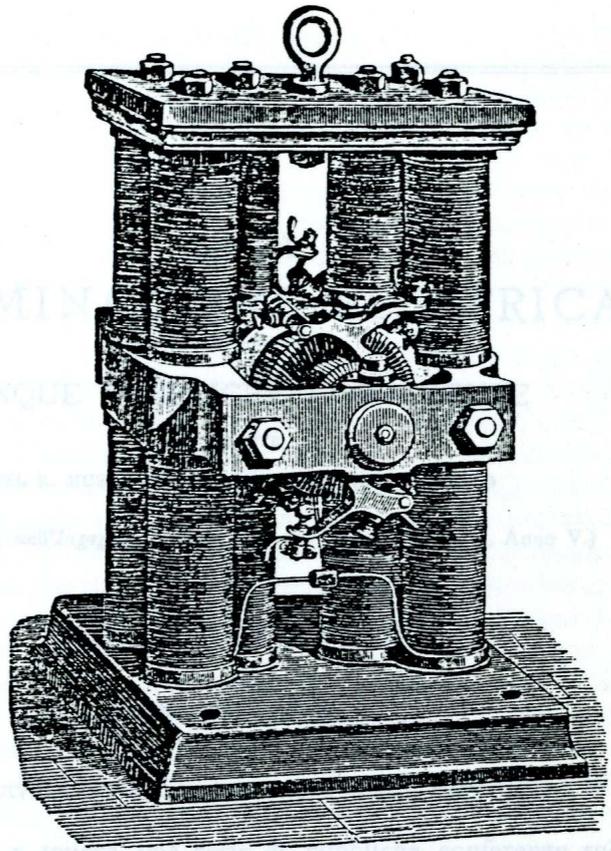


Fig. 6.

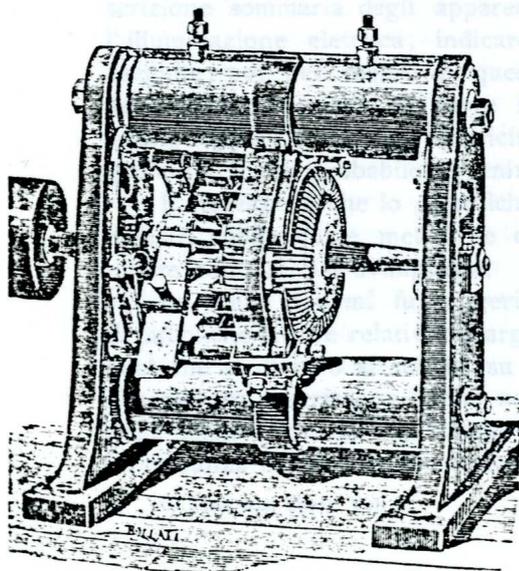


Fig. 7.

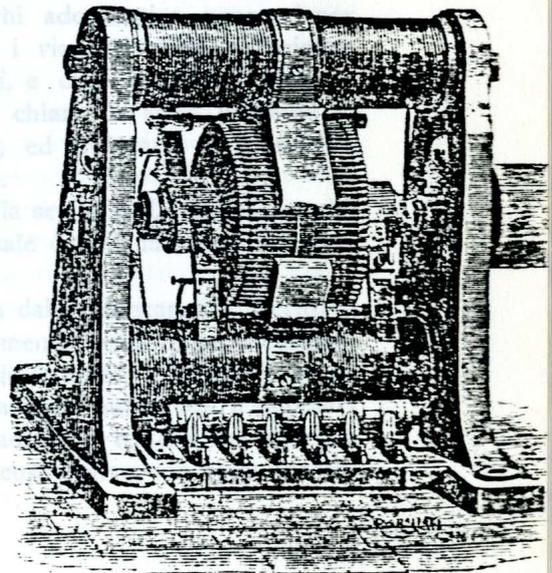


Fig. 8.

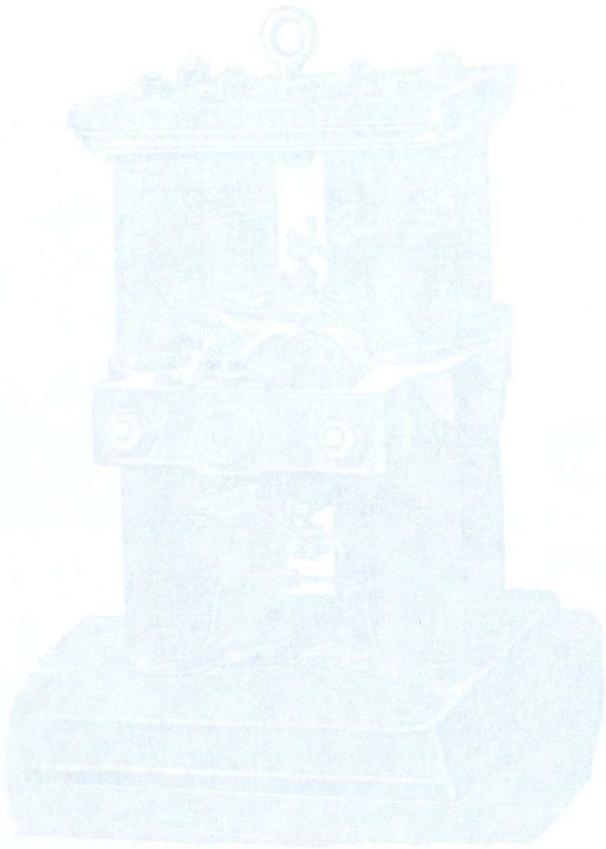


Fig. 6

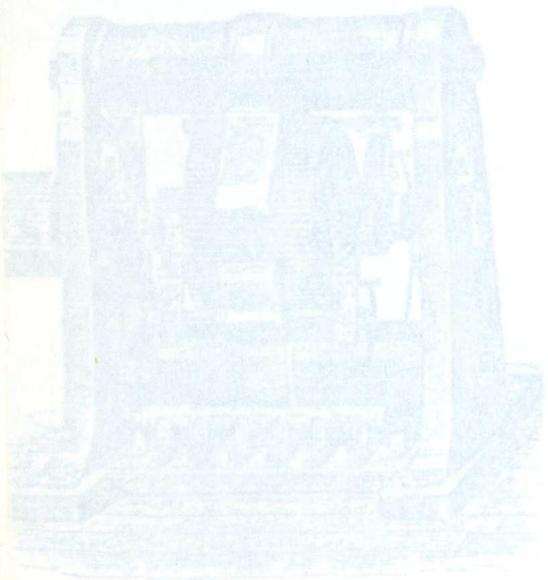


Fig. 7

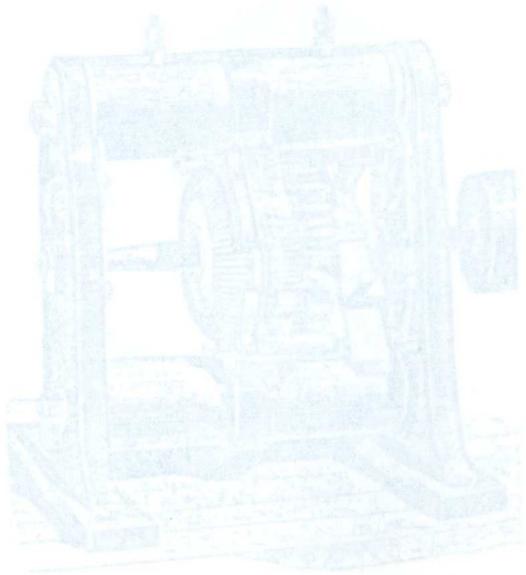


Fig. 8

SULLA ILLUMINAZIONE ELETTRICA

CINQUE PUBBLICHE CONFERENZE

TENUTE

NEL R. MUSEO INDUSTRIALE ITALIANO DI TORINO

(Pubblicate nell'*Ingegneria Civile e le Arti Industriali*, 1879, Anno V.)

CONFERENZA PRIMA

26 aprile 1879.

EQUIVALENZA E CONSERVAZIONE DELLE ENERGIE.

Invitato a tenere una serie di pubbliche conferenze sulle applicazioni industriali della Fisica, io mi proposi questo programma: Premesse alcune nozioni teoretiche, e fatta una descrizione sommaria degli apparecchi adoperati o proposti per l'illuminazione elettrica, indicare i risultati delle esperienze eseguite; poi per mezzo di questi, e colla scorta dei principi della scienza, cercare di porre in chiaro lo stato presente di questa applicazione dell'elettricità, ed indagare, se possibile, quale sia il suo probabile avvenire.

È necessario che io giustifichi la scelta della materia, e che dichiari subito quale metodo e quale ordine mi sembri conveniente adottare per svilupparla.

La scelta non mi fu suggerita dalla mancanza di scritti o di pubbliche letture relative all'argomento, e non poteva esserlo: quel che si disse o si scrisse su ciò è tanto, e alcuni di quelli che dissero o scrissero hanno nomi così autorevoli e popolari nella scienza, che io avrei avuto motivo di temere che non già la speranza di vedere o sentire cose nuove, ma solo una lu-

singhiera benevolenza a mio riguardo avrebbe potuto attirare in questa sala il scelto uditorio a cui ora volgo la parola pieno di gratitudine.

Successe il contrario: l'argomento mi fu suggerito appunto dall'abbondanza degli scritti che vi si riferiscono, e che da qualche tempo inondano i giornali tecnici, ed anche i libri. Questi scritti non sono tutti ripetizioni delle medesime cose; molti di essi sono diretti a chiamare l'attenzione del pubblico su altrettanti apparecchi diversi, ciascuno dei quali viene messo innanzi come un'ultima, definitiva, grande invenzione, la quale o per l'economia, o per la comodità dell'impianto, o per la suddivisibilità che permette, detronizza e annulla tutte le precedenti. Quest'abbondanza di apparecchi e di pubblicazioni indica due cose: 1.° Che si tratta di un problema realmente importante; 2.° Che vi ha confusione, che forse non sempre gli inventori e gli autori tennero di mira il vero nodo della questione, od anche la meta da conseguirsi. Ora l'importanza del problema e la confusione indicata, e in parte risultante dalla molteplicità delle invenzioni e degli scritti, dovevano generare nel pubblico speranze esagerate ed anche esagerati timori.

Parve quindi a me che forse non sarebbe stato inopportuno nel presentarmi a quelli fra i miei concittadini, che col trovarsi qui radunati dimostrano di non essere indifferenti ai progressi delle scienze e delle loro applicazioni, dire loro: proviamo ad allontanarci per un momento dal frastuono di tante voci diverse e discordanti, proviamo a portarci in una regione a cui non arrivi il rumore della lotta, poniamo, se ci è possibile, nella nostra mente la calma, la serenità dello studioso della scienza, riandiamo i principî scientifici che servono di base alle applicazioni, di cui ci occupiamo, e corroborata con questi la mente, facciamoci a ragionare su ciò che avremo visto o sentito. Chissà che così noi riesciamo a vedere molto più chiaro.

E tale è lo scopo che io mi sono proposto.

