Orso Mario Corbino

Nozioni di Fisica per le scuole secondarie

Vol. I
Meccanica - Acustica - Cosmografia

QUESTO E-BOOK:

TITOLO: Nozioni di Fisica per le scuole secondarie,
Vol. I Meccanica – Acustica - Cosmografia
AUTORE: Corbino, Orso Mario
TRADUTTORE:
CURATORE:
NOTE:

DIRITTI D'AUTORE: no

TRATTO DA: Nozioni di fisica : per le scuole secondarie / O. M. Corbino. - 2 v.
Volume 1. : Meccanica, acustica, cosmografia. - Milano, Palermo,
Napoli : Remo Sandron, <19..>. - 144 p. : ill. ; 22 cm.

CODICE ISBN: informazione non disponibile

1a EDIZIONE ELETTRONICA DEL: 10 dicembre 2008

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

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

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

PUBBLICAZIONE:
Catia Righi, catia_righi@tin.it

O. M. CORBINO

NOZIONI di FISICA

PER

LE SCUOLE SECONDARIE

VOL. I

Meccanica – Acustica – Cosmografia

REMO SANDRON — Editore

Libraio della R. Casa

MILANO-PALERMO-NAPOLI

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

Officine Tipogr. Sandron — 230-II-21080

PRELIMINARI.

1. Ogni manifestazione del mondo esterno, rivelataci per mezzo dei sensi, è un *fenomeno*. L'osservazione dei fenomeni che è una necessità della vita materiale e insieme un bisogno del pensiero, può esser condotta sistematicamente, con l'intento di conoscerne le particolarità e di stabilire dei ravvicinamenti, o delle connessioni come di causa ed effetto, tra fenomeni apparentemente disparati. — Tale còmpito è affidato alle *Scienze Naturali* di cui la *Fisica* e la *Chimica* sono due rami molto sviluppati. — Il loro campo ordinario di investigazione è costituito dall'insieme dei fenomeni che sono comuni ai corpi animati e inanimati.

Sono di speciale attinenza della Fisica quei fenomeni che non sono accompagnati da mutamenti sostanziali, profondi dei corpi in cui avvengono. — Ma non esiste una separazione netta tra i due ordini di fenomeni, detti appunto *fisici* e *chimici*. — Così mentre l'incandescenza di un filo di platino, il suono prodotto da una campana che abbia avuto una percussione, sono da caratterizzare indubbiamente come fenomeni fisici, e la combustione di un pezzo di legno, l'arrugginirsi di un pezzo di ferro come fenomeni chimici, molti altri fenomeni, come la soluzione del sale nell'acqua, sono di dubbia classificazione. — È sorta anzi una nuova branca di Scienza, la Fisico-Chimica, che si occupa appunto di questi fenomeni costituenti come un campo comune alla Fisica e alla Chimica.

Entrambe queste Scienze non si limitano all'osservazione dei fenomeni che spontaneamente hanno luogo in Natura; ma devono il loro grande sviluppo alla possibilità di produrre artificialmente i fenomeni, mutandone le condizioni, e di crearne anche di nuovi. — Così l'arco voltaico che brilla tra i carboni delle lampade, è un fenomeno che la natura non ci avrebbe mai fatto osservare spontaneamente. — Esse procedono più per *l'esperimento,* che è il fenomeno artificialmente prodotto, anzichè per l'osservazione dei fenomeni spontanei.

2. Lo studio dei fenomeni può essere qualitativo e quantitativo Se noi prendiamo, per esempio, una lastrina metallica a sezione rettangolare e studiamo la flessione che essa subisce fissandola a un estremo e caricandola all'altro estremo con dei pesi, troveremo che al crescere del peso aumenta la deformazione. Ma noi possiamo esaminare molto più attentamente il fenomeno: *misurare* cioè, le forze deformatrici e le deformazioni corrispondenti, e registrare in una tabella i risultati delle misure. — Supponiamo, per fissare le idee, che la deformazione prodotta da 1 Kg. sia di 2 mm. i risultati saranno i seguenti:

Peso	Deformazione
1 Kg.	*2 mm.*
2 Kg.	*4 mm.*
3 Kg.	*6 mm.*
4 Kg.	*8 mm.*
ecc.	*ecc.*

Se adesso facciamo il rapporto tra la deformazione e il peso corrispondente, troviamo che questo rapporto è costantemente eguale a 2.