Il metodo? Lo scopo stesso ce lo addita. Il fatto di cui siamo oggi testimoni relativi all'illuminazione elettrica, voglio dire la molteplicità delle proposte e dei giudizi, la confusione delle lingue, è frequente nella storia delle invenzioni. E quasi sempre la causa è una stessa, la preoccupazione degli inventori pei particolari degli apparecchi, la quale, se è eccessiva, può confondere la mente e creare illusioni. I particolari di un'invenzione sono spesso ciò che la rendono pratica, che la costi-

tuiscono; ma qualche volta eziandio fanno per l'invenzione ciò che fanno le ingegnose disposizioni di parole per i sofismi: ne mascherano la insussistenza. Per evitare questo pericolo conviene non discendere alla considerazione dei particolari degli apparecchi prima di aver bene considerato ciò che in questi vi ha di essenziale, e non considerare gli apparecchi prima di aver ben inteso, e fatti nostri, i principi teorici che ne formano la base. Ma le questioni tecniche sono questioni di dare ed avere; meta suprema nelle ricerche dei metodi industriali, nelle applicazioni della scienza alla tecnologia, è riuscire a spender poco e ricavar molto. Dunque le nozioni scientifiche, che per fare un'applicazione industriale, o per giudicare di essa importa avere costantemente presenti, sono essenzialmente quelle che si riferiscono ai rapporti quantitativi fra ciò che si spende, nella produzione dei fenomeni, e ciò che dai fenomeni compiuti si ricava. Ora la fisica odierna pose in evidenza e collocò su basi salde, sicure, un grande principio, che collega e riassume sotto di sé come altrettanti corollari tutte le leggi quantitative, un principio generalissimo, di una vastità incalcolabile, un principio che non solo abbraccia la maggior parte dei fatti studiati dalla fisica, ma che si estende alle altre scienze e abbraccerà verosimilmente nell'avvenire tutta la scienza della natura e collegherà insieme i fatti in apparenza i più disparati; è questo il principio a cui si dà il nome di *principio dell'equivalenza e della conservazione delle energie fisiche*. Esso è un'estensione del teorema conosciuto dai meccanici col nome di teorema dei lavori o delle forze vive, e fa nella fisica ciò che fa questo nella meccanica: permette di giudicare della possibilità di ottenere con dati mezzi determinati effetti, di valutare di questi *numericamente* l'entità, senza bisogno di esaminare i mezzi, i particolari degli apparecchi; dico di più: senza bisogno di conoscere l'intima natura degli agenti naturali che si mettono in giuoco. Noi non dobbiamo, nè possiamo metterci in cammino senza esserci prima intesi su di esso. Ecco adunque il mio piano:

In questa prima conferenza io comincerò ad *enunciare*, per quelli dei miei uditori a cui per avventura esso non fosse familiare, il principio dell'equivalenza delle energie fisiche; poi con poche parole, e nel modo il più piano che mi sarà dato trovare, ne indicherò l'applicazione ai fenomeni termici e luminosi che intervengono nell'applicazione scientifica, di cui imprendiamo a trattare.

Guidati da queste nozioni preliminari noi potremo facilmente intendere nelle conferenze successive quale sia la costruzione e l'uso degli apparecchi, coi quali si fa o si propone di fare la illuminazione elettrica. Ridotti questi apparecchi a pochi tipi, e fatta accuratamente astrazione da quanto vi ha in essi di accessorio, diremo dei risultati delle esperienze fatte su di essi, confronteremo questi risultati colle conseguenze dei nostri principi teorici, e vedremo se da questo esame si possa ricavare un concetto chiaro dello stato attuale dell'applicazione scientifica che ci interessa, ed anche, come dissi, qualche indizio sul suo probabile avvenire.

Ubbidenti a questo piano noi dobbiamo per un momento lasciare in disparte i fenomeni speciali, di cui dovremo particolarmente trattare, e portarci nel campo più elevato e più vasto delle teorie. Ma per entrare in questo campo dobbiamo passare per quello più piano, più accessibile della pura meccanica. I fatti che si studiano nella meccanica, semplici e facili ad esaminarsi direttamente coi sensi, ci guideranno più facilmente al concetto fondamentale sul quale si aggira tutta la fisica, e su cui ci appoggeremo in tutto il nostro studio: al concetto di ENERGIA.

Un'operazione meccanica qualsiasi ha per oggetto un cambiamento della forma o della posizione di qualche corpo e si riduce sempre, se ben considerata, ad uno spostamento: ad uno spostamento dell'intero corpo, o ad uno spostamento delle parti di questo. Il valore meccanico, l'entità, il *costo* dell'operazione dipende evidentemente dalla grandezza di questo spostamento, ed è a questo proporzionale. Per esempio: se elevare un dato peso di un metro costa uno, costa due l'evarlo di due metri; se per fare che l'utensile d'una pialla si avanzi di *un* centimetro bisogna spendere *uno*, per fare che esso si avanzi di *due* centimetri bisogna spendere *due*; per far dare alla saetta di un trapano due giri, bisogna spendere il doppio di ciò che è necessario per un giro solo; due giri di una macina costano il doppio di uno, ecc.

Ma oltre che dalla grandezza dello spostamento, il valore, diciamo pure, il costo della trasformazione, dipende da un altro elemento: dallo *sforzo*, dalla forza che bisogna esercitare per produrre il moto. Se al moto non si opponesse forza alcuna, esso non costerebbe nulla. Supponiamo che non esistesse la gravità; un piccolo impulso comunicherebbe allora ad un corpo

qualunque una velocità che si manterrebbe costante, e il corpo seguirebbe ad elevarsi da sè stesso fino all'infinito, senza costo di altra spesa. Se un corpo è collocato su di un piano orizzontale levigatissimo, può essere spostato con poca fatica; se fosse possibile togliere ciò che si dice attrito, quel corpo andrebbe fino all'infinito senza costo di spesa; se le particelle da staccarsi del ferro che si piolla non opponessero all'utensile un ostacolo, la piollatura non costerebbe nulla e non potrebbe formare oggetto di operazione meccanica. Dunque, ripeto, il valore d' un' operazione meccanica dipende dalla forza. Anzi le è proporzionale: elevare ad una data altezza un peso doppio costa il doppio; e lo stesso dicasi degli altri esempi. Il valore meccanico dell' operazione è proporzionale allo spazio ed allo sforzo? è adunque proporzionale al loro prodotto: il prodotto dei due fattori, spazio e forza, è la misura del suo valore: questo prodotto si dice il *lavoro*, e si valuta in numeri adottando per unità il lavoro che si fa elevando un chilogrammo all'altezza di *un metro*. Tale unità si dice *chilogrammetro*.

Come il valore delle trasformazioni che formano l' oggetto delle operazioni meccaniche si esprime in unità di lavoro, in chilogrammetri, così è sempre un lavoro, nel senso ora definito, ed esprimibile in chilogrammetri, ciò che si spende per tenere in azione i meccanismi che le producono; è il peso di una certa quantità d' acqua che riempie la cassetta di una ruota, e che discendendo trascina seco la cassetta medesima e fa girar la ruota, dando così un numero di chilogrammetri uguale al peso moltiplicato per l'altezza della discesa; è un vapore od un gas che si dilata in un cilindro, e spinge innanzi a sè uno stantuffo, dando in ogni elemento di tempo un numero di chilogrammetri eguale al prodotto della pressione per lo spazio percorso; è lo sforzo del braccio di un uomo, che spinge una manovella, e produce un numero di chilogrammetri uguale all' arco descritto moltiplicato per lo sforzo.

I meccanismi coi quali il moto della ruota idraulica, dello stantuffo, della manovella, è trasmesso al corpo che si solleva, al bulino della piolla, alla saetta dal trapano, alla macina, non producono lavoro, solo lo trasmettono, solo cambiano i rapporti tra i due fattori *sforzo* e *spazio*; il lavoro che si ottiene è una parte di quello fatto dal peso discendente, dal vapore espandentesi o dal muscolo che si contrae. Il lavoro meccanico non è adunque gratuito mai: non lo si ha che alla condizione di

avere un peso distante dal suolo e che possa discendere, od un vapore o gas compresso che possa dilatarsi, od un muscolo non contratto che possa contrarsi, od altro equivalente. I fisici odierni dicono: quel peso, quel vapore, quel muscolo, che hanno l'attitudine a produrre lavoro, hanno una *energia*. E per ricordare che il lavoro in essi è disponibile e non si farà che quando le circostanze permetteranno il movimento, senza del quale non v'è lavoro, dicono anche: que' corpi hanno una *energia potenziale*. Una massa pesante, che ad un momento voluto si possa far discendere, od un gas tenuto compresso sono un magazzino di effetti meccanici possibili, sono un tesoro della ricchezza di cui vivono le industrie, della ricchezza di *energia*.

Fermiamoci sul primo degli esempi di cui ci siamo serviti per dare la definizione di energia potenziale: immaginiamo come poc'anzi un peso sollevato ad una certa altezza sul suolo. In esso si ha una energia uguale al peso moltiplicato per l'altezza della discesa possibile. Togliamogli il sostegno; esso cade. Seguiamolo colla mente e vediamolo nel momento che non ha ancora toccato, ma sta per toccare il suolo: in quel momento il peso è ancora lo stesso, ma l'altezza sta per diventare nulla, il prodotto sta per annullarsi, l'energia potenziale è scomparsa. Fu essa senza effetto? No, il corpo che è disceso non è quale era prima di cadere: prima era fermo, immobile, morto; ora è in moto, ha una velocità, ed in grazia di questa è capace di produrre effetti che da un corpo in riposo non si possono avere: può per esempio, battere un chiodo, schiacciare un corpo, frantumarlo. Dico di più, nulla si è perduto; e infatti se noi, invece di lasciar cadere liberamente il corpo fino al suolo, ne guidassimo il moto con una curva fissa, lungo cui esso potesse scorrere senza sentirne resistenza d'attrito, cosa che otterremmo per approssimazione, per esempio, legandolo come pendolo ad un filo, in modo che esso scendesse secondo un arco, esso potrebbe risalire di per sè, ed arriverebbe di nuovo fino all'altezza, da cui esso è disceso; solo allora si fermerebbe. Il corpo adunque, anche disceso, e solo perchè in moto, può fare un lavoro come se stesse elevato ad una altezza sul suolo: un corpo in movimento equivale peggli effetti meccanici, che può produrre, ad un corpo che può discendere da una data altezza, e solo perchè è in moto rappresenta, ha una *energia*: questa è energia visibile, in atto, e la si dice *energia attuale* ed anche *forza viva*. Prendiamo il corpo in una posizione qualunque durante il suo moto

di discesa o di ascesa: vi troviamo in generale una energia attuale ed un'energia potenziale: la somma è la sua *totale energia meccanica*.

Dall'esempio del corpo scendente per effetto della gravità, possiamo passare subito al caso generale di un sistema qualunque di corpi: in esso noi vediamo ordinariamente una energia potenziale ed una energia attuale: la prima è un lavoro disponibile, l'altra è dovuta ad un movimento, arrestando il quale con mezzi opportuni noi possiamo ricavare un lavoro.

La somma delle due, l'energia meccanica totale, è il lavoro meccanico immagazzinato nel sistema, è l'attitudine del sistema a produrre effetti meccanici, è il valore meccanico del sistema nel momento in cui lo si considera. *E questo valore meccanico di un sistema di corpi si misura in chilogrammetri.*

Se mi avete seguito fin qui e se io sono riuscito a darvi la nozione di *energia*, posso enunciarvi subito il grande principio della fisica moderna, al quale, come vi ho detto, noi dovremo appoggiarci in tutte le ricerche, che formano l'oggetto delle nostre conferenze.

Il principio si può enunciare così:

1.° Tutti gli agenti fisici, il calore, la luce, gli stati elettrici, sono energie, le quali si possono trasformare le une nelle altre in quantità equivalenti, e tutte in quantità equivalenti si possono convertire in energia meccanica. Quindi tutte le trasformazioni fisiche si possono sottoporre a valutazioni numeriche come le meccaniche, e in tutte queste valutazioni si può far uso della medesima unità di misura, del chilogrammetro.

2.° Nei fenomeni naturali non v'ha creazione nè distruzione di energia, ma solo una trasformazione di una specie di energia in un'altra; la quale si fa in rapporti perfettamente determinati e costanti.

Torniamo, per chiarire la cosa con qualche esempio, e per cominciare da casi semplici, a considerare quel corpo che cade, ragionando sul quale noi siamo pervenuti al concetto di energia. Lasciamolo cadere liberamente finchè batta sul fondo e stia. L'energia potenziale, che in esso si aveva, è scomparsa: la gravità non può più far lavoro; l'energia attuale è nulla di nuovo, come era nulla prima che il corpo cominciasse a cadere; l'energia sensibile, misurabile coi mezzi della pura meccanica, non è più. È essa perduta? La fisica ci dice: no, essa ha prodotto un effetto: il corpo caduto si è scaldato e si sono scaldati

gli ostacoli che l'hanno fermato: scomparve l'energia meccanica, ma nacque un'altra energia, nacque *calore*. In questo calore svolto non abbiamo soltanto un effetto dell'energia meccanica che è scomparsa, ma abbiamo l'energia stessa, tutta, integralmente, identica a quel che era prima, nella sostanza, solo diversa per le apparenze esterne: la quantità dell'energia termica sviluppata è proporzionale al numero di chilogrammetri consumati per svilupparla, e si può esprimere in chilogrammetri, col medesimo numero. L'unità, della quale più comunemente noi ci serviamo per valutare le quantità di calore, non è il chilogrammetro, è invece la *caloria*, e, come credo che tutti sappiate, si dice *caloria la quantità di calore necessaria per scaldare un chilogrammo d'acqua da zero gradi ad un grado*; ma noi conosciamo il rapporto tra questa unità ed il chilogrammetro e possiamo tradurre in numero di chilogrammetri un dato numero di calorie o viceversa, colla semplice moltiplicazione o colla divisione per quel rapporto. Una caloria equivale a circa 425 chilogrammetri; questo numero dicesi *l'equivalente dinamico del calore*.

Il peso, che abbiamo considerato, può discendere stando legato ad una fune e far rotare una ruota: se la velocità di questa è moderata da attriti, questi sviluppano calore, e questo calore è *equivalente* al lavoro consumato, all'energia che il corpo ha perduto.

L'acqua, che riempie le cassette di una ruota idraulica e che discende con esse, fa lo stesso effetto: produce lavori meccanici, ma produce anche calore.

Viceversa il calore si può trasformare, sempre nel medesimo rapporto, in energia meccanica: un gas che si espande, spingendo uno statuffo e facendo un lavoro, si raffredda; i getti d'aria, che escono, dopo di aver lavorato, dalle perforatrici ad aria compressa, sono freddissimi e producono attorno di sé una condensazione di vapore tale da assumere l'apparenza di getti di fumo; nelle macchine ad aria compressa si è spesso obbligati a tenere artificialmente scaldati i bossoli a stoppa per evitare la congelazione delle materie lubrificanti; nelle macchine a vapore la quantità di calore che il vapore espanso, che esce, ha in sé, è minore di quella che esso portava seco entrando nel cilindro. Ebbene, in tutti questi casi il lavoro o la forza viva prodotta sono l'equivalente dinamico del calore speso.

In un'arma da fuoco noi abbiamo una materia combustibile, la polvere pirica, la quale arde e produce calore. Egli è in



grazia di questo calore che i gas prodotti dalla combustione hanno la pressione necessaria per spingere innanzi a sè e lanciare il proiettile. Ciò facendo si raffreddano, ma l'equivalente del calore che essi avevano sta adesso nel proiettile, il quale ha una forza viva, un'energia attuale, che prima non aveva. Supponiamo che il proiettile colpisca un ostacolo: si schiaccia e si ferma. Dove andò dopo l'urto la sua energia? Essa ha di nuovo assunto la forma di calore; il proiettile e l'ostacolo contro cui esso battè si sono scaldati, e nel calore prodotto da questo riscaldamento noi ritroviamo una parte di quello prodotto dalla combustione della polvere: tutta quella parte che non si trasmise all'arma, ed attraverso alle pareti di questa all'aria esterna, che non si trasmise in causa dell'attrito all'aria che il proiettile attraversò, che non concorse a produrre i moti vibratorii a cui dobbiamo la sensazione del rumore.

Tutto, nell'esempio che citai, è l'effetto del calore di combustione della polvere. E questo calore donde nasce? Si ha una azione chimica: gli atomi di carbonio, di ossigeno, di zolfo prendono nuovi assetti, si spostano e si raggruppano sotto l'azione di quelle attrazioni mutue, che i chimici dicono *affinità*: se queste forze operano, i loro punti di applicazione si spostano, si ha in ciò una somma di prodotti di forze per spazi percorsi, una somma di lavori, un'energia potenziale che si consuma: il fenomeno avviene fra masse minime, a minime distanze, ma è quello stesso, dalla considerazione del quale noi abbiamo preso le mosse, una caduta di corpi su altri che li attraggono.

Nelle macchine a vapore avviene un fenomeno somigliante: gli atomi del carbone che noi distendiamo sulla graticola, e quelli dell'ossigeno dell'aria che vi mandiamo sopra son corpi che si attirano, che gravitano gli uni sugli altri; e, quando le circostanze lo permettono, cadono gli uni sugli altri. Dopo la caduta, l'energia delle attrazioni atomiche si trova trasformata in energia termica, in calore, precisamente come l'energia rappresentata da un grave che sta per cadere si trova trasformata in calore dopo che quello ha urtato contro il terreno e vi rimase immobile. Quel calore si trasmette in parte alla caldaia ove si accumula nel vapore; questo finalmente, come dissi già, lo porta nel cilindro della macchina, ove in parte esso si trasforma di nuovo in energia meccanica.

È impossibile essere venuti fino a questo punto e non lasciarci trascinare ancora per qualche passo da queste conside-

razioni. Il lavoro delle nostre macchine a vapore è fatto dalle affinità chimiche per cui il carbonio dei combustibili si unisce all'ossigeno dell'aria. Ora questi corpi furono già altra volta uniti, e furono separati dalle foglie dei vegetali sotto l'azione dei raggi solari, per effetto del calore e della luce solare. Noi sappiamo che una porzione della luce solare è assorbita dalle foglie delle piante; essa scompare come energia attuale, come energia di moto, ma non fa che trasformarsi, e riappare come energia potenziale: è quella energia potenziale che nel focolaio della nostra macchina a vapore ridiventa calore. Così è una parte del calore solare quello che lavora nelle nostre macchine a fuoco.

E il calore solare donde nasce? Qualunque ipotesi si faccia, esso è il prodotto di una energia potenziale consumata, è l'equivalente del lavoro di forze attrattive, è il calore svolto nell'urto di corpi che cadono gli uni sugli altri. L'attrazione, questa proprietà così diffusa della materia, di cui l'attrazione universale è una delle esplicazioni, è così l'origine di tutte le energie.

Dopo questo sguardo generale, il quale, se ci allontanò per qualche minuto dal nostro argomento, non sarà forse inutile affatto, siccome quello che avrà servito a scolpire meglio nella mente di quelli che sono meno avvezzi a queste cose, ai quali particolarmente è diretta questa prima conferenza, il concetto fondamentale di energia nella vasta estensione che esso ha oggidì, dobbiamo discendere in campo meno esteso e considerare più da vicino quella forma di energia della quale noi vogliamo studiare un modo di produzione: voglio dire l'energia luminosa, *la luce*.

Immaginiamo di avere un corpo, per esempio un solido, e diamogli quantità successive di calore, facciamo crescere per gradi la sua temperatura. L'esperienza la più volgare ci insegna che di mano in mano che la temperatura di quel corpo aumenta, questo manda attorno a sé quantità via via crescenti di calore. Manda calore tutt'attorno e scalda tutti i corpi più freddi che trovansi all'ingiro, anche quando fra esso e questi non è fraposta nessuna sostanza conduttrice, anche quando è tolta perfino l'aria, quando c'è il vuoto. Si dice che il corpo irradia calore; e dopo quello che io dissi già, noi comprendiamo subito il significato di questa parola. Il corpo caldo è un corpo in moto, è un corpo di cui le minime particelle vibrano, facendo bensì escursioni minime, ma con velocità tali da poter rappresentare

considerevoli forze vive. Trasmettere calore adunque non significa altro che trasmettere un moto vibratorio, e l'irradiazione non può essere altrimenti che una trasmissione di vibrazioni analoga a quella per cui si propagano e si sentono i suoni. L'irradiazione si fa anche attraverso il vuoto, anche negli spazi interstellari: il calore, che ci viene dal sole, ci viene attraverso una distesa di cui calcoliamo il valore, ma di cui non ci facciamo certo una adeguata idea; ed in tutta questa distesa noi non siamo autorizzati ad ammettere l'esistenza di alcuna di quelle sostanze di cui noi studiamo le proprietà direttamente coi sensi, e che pesiamo sulle nostre bilancie. Bisogna adunque ammettere fra il sole e noi, fra le stelle e noi, in tutto lo spazio, nell'interno di tutti i corpi, dappertutto ove si propaga il calore raggianti, una sostanza invisibile atta a vibrare ed a trasmettere le vibrazioni. Noi ammettiamo questa sostanza e le diamo il nome di *etere*. Come il suono nell'aria, ma con velocità incomparabilmente più grande, il calore raggianti si propaga nell'etere.

Seguitiamo a dar calore al corpo che abbiamo immaginato; tutti sappiamo: viene un momento, quando la sua temperatura è vicina a' 500°, nel quale comparisce un fenomeno nuovo; il corpo diventa visibile nell'oscurità, diventa incandescente, manda luce.

È una luce rossa e cupa la prima che si ottiene per questa via; ma se si seguita a far aumentare la temperatura del corpo che la emette, essa diventa via via più viva e dal rosso cupo passa ad un rosso più vivo, allo scarlatto; poi diventa aranciata, poi gialla, poi bianca, poi abbagliante.

Queste luci si propagano come il calore raggianti, e colla medesima velocità, si riflettono e si rifrangono colle medesime leggi; nulla di più naturale che ammettere che esse siano, come il calore, un moto vibratorio trasmesso dall'etere. La fisica odierna non ha più alcun dubbio su ciò, dacchè partendo dalla ipotesi che così sia, dalla cosiddetta ipotesi delle ondulazioni, essa è riuscita a spiegare *numericamente* pressochè tutti i fenomeni conosciuti, ed a prevederne dei nuovi. Ma non solo noi sappiamo che le luci, rossa, aranciata, bianca, che abbiamo ottenuto sono, come il calore, moti vibratorii, ma sappiamo in che cosa consistono le loro differenze.