Questo fatto si verifica per tutte le lamine di qualunque natura e di qualsiansi dimensioni, cioè è sempre costante per ciascuna lamina il rapporto tra il peso deformatore e la deformazione; nel constatar ciò noi avremo scoperto una *legge* del fenomeno esaminato, cioè una relazione numerica costante tra gli elementi misurabili che intervengono nella sua produzione.

3. I risultati dell'osservazione, sempre riproducibili in una tabella se essa è stata accompagnata da misure, possono talvolta esprimersi con una *relazione algebrica.* Si può, per esempio, verificare nella tabella precedente che i numeri in essa contenuti soddisfano alla seguente eguaglianza, quando al posto di d e di p si sostituiscano una deformazione qualsiasi e il peso *corrispondente:*

$$\frac{d}{p} = 2$$

o anche

$$d = 2p$$

La formola compendia, in tal caso, la tabella ed esprime i risultati dell’osservazione, con l’intesa che essa è rigorosamente valida finchè si applica ai valori effettivamente rilevati con l’esperienza. — Noi possiamo estendere la validità della formola anche ai valori *frazionari* del peso; e ritenere perciò che alla forza di 3, 5 Kg., malgrado non si sia eseguita l’esperienza, corrisponda una deformazione

$$d = 2 \times 3{,}5 = 7\,mm.$$

Ammettere ciò equivale ad ammettere che la legge da noi enunciata, ed espressa algebricamente dalla formola, sia valida anche per i valori dei pesi non direttamente sperimentati. — A rigore una simile supposizione è arbitraria; o meglio noi non possiamo asserirne la verità assoluta — ma senza questi processi di *induzione* la cui legittimità è fondata sulla nostra convinzione che i fenomeni naturali si seguono con una certa *regolarità,* ogni indagine scientifica sarebbe impossibile. — L’estensione della formola ai casi non direttamente osservati, ma compresi entro i limiti in cui l’osservazione fu fatta, e il calcolo conseguente del valore della deformazione relativo a un peso non direttamente sperimentato costituiscono il processo *d’interpolazione.*

Meno sicura è la validità della formola e della legge che essa esprime, quando si voglia applicarla a valori della forza superiori a *tutti* quelli sottoposti ad esperimento; quando cioè si voglia dedurne che la deformazione della lamina corrispondente al peso 7 sarà di 14 mm. malgrado nelle prove non si sia oltrepassata la forza di 5 Kg. I valori così calcolati si dicono ottenuti per *estrapolazione.*

4. Oltre alla rappresentazione dei risultati dell’esperimento per mezzo delle tabelle, sempre possibile, o per mezzo delle formole, solo in certi casi possibile, un altro metodo può esser seguito, che ha acquistato un’importanza universale in tutte le scienze quantitative; è il metodo detto dei *diagrammi* o *metodo grafico.*

Riferiamoci ancora all’esperienza surriferita della flessione di una lamina. Tracciate due rette perpendicolari, dette *assi coordinati,* una orizzontale Ox (asse delle *ascisse)* e l’altra verticale Oy (asse delle *ordinate),* tagliamo sulla prima, a partire dall’origine O, dei segmenti proporzionali ai diversi valori dei pesi; scegliendo per esempio la lunghezza di 1 cm. per rappresentare la forza di 1 Kg. Dai punti ottenuti, 1, 2, 3, 4 ecc. guidiamo dei segmenti paralleli all’asse delle ordinate e di lunghezze proporzionali alle deformazioni rispettivamente prodotte dai pesi 1, 2, 3, 4 ecc.; possiamo adottare per esempio, la lunghezza di 1 cm. per rappresentare la deformazione di 1 mm. Gli estremi A, B, C, D di questi segmenti, riuniti con una linea continua OABCD, che in questo caso è una linea retta, dànno il *diagramma delle deformazioni* corrispondenti ai vari pesi.