Io ho disposto qui un apparecchio, col quale posso accumulare in una piccola massa di materia una grande quantità

di calore e con questo portare quella massa ad altissima temperatura e trasformarla in una viva sorgente di luce. L'apparecchio consiste essenzialmente in una pila di 50 elementi *Bunsen* che io feci disporre in una camera attigua, ed in due reofori che possono farsi terminare a due punte di carbone, che attualmente trovansi affacciate ed a contatto l'una dell'altra dentro a questa lanterna. Chiudo il circuito, stabilisco cioè la comunicazione tra i carboni ed i reofori; si produce una corrente elettrica la quale attraversa i carboni e passa dall'uno all'altro per mezzo delle punte, che si toccano. Allora un congegno meccanico, di cui parleremo, le distacca e le porta ad una piccola distanza l'una dall'altra. Si forma tra le due un ponte, un arco di materia in parte vaporosa ed in parte formata di particelle solide, detto l'arco voltaico, pel quale la corrente seguita a passare. Per un fatto, su cui dovremo discorrere a lungo in un'altra seduta, le punte de' carboni e l'arco che le unisce sono la sede di un grande sviluppo di calore, di buona parte del calore prodotto dall'azione chimica, che avviene nella pila, e si arroventano mandando la viva luce che voi osservate. Non occupiamoci per ora del modo con cui si produce questa luce, e consideriamo quest'arco voltaico e le punte di carbone, dalle quali esso ha origine, semplicemente come un corpo molto caldo, portato al bianco abbagliante, all'ultimo grado di lucidità a cui praticamente possa arrivare un corpo incandescente. Prima di arrivare a questa viva incandescenza, a cui corrisponde una luce sensibilmente bianca, noi sappiamo, questo corpo, se gradatamente scaldato, avrebbe mandato calore invisibile, poi calore ed una luce di colore rosso-cupo, poi una luce aranciata, poi gialla, passando per una serie continua di tinte intermedie; or bene io dico: le radiazioni prime apparse han seguitato a prodursi e si fanno tuttavia, nè solo si fanno, ma sono più abbondanti di quel che fossero prima: i successivi aspetti del fenomeno non dipendono dalla sostituzione di nuove radiazioni a radiazioni cessate, sibbene dalla sovrapposizione di radiazioni nuove alle preesistenti.

Io ricevo questa luce su di una lente, poi interpongo sul suo cammino una piastra opaca portante nel mezzo una stretta fessura, la quale riduce ad un sottile nastro il fascio di luce che vien fuori da questa lanterna. Porto davanti a questa fessura una lente acromatica convergente, e per mezzo di questa proietto una immagine della fessura su di uno schermo bianco. Ho

su questo schermo una sottile striscia luminosa, bianca o quasi. Su questa striscia, io dico, arrivano tutte sovrapposte molte radiazioni diverse; e per riconoscerlo, mi basta frapporre tra la lente e lo schermo un prisma, attraverso il quale la luce sia obbligata a passare. Io ottengo così sullo schermo non più una semplice e stretta striscia luminosa, ma tante striscie giustapposte, tutte immagini della fessura collocate l'una accanto all'altra così da formare un lungo nastro luminoso. Questo nastro è colorato di tinte diverse, e dicesi lo spettro. Non badate per ora alle linee brillanti che lo attraversano, le quali provengono dai corpi gassosi incandescenti nell'arco voltaico, e considerate, come a noi basta per lo scopo che ci interessa in questo momento, il fenomeno solo nel suo complesso: voi vedete che i colori passano gradatamente, senza salti, dal rosso cupo al rosso vivo, all'aranciato, al giallo, al verde, all'azzurro, al violetto. Tutti questi colori, tutte queste radiazioni coesistevano nella radiazione del corpo incandescente. Ma ciò non è tutto: queste radiazioni innumerevoli non sono che una parte, una piccola parte della radiazione totale. Se noi invece che in una scuola ci trovassimo, meno numerosi, in un laboratorio, e, fatto uno spettro di dimensioni minori, e quindi più vivo, vi facessimo scorrere su la faccia annerita di una stretta pila termo-elettrica, e confrontassimo le intensità della radiazione calorifica corrispondenti alle diverse parti dello spettro, troveremmo, che l'effetto termico non è lo stesso in tutti i punti: minimo, insensibile affatto alla estremità violetta, esso si fa via via più intenso andando verso la estremità rossa, e, questo è più notevole, non cessa al rosso estremo, ma continua al di là di esso, dove non v'ha più luce sensibile; continua e cresce. Raggiunge un massimo ad una certa distanza dalla estremità dello spettro visibile, poi diminuisce. Ma non scompare che ad una distanza dal rosso estremo, maggiore della lunghezza dello spettro luminoso.

Vedete in questa figura (fig. 1) rappresentata la cosa graficamente. Su di una retta DE si è portata la lunghezza dello spettro; su perpendicolari ad essa si sono portate le intensità calorifiche nelle varie parti di questo. Le estremità di queste *ordinate* furono congiunte con una curva $ABCE$; la parte bianca dell'area chiusa da questa curva è la radiazione luminosa; la tratteggiata è la radiazione oscura. Come vedete, l'intensità della radiazione luminosa non è che circa un ottavo di quella dell'oscura.

Come la radiazione non si limita da una parte al rosso cupo, così non si limita dall'altra all'estremo violetto. Per un tratto più lungo dello spettro luminoso si troverebbero da questa parte radiazioni invisibili, inattive sulla pila termo-elettrica, ma capaci di manifestarsi con azioni chimiche; ricevendo lo spettro su di una piastra fotografica, si troverebbe questo prolungato e vivamente disegnato molto al di là del violetto.

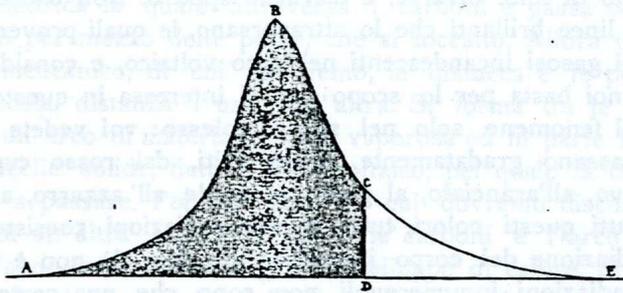


Fig. 1.

Tutte queste radiazioni, dall'estrema radiazione oscura *ultra-rossa* all'estrema radiazione invisibile *ultra-violetta*, differiscono le une dalle altre per un solo elemento, ed è che esse corrispondono a vibrazioni di diversa durata: le vibrazioni oscure dell'estremo *ultra-rosso* sono quelle che si fanno in minor numero nell'unità di tempo, quelle che hanno la maggiore durata; sono più rapide, hanno durate minori quelle che si hanno in vicinanza del rosso; le radiazioni visibili rosse son più rapide ancora, più rapide ancora sono le gialle, rapidissime le violette e finalmente più rapide di tutte le *ultra-violette* invisibili. Queste non sono congetture, le vibrazioni luminose furono contate. In questo spettro prolungato da una parte e dall'altra dai due tratti invisibili, le diverse radiazioni non differiscono nella sostanza da una serie di note musicali di altezza diversa: le radiazioni oscure verso il rosso sono le note più basse, le oscure *ultra-violette* sono le più acute.

La luce, rappresentata dalla parte mediana dello spettro, è calore, calore che impressiona l'occhio, il solo che faccia ciò non per altro che per la conformazione dell'occhio.

Se, fedeli alla odierna teoria meccanica, diciamo calore l'energia dei moti vibratorii producenti la radiazione, dobbiamo

dire: tutta la radiazione è calore, solamente è in parte calore visibile, in parte calore invisibile.

Quando un corpo va scaldandosi gradatamente, esso comincia ad emettere calore oscuro. Finchè la temperatura è inferiore a circa 500° tutta la radiazione che si ha è una parte della porzione tratteggiata $ABCD$ della figura ora disegnata. Al di là di circa 500° la radiazione oscura continua, ma ad essa comincia a sovrapporsi la luminosa; poi questa si fa via via più intensa, rappresenta frazioni crescenti della radiazione totale, finchè raggiunta l'elevatissima temperatura dell'arco voltaico, essa sta alla totale radiazione come l'area in bianco DCE sta all'area totale della nostra figura.

Questa osservazione è per noi importantissima e ad arrivare ad essa mirò tutto il mio discorso. Noi vogliamo occuparci della illuminazione, noi vogliamo studiare le condizioni economiche della produzione industriale della luce; ebbene noi abbiamo fatto già un grande passo verso la nostra meta. Infatti noi sappiamo:

1.° Che ciò che noi dobbiamo spendere per produrre luce, ossia il lavoro meccanico, od il calore equivalente ad esso, od una quantità equivalente ad altra energia, *non si potrà tutto trasformare in luce*; l'energia spesa è proporzionale alla intensità della radiazione complessiva, e di questa una minima parte è effetto utile, è luce.

2.° Almeno fino ad un limite di temperatura molto elevato, la radiazione luminosa ottenuta è una frazione della radiazione totale tanto più grande quanto più è elevata la temperatura del corpo radiante. Quindi il coefficiente di rendimento in luce, ossia il rapporto tra l'energia luminosa ottenuta e l'energia spesa, è tanto maggiore quanto più si tiene elevata la temperatura del corpo irradiante.

Ciò equivale a dire che l'economia della produzione della luce è tanto maggiore quanto più calore si concentra in piccolo spazio, quanto meno grandi sono le superficie radianti dei corpi in cui il calore si distribuisce. Scopo a cui dovremo mirare per ottenere colla massima economia, colla minima spesa, grandi quantità di luce è di trovar modo di accumulare in un piccolo spazio una grande energia.

Una esperienza confermerà queste nostre conclusioni.

Noi abbiamo in un locale qui vicino una macchina motrice a gas di *Otto* e *Langen*: essa produce un po' meno di 150 chi-

logrammetri al minuto secondo. Da questa macchina, questo lavoro è trasmesso con cingoli e con puleggie all'albero di una macchina, che studieremo in un'altra sera, ma che possiamo adoperare fin d'ora: è una macchina dinamo-elettrica, atta a trasformare l'energia meccanica, con cui la si tiene in movimento, in energia elettrica: essa ci dà una corrente elettrica, la quale producendoci calore, od azioni meccaniche o scomposizioni chimiche, od altro, può restituirci una parte della energia spesa. Non tutta però, una parte soltanto; in primo luogo, dei 150 chilogrammetri forse 50 si perdono per istrada, nelle trasmissioni, ove per gli attriti si trasformano in calore; dei 100 che rimangono sull'albero della macchina dinamo-elettrica, la massima parte si trasforma in energia elettrica, ma una porzione di questa si trasforma di nuovo in calore, e scalda tutti i fili per cui passa, compresi quelli, che vediamo qui avvolti in grandi rocchetti nella macchina stessa; rimane perciò disponibile per produrre l'effetto che noi vogliamo, ossia una radiazione luminosa di calore, soltanto una frazione della energia elettrica. Noi impareremo a valutare meglio questa frazione nel seguito delle nostre conferenze, per ora ammettiamo pure che tutti i 100 chilogrammetri possano utilizzarsi nel produrre la radiazione. Io dico, che questi 100 chilogrammetri per minuto secondo produrranno una quantità di luce tanto maggiore quanto più piccolo sarà lo spazio in cui noi concentreremo il calore ad essi equivalente. Voi vedete qui due spirali di platino. Esse sono fatte ciascheduna con un metro di filo di $1^{\text{mm}},5$ di diametro. Io le pongo entrambe nel circuito: vedete l'effetto: diventano incandescenti, mandano una luce rossa. Vi prego di tenere impresso nella vostra memoria per qualche minuto l'effetto di illuminazione che, prese insieme, le due spirali producono. Adesso io con un commutatore toglierò una delle spirali dal circuito, e farò che tutta l'energia, che prima si distribuiva fra le due, si concentri su di una sola; se le nostre previsioni sono esatte, noi dovremo vedere *questa sola mandare più luce di quello che facessero prima le due prese insieme*. Come vedete, l'esperimento conferma in modo netto la conseguenza del nostro ragionamento.

Possiamo verificare il fatto con una prova anche più decisiva. Io tolgo dal circuito della corrente entrambe le spirali, e sostituisco loro due punte di carbone affacciate, come quelle di cui ci siamo serviti poco fa per produrre lo spettro.

Così io concentro in un piccolo spazio, che a voi di lontano parrà un punto solo, quella energia che or ora era distribuita sulla spirale incandescente. Come vedete, noi otteniamo così una intensità luminosa così grande da non essere in nessun modo paragonabile con quella di prima.

Osservate una cosa: l'energia qui accumulata su queste punte di carbone è forse molto minore di 100 chilogrammetri al minuto secondo; forse non è che la metà od un terzo di essa. Ebbene 100 chilogrammetri al minuto secondo corrispondono a 360000 chilogrammetri all'ora, ossia a $\frac{360000}{425}$ calorie

all'ora, ossia a 848 calorie all'ora. È questa la quantità di calore prodotta da circa otto candele steariche, ossia, ad un dipresso da uno dei becchi di gas che illuminano questa scuola. Ora vedete che la quantità di luce data dall'arco voltaico è enorme a fronte di quella somministrata da un becco. Perché? Perché nel becco a gas il calore della combustione si distribuisce su di una grande massa, su tutta la massa dei prodotti della combustione.

Su queste considerazioni dovremo tornare e fermarci con maggiori particolari quando cercheremo di indovinare quale sia l'avvenire probabile della luce elettrica. Per ora riteniamo il fatto, e ricordiamo che per produrre molta luce con poca spesa noi dovremo procurare di accumulare molta energia in piccolo spazio.

Nella seguente conferenza vedremo come per mezzo delle correnti elettriche questo si possa effettivamente ottenere.

CONFERENZA SECONDA.

3 maggio 1877

DELLA CORRENTE ELETTRICA.

Nella nostra prima conferenza abbiamo fatto una breve e rapidissima escursione nel campo della fisica pura, onde richiamare alla nostra memoria alcune delle cose che la scienza odierna può dirci sull'intima natura di ciò che noi diciamo *luce*,

e sulle condizioni nelle quali questa si produce. Per noi, che ci siamo proposto di esaminare in questi nostri convegni uno de' modi di produzione della luce, questo doveva infatti essere il primo oggetto di studio.

La luce, vedemmo, è calore, calore sensibile all'organo della vista, solo perchè dovuto a vibrazioni di durata compresa fra certi limiti pei quali l'occhio è conformato.

Un corpo solido o liquido incandescente irradia sempre moti vibratorii diversi, pei quali le durate di vibrazione hanno infiniti valori differenti compresi fra il massimo, per cui sieno riconoscibili effetti termici, ed un minimo, dipendente dalla temperatura del corpo, e tanto minore quanto più questa è elevata.

La radiazione luminosa non si può avere se non accompagnata da una radiazione di calore oscuro, invisibile, sempre e di gran lunga più abbondante di essa. La radiazione luminosa non è mai che una frazione, una piccola frazione della radiazione totale.

Il valore di questa frazione, ossia il rapporto della radiazione luminosa alla radiazione totale, uguale a zero quando il corpo non è sufficientemente caldo per essere incandescente, piccolissimo quando il corpo comincia ad emettere la cupa luce rossa dell'estremo dello spettro, è più grande quando il corpo manda luce di un rosso più vivo, più grande ancora quando la sovrapposizione di nuove radiazioni corrispondenti a parti più avanzate dello spettro dà alla luce emessa una tinta aranciata o gialla; è massimo quando il corpo è al massimo di incandescenza, ossia quando essa è bianca; *quel valore*, in una parola, *cresce colla temperatura*.

Ora ciò che costa, l'energia che si spende, è, a parità di circostanze, proporzionale alla energia della radiazione totale; dunque abbiamo concluso: l'economia della produzione cresce, a parità di circostanze, col crescere della temperatura del corpo da cui la radiazione è fatta. Ma per ottenere un'alta temperatura bisogna, fra le altre cose, accumulare in piccole masse, soprattutto entro ristrette superficie irradianti, grandi quantità di calore: dunque è questa anche la condizione necessaria per una economica produzione di luce, ed il nostro primo problema si riduce a questo:

Trovar modo di accumulare grandi quantità di calore in piccolo spazio.

È il problema generale della illuminazione. Dopo di averlo enunciato, io discendo al caso speciale della illuminazione elettrica, e mi propongo di mostrare come e in quali condizioni esso si possa risolvere coll'impiego di una corrente elettrica.

Per raggiungere il mio scopo debbo dedicare tutta la conferenza di questa sera a ricordare alcune nozioni fondamentali sulle correnti; e nell'accingermi a ciò vi prego di tollerare che io prenda le mosse da fatti del tutto elementari e che vi dia alcune definizioni, le quali, se sono note e famigliari a buona parte di voi, io reputo tuttavia necessarie. È indispensabile che noi non adoperiamo nemmeno una parola, sul significato della quale non ci siamo preventivamente intesi; egli è solo a questa condizione che noi ci faremo dei fenomeni, che dovremo studiare, idee concrete, esatte, numeriche, ed è solo con queste che potremo portar giudizio sul valore relativo delle varie proposte e delle varie opinioni, e quindi renderci ragione dello stato presente e del probabile avvenire del problema di cui ci vogliamo occupare. Per mio conto mi propongo di non abusare delle vostra pazienza, e limiterò questi richiami preliminari al *minimum* che mi parrà indispensabile.

In un locale attiguo (non qui, per evitare il disturbo dei vapori acidi, che altrimenti mescoleremmo con quest'aria già troppo scarsa e quindi viziata), feci disporre una pila di 10 elementi alla *Bunsen*, la quale dovrà servire ai nostri esperimenti. Sono 10 apparecchi come quello che avete sotto agli occhi (fig. 2): ciascuno consiste in un vaso di sostanza non intaccabile dagli acidi, dentro al quale sta concentricamente un vaso poroso. Nello spazio fra i due recipienti v'è acqua acidulata con acido solforico; nel truogolo poroso v'è acido nitrico; nell'acqua acidulata pesca una

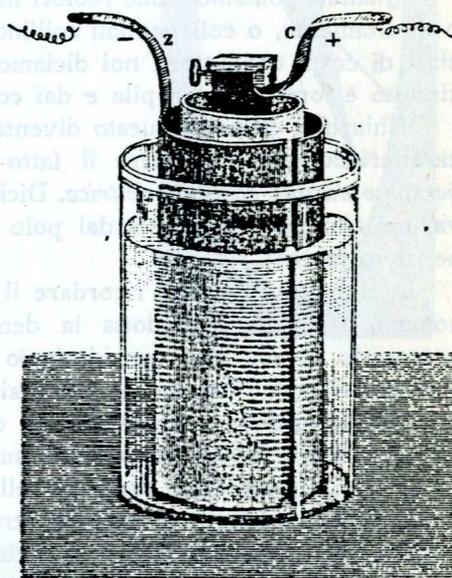


Fig. 2.

lastra di zinco amalgamata *Z*; nell'acido nitrico è immerso un prisma di carbone *C*, di quel carbone compatto, pesante, conduttore del calore e della elettricità, che incrosta abitualmente la superficie interna delle storte del gas, ed al quale per questo si dà il nome di carbone di storta.

Gli elementi così formati sono posti in serie; con morsetti e con lastre metalliche lo zinco di ciascun elemento è collegato col carbone dell'elemento precedente, ed il carbone è collegato collo zinco dell'elemento successivo. Il carbone dell'ultimo elemento e lo zinco del primo, che rimangono liberi, sono i poli positivo e negativo della pila. A questi sono attaccati due fili metallici: due reofori, l'uno positivo e l'altro negativo; e questi, isolati con gutta-perca, si prolungano fino a noi, così che noi possiamo adoperarli per mettere la pila in comunicazione con apparecchi diversi.

Quando poniamo i due reofori in comunicazione tra di loro, o direttamente, o collegandoli coll'intermezzo di una serie qualsiasi di corpi conduttori, noi diciamo che *il circuito è chiuso*. Il circuito è formato dalla pila e dai conduttori esterni.

Chiuso il circuito, questo diventa sede di fenomeni diversi caratteristici; per esprimere il fatto noi diciamo: *il circuito è percorso da una corrente elettrica*. Diciamo anche che la corrente va, nel conduttore esterno, dal polo positivo (carbone) al polo negativo (zinco).

A noi non interessa ricordare il modo di interpretare i fenomeni, dal quale è dedotta la denominazione di corrente; è necessario invece che consideriamo alcuni dei fatti per cui la corrente si rende manifesta, e che si dicono *effetti* di essa.

Gli effetti della corrente ai quali ci importa accennare sono:

- 1.° Le azioni della corrente sulle calamite.
- 2.° La produzione di calore nelle diverse parti del circuito.
- 3.° La magnetizzazione del ferro.

La considerazione del primo ci aiuterà a darci alcuni concetti fondamentali e a precisare il significato di alcune denominazioni, colle quali soltanto noi potremo porre nel nostro discorso quel rigore, senza del quale esso non ci guiderebbe alla nostra meta.

Il secondo fatto, la produzione di calore nelle diverse parti del circuito, si collega intimamente col nostro problema, ed è per noi il principale. Egli è collo studio delle leggi che lo governano che noi dovremo riconoscere se, ed a quali condizioni, la corrente elettrica possa servire a produrre la luce.

Il terzo fatto poi, la magnetizzazione del ferro prodotta dalla corrente, combinato con altri che ad esso si collegano da vicino, è messo a partito negli apparecchi per mezzo dei quali si producono le correnti *industrialmente*, a buon mercato. Se noi abbiamo visto la corrente elettrica uscire dai laboratori scientifici e dagli uffizi telegrafici per entrare nel campo veramente industriale, se si potè sul serio pensare a fare della luce elettrica un mezzo di illuminazione non solo di lusso, ma pratico, corrente, se a discor-

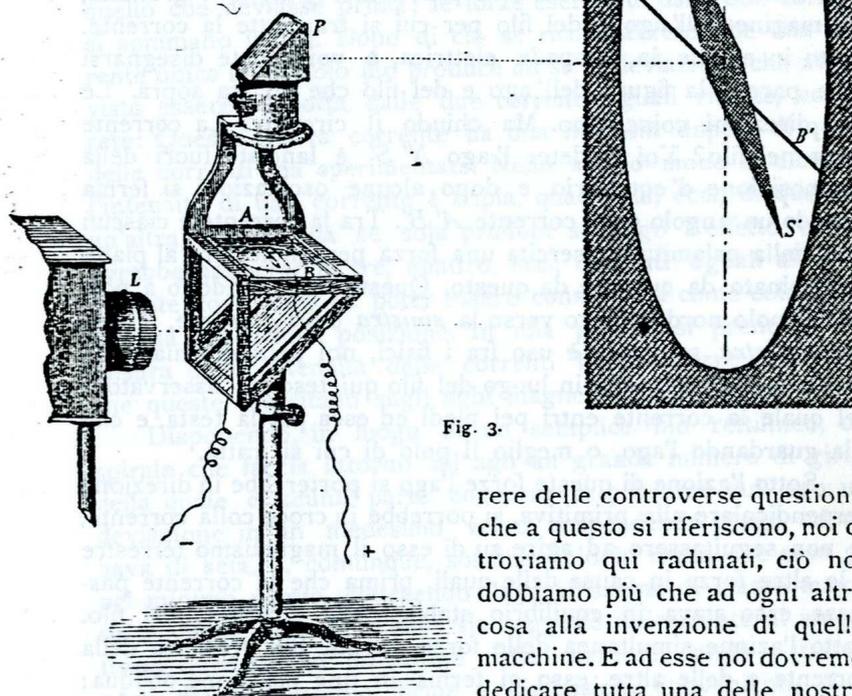


Fig. 3.

rere delle controverse questioni, che a questo si riferiscono, noi ci troviamo qui radunati, ciò noi dobbiamo più che ad ogni altra cosa alla invenzione di quelle macchine. E ad esse noi dovremo dedicare tutta una delle nostre sedute.

Nel ricordarvi questi fatti seguirò l'ordine col quale li ho nominati. Comincerò dunque a richiamare alla vostra memoria il fatto, che è certo noto a tutti, della deviazione dell'ago magnetico prodotta dalla vicinanza di una corrente.

Io ho qui un ago calamitato, posto su di una punta attorno alla quale esso può ruotare, tenendosi in un piano orizzontale (fig. 3);

immediatamente al disopra di esso, parallelamente ad esso, tesi un filo di rame orizzontale AB , le cui estremità posso far comunicare coi due reofori della pila di cui vi ho parlato. Potrò così sottoporre l'ago all'azione di una corrente rettilinea ad esso parallela.

Non potendo sperare che tutti voi poteste vedere direttamente il filo e l'ago, e riconoscere i suoi movimenti, io disposi il tutto su di una lente orizzontale, attraverso alla quale, e per mezzo di uno specchio inclinato, potrò far arrivare in direzione verticale la luce partita da una lanterna elettrica L . Al disopra sta un prisma a riflessione totale P , che dirigerà la luce di nuovo orizzontalmente, e che avendo una faccia curva funzionerà come lente, e produrrà sopra il muro, molto ingrandita, l'immagine dell'ago e del filo per cui si trasmette la corrente. Metto in azione la lampada elettrica, e voi vedete disegnarsi sulla parete la figura dell'ago e del filo che gli sta sopra. Le loro direzioni coincidono. Ma chiudo il circuito? La corrente passa nel filo? Voi vedete: l'ago $N'S'$ è lanciato fuori della sua posizione d'equilibrio, e dopo alcune oscillazioni si ferma facendo un angolo colla corrente $A'B'$. Tra la corrente e ciascun polo della calamita si esercita una forza perpendicolare al piano determinato da quella e da questo. Queste forze tendono a portare il polo nord dell'ago verso la *sinistra* della corrente, il polo sud a *destra*, se, come è uso fra i fisici, noi personifichiamo la corrente, immaginando in luogo del filo qui teso un osservatore nel quale la corrente entri pei piedi ed esca per la testa, e che stia guardando l'ago, o meglio il polo di cui si tratta.

Sotto l'azione di queste forze l'ago si porterebbe in direzione perpendicolare alla primitiva, si porrebbe in croce colla corrente, se non seguitassero ad agire su di esso il magnetismo terrestre e le altre forze in causa delle quali, prima che la corrente passasse, esso stava in equilibrio stabile nella direzione del filo. Sotto l'azione simultanea delle forze dovute alla presenza della corrente e delle altre, esso si ferma in una posizione obliqua: in quella posizione, dicono i meccanici, nella quale la somma de' momenti di tutte le forze è uguale a zero. L'angolo di deviazione, si capisce, è più o meno grande a seconda della grandezza delle forze esercitate dalla corrente, e varia nel senso in cui variano queste forze.

Immaginate adesso che, in luogo del filo con cui abbiamo sperimentato, ne venga collocato un altro, nella medesima po-

sizione; immaginate che questo filo sia anche esso percorso da una corrente nel verso di quella che passava pel primo; e supponete che si sia riconosciuto che questa seconda corrente imprime all'ago la deviazione stessa che questo prendeva sotto l'azione della prima: allora voi potrete dire che le due correnti per le loro azioni a distanza sui poli magnetici si equivalgono; col linguaggio della fisica direte: le due correnti hanno una medesima *intensità*. Prendete i due fili ove si hanno le due correnti di uguali *intensità*, e collocateli l'uno accanto dell'altro, così vicini l'uno all'altro, che rispetto ai poli dell'ago essi si possano ritenere come nella medesima posizione, e sia questa posizione comune quella che ciascuno di essi aveva negli esperimenti precedenti; voi constaterete che l'ago devierà più di quello che deviasse prima; le forze esercitate dalle due correnti si sommano infatti. Dopo di ciò se riconoscerete che una corrente unica in un solo filo produce *da sè* la deviazione che avrete visto essere prodotta dalle due correnti uguali riunite, voi direte: Questa nuova corrente ha una *intensità* doppia di quella delle correnti già sperimentate. Nello stesso modo si dice che l'*intensità* di una corrente è tripla, quadrupla, ecc., di quella di un'altra, quando *da sè* sola produce sull'ago l'effetto che si avrebbe adoperando tre, quattro, ecc., correnti uguali all'altra, e poste così vicine da poter essere considerate come coincidenti in una medesima posizione. In una parola, si prendono per misura delle intensità delle correnti le grandezze delle forze che queste esercitano sugli aghi magnetici.

Disponendo, in luogo di un semplice filo rettilineo, una spirale che faccia intorno all'ago un grande numero di giri, e della quale ciascuna parte concorra a produrre sull'ago una deviazione in un medesimo verso, sospendendo l'ago ad una bava di seta, o, comunque, sostenendolo in modo che esso giri pel minimo sforzo, sottraendo l'ago all'azione di masse magnetiche vicine, così che esso sia soggetto unicamente al magnetismo terrestre ed all'azione della corrente, dando a tutte le parti dell'apparecchio forme e dimensioni convenienti, si capisce come sia possibile fare delle intensità misure delicate e precise.

Orbene, dall'intensità della corrente dipendono le grandezze di tutti gli effetti di questa. Fra gli altri dipende dall'intensità della corrente la produzione di calore nelle varie parti del circuito, la quale è, di tutti gli effetti della corrente, quello che

più particolarmente ci occorre considerare, e del quale vi ho detto di volervi parlare.

Che in un conduttore percorso da una corrente *si possa* sviluppare calore voi avete visto già. Mi servii infatti di una corrente per rendere incandescenti le spirali di platino e le punte di carbone, con cui cercai di verificare innanzi a voi sperimentalmente le conclusioni della nostra prima seduta. In modo meno brillante, ma tuttavia abbastanza evidente, possiamo accertarci del fatto un'altra volta colla nostra pila di 10 elementi. Inserisco infatti nel circuito una spirale di sottile filo di platino? Questa si arroventa subitamente.

Che poi lo sviluppo di calore che si ha in questa spirale, al quale è dovuta l'incandescenza, dipenda, in grandezza, dalla intensità della corrente, si vede subito. Il circuito è disposto in modo che di esso fa parte il filo teso in vicinanza dell'ago magnetico, col quale abbiamo sperimentato poc' anzi; proietto un'altra volta l'immagine di quest'ago. Questo, che quando il circuito è rotto, è parallelo al filo, devia quando la corrente passa e rende incandescente la spirale. Con questa deviazione esso ci dà un indizio sulla intensità della corrente, dalla quale è prodotto lo sviluppo di calore di cui siamo testimoni. Noto la deviazione, e poi inserisco un lungo filo di ferro nel circuito; diminuisce così la deviazione dell'ago, e nel tempo stesso diminuisce l'intensità della luce mandata dalla spirale di platino.

Adunque la quantità di calore svolta in una determinata porzione del circuito varia col variare della intensità della corrente. Con quale legge? Evidentemente non è qui, in una scuola, che noi potremmo pensare a fare determinazioni numeriche; ed anche quando ci fosse possibile disporre apparecchi di misura, le cui indicazioni fossero precise, e nel tempo stesso visibili a tutti noi, le esperienze nostre non potrebbero avere alcuna utilità. Le più elementari, le più semplici leggi fisiche conosciute sono per lo più il frutto di prove lungamente continuate, sono il risultato del lavoro paziente di ingegni eletti, durato per anni ed anni. E quella che lega la quantità di calore prodotta alla intensità della corrente, che la produce, è una di queste; la scienza ne è debitrice alle ricerche di parecchi de' suoi apostoli più chiari e più coscienziosi, e soprattutto a quelle del Joule, che la enunciò per primo, e che vi unì il suo nome. Da queste ricerche risultò che se l'intensità della corrente diventa doppia, la quantità di calore svolta nell'unità di tempo in una porzione

data qualunque del circuito diventa quadrupla di quel che era; se l'intensità della corrente prende un valore triplo del primitivo, la quantità del calore svolta diventa uguale a 9 volte ciò che essa era da principio... in una parola, la quantità di calore svolta è proporzionale al quadrato della intensità. Per quelli de' miei uditori, ai quali posso parlare il linguaggio dell'algebra, posso enunciare la legge concisamente, scrivendo:

$$q = r i^2 \quad (1)$$

ove q è la quantità di calore, i l'intensità della corrente, ed r una grandezza che dipende dalla natura e dalle dimensioni del conduttore, che è sede dello sviluppo di calore.

Joule studiò anche da quali elementi questa grandezza r dipendesse, e come. Trovò che, perchè fosse valida la legge enunciata ed espressa dalla formola (1), bisognava, nel caso di un conduttore avente la forma di un filo, porre r proporzionale alla lunghezza l di questo, inversamente proporzionale all'area s della sua sezione trasversale, inversamente proporzionale ancora ad un coefficiente c , che dipende dalla sostanza del conduttore, e che i fisici conoscono col nome di *coefficiente di conduttività*. A quelli a cui è noto il linguaggio conciso dell'algebra, la legge riuscirà più chiara se scritta così:

$$r = k \frac{l}{c s},$$

ove k è un coefficiente di proporzionalità, il valore del quale dipende dalle unità di misura, per mezzo delle quali r , l , c , s si vogliono tradurre in numeri.

Ora, una grandezza $\frac{k l}{c s}$ proporzionale direttamente alla lunghezza di un conduttore, ed inversamente all'area della sezione trasversale ed al coefficiente di conduttività, è ciò che si suole denominare *resistenza* di quel conduttore; la grandezza r , che figura nella formola (1), è adunque la *resistenza* del conduttore, e la legge di Joule si enuncia: *La quantità di calore che nasce in un conduttore in ogni unità di tempo è direttamente proporzionale alla resistenza di questo, ed al quadrato della intensità della corrente.*

Come non avremmo potuto eseguire misure per verificare la proporzionalità della quantità di calore svolto al quadrato

della intensità della corrente, così non potremmo tentare di verificare qui la proporzionalità che sussiste tra quella quantità di calore e la resistenza. Possiamo però convincerci facilmente che la quantità di calore varia con l , con c , con s nel senso voluto dalla legge di Joule.

La quantità di calore svolto cresce con la lunghezza l , dice la legge, e le è proporzionale. Che così sia basta a dimostrarcelo il fatto che tante porzioni uguali di un medesimo filo si scaldano ugualmente. Del resto non occorre per questo alcun esperimento; il buon senso ci dice che in successive parti uguali di filo necessariamente debbono succedere i medesimi fenomeni.

La quantità di calore q , dice la legge, varia col variare della sostanza con cui è fatto il conduttore; cresce col diminuire del coefficiente di conduttività, è maggiore, a parità di altre circostanze, pei corpi meno buoni, che pei corpi più buoni conduttori. Eccone una prova: la corrente della nostra pila circola, come vedete, in questi fili di rame, alcuni dei quali non hanno un diametro maggiore di due millimetri a tre millimetri. Nessuno di questi fili si riscalda così da arroventarsi, nessuno si scalda tanto da rammollire l'intonaco isolante. Ma inserisco nel circuito una bacchetta di carbone? Ebbene, benchè questa abbia un diametro più che doppio di quello dei fili, e quindi una sezione più che quadrupla, voi vedete, si fa incandescente. Perché? Perché il coefficiente di conduttività del rame è forse uguale a 400 volte quello di questo carbone. Tolgo dal circuito la bacchetta di carbone, e vi sostituisco una catena, i cui anelli sono alternativamente di ferro e di rame. I coefficienti di conduttività di questi due metalli stanno fra loro prossimamente nel rapporto di *uno a sei*; gli anelli di ferro si debbono adunque scaldare più di quelli di rame, e noi lo vediamo: i primi diventano incandescenti, mentre gli altri rimangono oscuri.

Finalmente la legge di Joule dice: la quantità di calore prodotta cresce col diminuire della sezione trasversale del conduttore. Io pongo nel circuito un'altra catena, gli anelli della quale sono tutti di un medesimo metallo, di ferro; ma essi sono alternativamente fatti con un filo grosso e con un filo sottile. Noi vediamo arroventarsi soltanto questi ultimi. Altra prova: pongo il reoforo positivo in comunicazione con un grosso cilindro di carbone, e il reoforo negativo in comunicazione con una bacchetta di carbone che tengo in mano con questo manubrio, e che è terminata in punta sottile. Toccando con questa

punta il carbone positivo chiudo il circuito; la corrente passa e riscalda le diverse parti dei carboni diversamente, a seconda del loro diametro; il carbone grosso, a cui viene il reoforo positivo, non si scalda sensibilmente; il carbone più piccolo che io tengo in mano si scalda assai più, si fa incandescente, rosso cupo; la punta poi, ove il diametro è minimo, si fa caldissima e manda una viva luce. Una luce più brillante ottengo quando io distacco alquanto i due carboni; ma questo è dovuto ad un fatto di cui dovremo discorrere poi: si fa un arco di materia fluida in parte, ed in parte polverosa, resistentissima, ed è in questa che si sviluppa il calore.

Parlai di conduttori aventi la forma di fili; ma la legge si estende anche ai conduttori aventi un'altra forma qualunque. Ad una porzione non filiforme di un circuito si può sempre immaginare sostituito un pezzo di filo, tale che la intensità della corrente rimanga ancora la stessa; si dice allora che questo filo ha una resistenza uguale a quella porzione di circuito; la legge di Joule dice che in questa porzione di circuito si sviluppa tanto calore quanto si svolgerebbe in quel filo.

La pila con cui noi produciamo questa corrente, o quell'altro apparecchio elettro-motore qualunque che noi potremmo adoperare invece della pila, è parte del circuito, ed è, come tutte le altre parti di questo, sede d'uno sviluppo di calore; gli esperimenti del Favre ci assicurano che questo si fa come nel circuito esterno, secondo la legge di Joule.

Vera per tutte le parti del circuito esterno, vera per l'interno dell'elettro-motore, la legge di Joule è adunque valida per l'intero circuito: la quantità totale di calore, che si svolge nel circuito di una corrente è proporzionale alla resistenza totale ed al quadrato dell'intensità. Scegliendo convenientemente le unità di misura, possiamo dire anche: *la quantità di calore svolta nell'intero circuito nell'unità di tempo è uguale al prodotto della resistenza totale pel quadrato della intensità della corrente.*

Io m'era imposto per questa sera il compito di darvi definizioni e di fare che noi ci intendessimo su di alcuni concetti fondamentali elementarissimi, e ve l'ho detto cominciando. Per fare ciò era necessario che io mi armassi di tutta la calma, di tutta la freddezza necessaria per descrivere i fatti sperimentali e scolpire nella vostra mente, a semplici contorni, ma chiaramente, le leggi sperimentali quali ci si presentano, senza mistura di alcuna idea teorica, senza la complicazione di confronti con

fenomeni di altra natura. Io aveva bisogno che la medesima calma fosse in voi, e per non turbarla, evitai fin qui ogni allusione, non solo all'applicazione pratica che ci siamo proposto di studiare, ma ben anco al grande principio sul quale ci siamo intesi nell'altra nostra conferenza e del quale abbiamo stabilito di fare la base di tutta la nostra trattazione. Ma adesso che le leggi sperimentali ci sono note, e che abbiamo un'idea dei fatti principali, che avvengono nel circuito, io debbo ricondurvi all'idea di energia ed al principio della sua conservazione.

La corrente, ci disse l'esperimento, ci dà calore, ci dà adunque energia. Ma l'energia non si crea, solo si trasforma; dunque dobbiamo trovare in qualche sito, in qualche parte dell'apparecchio, un consumo di qualche energia equivalente a quella che compare nel circuito sotto forma di calore. Lo troviamo nella pila. Appena chiuso il circuito, incomincia infatti nella pila una azione chimica: lo zinco è intaccato dall'acqua acidulata e si trasforma in solfato di zinco; l'acido nitrico, che sta nel vaso poroso, si scompone; l'ossigeno, che nasce da questa scomposizione, si unisce all'idrogeno posto in libertà nella reazione tra lo zinco e l'acido solforico. Nell'insieme di queste reazioni si ha una scomparsa di energia: le reazioni si fanno per effetto di quelle forze attrattive che i chimici dicono affinità; i punti di applicazione di queste attrazioni, sono gli atomi de' corpi che prendono parte alla reazione, essi adunque si spostano; si ha nel fenomeno un sistema di forze i cui punti di applicazione si muovono, si ha una somma di lavori meccanici che si fanno, si ha una energia potenziale che scompare.

Se noi facessimo avvenire questi fenomeni entro un recipiente, così che non si avesse, come qui, una corrente in un circuito esterno, noi ritroveremmo l'energia scomparsa delle affinità chimiche rappresentata da una determinata quantità di calore: l'azione chimica sarebbe accompagnata da un determinato sviluppo di calore. Ebbene, se la reazione avviene nella pila, e se ai poli di questa sono attaccate le estremità di un circuito esterno, non si trova nei truogoli della pila tutto quel calore che l'azione chimica dovrebbe avere prodotto: una medesima quantità di zinco, che si consuma, produce quantità di calore diverse secondochè il suo consumo ha per effetto la produzione di una corrente elettrica esterna, oppure non produce correnti fuori dei liquidi in cui avviene la reazione. Quando la pila è unita ai capi del circuito esterno, si produce in essa, mentre

passa la corrente, quella quantità di calore che è voluta dalla legge di Joule, e questa quantità è sempre minore di quella che l'azione chimica sarebbe capace di generare. Ma il calore, che non si trova nella pila, non è perduto; noi lo troviamo nel circuito esterno, lo troviamo tutto, integralmente; e la sola differenza tra il caso della reazione che avviene senza produzione di corrente ed il caso, che si verifica colla pila, è questa, che nel primo caso tutto il calore equivalente al lavoro delle azioni chimiche si sviluppa nel vaso stesso nel quale avviene la reazione, mentre nell'altro caso questo calore si trova disseminato in tutto il circuito nel modo voluto dalla legge di Joule, in quantità proporzionali alle resistenze delle diverse parti di esso. È questa una conseguenza forzata del nostro principio, ma è anche un fatto sperimentale; le misure di Favre ne diedero una dimostrazione completa.

La pila adunque si può paragonare ad un focolaio, ove con una azione chimica (combustione per via umida) si produce il calore; i circuiti sono condotti per mezzo dei quali una parte di questo calore può essere portato a distanza e distribuito in luoghi diversi a seconda del bisogno. Disponendo le cose in modo che nella pila possa avvenire una abbondante azione chimica, si può avere in essa una produzione di grandi quantità di calore; disponendo poi il circuito così che una breve porzione di esso rappresenti una grande frazione della resistenza totale, si può accumulare su quella breve porzione, e quindi in uno spazio che può essere piccolissimo, una notevole parte di quella grande quantità di calore. Se il corpo che oppone resistenza è così disposto che la sua superficie non possa irradiare nell'unità di tempo una quantità di calore uguale a quella che nel tempo stesso vi si produce, se non quando essa è portata ad altissima temperatura, si ha una abbondante radiazione luminosa.

Noi abbiamo così trovato nella corrente elettrica quello che cercavamo: un mezzo per accumulare in piccoli spazi grandi quantità di energia. Se teniamo dietro ancora per un momento all'ordine di idee, in cui ci siamo portati, e se io posso domandare ai miei uditori ancora per qualche minuto l'attenzione paziente colla quale m'hanno seguito fin qui, noi possiamo fare anche un passo di più, e trovare un enunciato preciso delle condizioni di economia della operazione. Il calore equivalente al lavoro speso nell'elettro-motore (qui nella pila, ma lo stesso sarebbe quand'anche l'elettro-motore fosse un altro) si distri-

buisce, abbiám detto, su tutto il circuito, e nelle diverse parti di questo se ne trovano porzioni proporzionali alle loro resistenze; dunque noi possiamo dire: la quantità di calore che si accumula sulla porzione di circuito, che si vuole portare ad incandescenza onde irradii luce, sta a tutto il calore speso come la resistenza di quella porzione di circuito sta a quella del circuito intiero: *il coefficiente di rendimento in calore*, direbbe un ingegnere, è uguale al rapporto tra quella resistenza e questa. Se io potessi far uso del linguaggio dell'algebra sarei molto più chiaro; direi: sia Q la quantità totale di calore che si spende, e q quella che si utilizza, ossia quella che si accumula sul corpo che deve dare la irradiazione; sia poi i l'intensità della corrente e si rappresentino con r e con R le resistenze della parte di circuito ove si vuole accumulare calore e della parte rimanente noi abbiám per la legge di Joule:

$$Q = (R + r) i^2, \quad (2)$$

e

$$q = r i^2, \quad (3)$$

quindi il rendimento in calore è

$$\mu = \frac{q}{Q} = \frac{r}{R + r}. \quad (4)$$

Per avere poi un buon rendimento in luce, bisogna che una grande frazione di q sia calore luminoso, e a ciò, dissi, occorre una elevata temperatura. Precisiamo la condizione: la porzione di conduttore, che deve dar luce, riceve in ogni unità di tempo la quantità di calore q , e ne perde per la irradiazione una quantità che va crescendo mentre cresce la temperatura. La temperatura diventa costante quando quella porzione di conduttore tanto emette quanto riceve. Ora l'irradiazione è proporzionale alla superficie irradiante S e a una certa funzione $f(t)$ della temperatura t . La temperatura adunque rimane costante quando si ha

$$q = S f(t), \quad \frac{q}{S} = f(t).$$

Ma $f(t)$ è una funzione crescente, dunque $\frac{q}{S}$ e t son due grandezze che crescono insieme. Si vede così che da questa equazione si ricava un valore di t tanto più grande quanto maggiore è $\frac{q}{S}$.

Regola: Per avere un grande rendimento *in luce* bisogna produrre una grande quantità di calore q in una piccola superficie irradiante S .

Per quelli a cui non è ignoto questo linguaggio è bene che io faccia ancora una osservazione. Faraday ha dimostrato che la quantità di zinco, che si consuma nella pila in ogni unità di tempo, è proporzionale all'intensità della corrente. Quindi Q è proporzionale ad i , e si può scrivere

$$Q = E i, \quad (5)$$

e la costante E dicesi *forza elettro-motrice* della pila.

Portando nella (2) questo valore (5), abbiamo

$$i = \frac{E}{R + r} \quad (6)$$

l'intensità è uguale alla forza elettro-motrice divisa per la resistenza totale. È questa la legge di Ohm. Finalmente possiamo portare il valore (6) di i nel valore (3) di q , e scrivere

$$q = \frac{r}{R + r} \frac{E^2}{R + r} = \frac{E^2 r}{(R + r)^2}, \quad (7)$$

e di qui

$$r = q \frac{(R + r)^2}{E^2}, \quad (8)$$

equazione che c'insegna che, data la quantità di calore q , che si deve somministrare al corpo radiante, si ha un coefficiente di rendimento tanto maggiore quanto più si fanno grandi le resistenze e quanto minore si fa la forza elettro-motrice. Ed ecco un altro teorema di immediata e pratica applicazione. Vedremo infatti descrivendo le varie lampade elettriche, che parecchie di esse non si possono attivare se q non supera un certo limite, che, se non si conosce bene, è almeno razionale ammettere.

Voi vedete, o signori: nella prima conferenza, guidati dalle idee teoriche in apparenza le più lontane dalle applicazioni, siamo arrivati, quasi senza accorgerci, a definire con precisione lo scopo a cui dovevamo mirare per avere economicamente la luce; abbiamo trovato che bisognava cercare di accumulare molto calore in poco spazio. In questa seconda nostra seduta abbiamo fatto un nuovo passo, abbiamo riconosciuto nella cor-

rente elettrica, un mezzo per risolvere il problema; abbiamo persino stabilito quali sieno le condizioni necessarie perchè il problema si trovi risolto con economia. Abbiamo fatto questo nuovo passo, anche qui senza accorgercene, mediante l'esame paziente d'una legge fisica; or questa è il frutto del lavoro perseverante di uomini che alle loro fatiche non posero mai per meta la ricerca di qualche cosa capace di applicazioni pratiche immediate, ma che cercarono il vero in sè e per sè, quel vero che, se non arricchisce chi lo cerca, e anzi spesso ne consuma le sostanze e la salute, può fare col tempo la ricchezza e la gloria di intiere nazioni. Quegli uomini non pensarono alle applicazioni (*ed è per questo appunto che trovarono*); ma fecero per la applicazione la parte più importante: somministrarono le cose applicabili. Le invenzioni sono il più delle volte dovute più a chi non vi pensò mai che a chi diede loro il proprio nome; e noi italiani, per esempio, possiamo dire con orgoglio al più *pratico* dei popoli, all'americano: il telegrafo che porta il nome del vostro concittadino Morse, non esisterebbe ancora senza l'opera del nostro Volta — e l'opera del Volta è ben altrimenti grande della invenzione di un tasto e di una macchina scrivente. In ogni caso i trovati della scienza sono come fari, tenendo di mira i quali, il tecnico non smarrisce la strada, mentre travia assai spesso senza il loro aiuto.

Io mi lasciai trascinare in queste considerazioni perchè ciò che è vero pei ricercatori delle invenzioni, è vero anche per quelli che, come noi in queste conferenze, si limitano al lavoro più facile di portar giudizio sui trovati altrui. Inoltre voi vedrete che nella questione speciale, di cui noi vogliamo trattare, inventori di provata abilità fallirono appunto per aver dimenticato i principi teorici dai quali noi abbiam preso le mosse.

Un terzo ed ultimo effetto della corrente, al quale, cominciando questa conferenza, ho detto di dover accennare, è *la magnetizzazione del ferro*. Il fatto è notissimo, e poche parole basteranno per richiamarlo alla vostra memoria. Se si circonda una massa di ferro dolce, p. es., una sbarra cilindrica, con una spirale di filo metallico isolato, e se in questa si fa passare una corrente elettrica, il ferro diventa magnetizzato, si trasforma in una calamita, la quale presenta il polo nord alla estremità verso la sinistra della corrente, ed il polo sud verso la destra: egli è come se le particelle del ferro fossero tante calamite disposte irregolarmente in tutte le direzioni, e si orientassero come tanti

aghi magnetici sotto l'azione della corrente. — Questo vi dico non per dare una spiegazione; ma per offrirvi nel confronto dei due fatti una regola mnemonica.

Interrotta la corrente, il magnetismo scompare; più esattamente: non rimane di esso che una traccia detta *magnetismo rimanente*, la quale è tanto meno sensibile quanto più il ferro è dolce. Per ricordare questo fatto, che il nucleo di ferro funziona come una calamita soltanto quando passa la corrente, si dice l'apparecchio che ho descritto: *calamita temporaria*, o *elettro-magnete*.

Invece di una sbarra di ferro cilindrica si può adoperare una sbarra piegata ad *U*, dividere la spirale magnetizzante in due parti e dare una di queste all'uno e l'altra all'altro braccio dell'*U*; si ha allora una elettromagnete a *ferro di cavallo*. Potendosi far agire con entrambi i poli sopra una medesima massa di ferro, sopra una medesima *armatura*, l'elettromagnete a ferro di cavallo si adopera con vantaggio quando si vogliono produrre energiche attrazioni. L'intensità delle attrazioni, che si possono ottenere colle calamite temporarie, è di gran lunga superiore a quelle che possono offrire le più potenti calamite permanenti di acciaiò, e un semplice esperimento basterà a provarlo. Ecco una elettromagnete a ferro di cavallo, che io posso attivare colla pila di dieci elementi, che ci

ha servito in tutta questa lezione (fig. 4). La sua armatura porta un grande piatto di bilancia, che io posso caricare di pesi. Voi vedete: tutti i pesi, che abbiamo qui, non bastano a distaccare l'armatura dai poli del ferro di cavallo — e sono più di 150 chilogrammi. Ma rompo il circuito? L'armatura subito si distacca e cade.

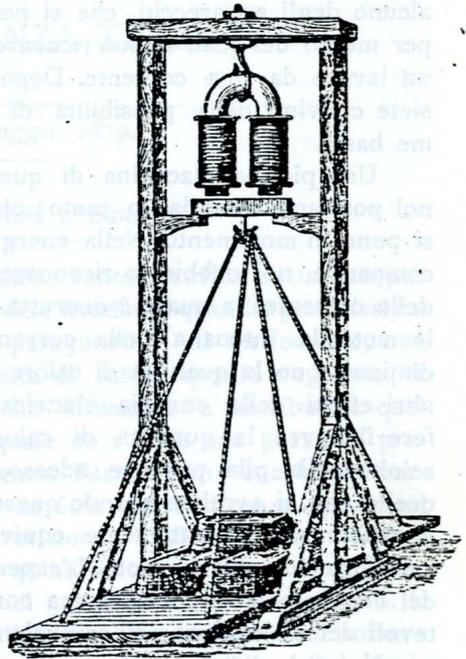


Fig. 4.

Un peso così grande non può essere sostenuto se non quando l'armatura è vicinissima ai poli. Ma togliamo i pesi e lasciamo solo il piatto colle sue catene; voi vedete: esso è attratto a distanza, si solleva da sè quando il circuito è chiuso. Rompo il circuito? Il piatto ricade. Chiudo un'altra volta, il piatto è di nuovo sollevato... Ecco un nuovo modo di manifestarsi dell'energia della corrente; ecco un movimento, ecco un lavoro meccanico. Sapendo che la corrente è una energia, noi eravamo già certi che in qualche modo questa avrebbe potuto darci un lavoro meccanico; ora ecco il modo. Io non voglio allontanarmi dal cammino che mi sono prefisso, e non voglio stancare la vostra attenzione descrivendovi nei suoi particolari alcuno degli apparecchi, che si possono immaginare a migliaia, per mezzo dei quali si può ricavare in modo continuo, regolare, un lavoro da una corrente. Dopo quello che io vi dissi, voi siete convinti della possibilità di fare tali apparecchi, e ciò a me basta.

Una piccola macchina di questa natura è disposta qui, e noi possiamo vederla in moto; chiudo il circuito, e tosto essa si pone in movimento. Nella energia meccanica che qui vediamo comparire, noi dobbiamo riconoscere una porzione della energia della corrente, la quale è distrutta. Appena la macchina si pone in moto, la intensità della corrente diminuisce, e con questa diminuiscono la quantità di calore svolta nel circuito e tutti gli altri effetti della energia elettrica. Se noi misurassimo, come fece il Favre, la quantità di calore che un grammo di zinco sciolto nella pila produce adesso, lo troveremo inferiore a quello che si avrebbe quando questa macchina stesse in riposo: la differenza è esattamente equivalente al lavoro con cui la macchina è tenuta in moto. L'esperienza, nelle abilissime mani del Favre, non solo riuscì, ma condusse ad una delle più notevoli determinazioni dell'equivalente dinamico del calore.

Noi non possiamo fare misure di lavori, possiamo però constatare che la macchina non si pone in moto senza far scemare la intensità della corrente. Ci basta far agire la corrente su di un ago magnetico e constatare che la deviazione di questo diminuisce ogni qual volta la macchina si pone in moto, e cresce quando essa si ferma.

Io desiderava, o signori, di condurvi a ciò. Partendo da questa considerazione noi arriveremo naturalmente, nella prossima conferenza, a trovar modo di produrre la corrente per