Anche qui noi possiamo per *interpolazione* dedurre la deformazione che corrisponde a un peso non direttamente sperimentato. Se si vuole, per es., la deformazione corrispondente al peso 2, 5 basterà per il punto M relativo all’ascissa 2,5 guidare la parallela MN all’asse delle ordinate fino all’incontro N con il diagramma OABCD; la lunghezza di *MN,* cioè 5, darà in mm. la deformazione richiesta. — I valori così ottenuti, corrispondenti ai diversi punti del diagramma che non siano i punti fondamentali O, A, B, C, D ecc., sono soltanto *probabilmente* non *sicuramente* veri. — Noi possiamo aumentare la probabilità che essi siano veri *popolando* il diagramma di punti realmente controllati, facendo in modo cioè che i punti B, C direttamente sperimentati non siano troppo distanti dal punto N di cui si vuol garentire l’esatta corrispondenza con un esperimento non fatto. E allora, facendo appello al surriferito principio della regolarità nell’andamento dei fenomeni naturali, potremo raggiungere se non la certezza assoluta, una probabilità grandissima, che dal punto di vista scientifico può ritenersi equivalente alla certezza.

La legittimità di simili procedimenti è *a posteriori* giustificata dal successo della Scienza che sull'ipotesi di tale legittimità è più esplicitamente fondata.

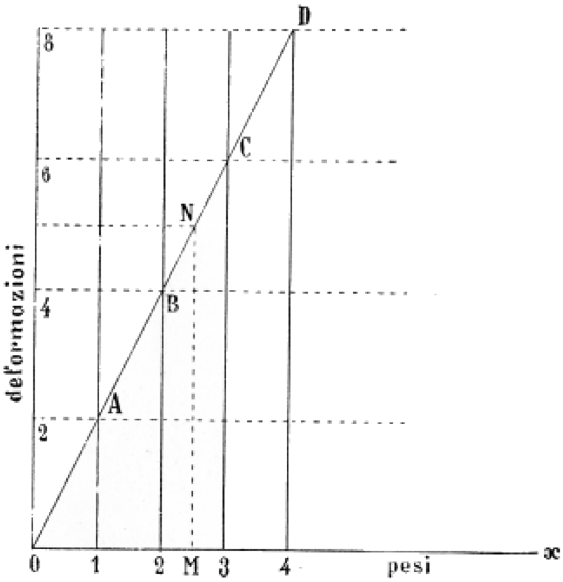


Fig. 1.

5. In tutti i casi in cui, come nell'esempio citato, una grandezza (es. la deformazione) acquista valori diversi al variare di un'altra grandezza (il peso), si dice che la prima è *funzione* della seconda. — Talvolta, come nel caso precedente, è possibile esprimere per mezzo di una formola il modo di dipendere dell'una dall'altra grandezza; talvolta invece la *legge di dipendenza* algebrica non è facile a trovare, o anche non esiste, e ci si deve contentare della rappresentazione con le tabelle, o della rappresentazione grafica.

Nell'esempio surriferito il rapporto tra la funzione (la deformazione) e la *variabile* (il peso) era costante:

$$\frac{d}{p} = 2$$

Per un'altra lamina di lunghezza maggiore si sarebbe potuto trovare invece

$$\frac{d}{p} = 3$$

cioè il rapporto sarebbe ancora costante, ma diverso dal precedente; e in generale per una lamina qualsiasi il rapporto avrebbe avuto un valore K costante per ciascuna lamina, ma diverso per le diverse lamine:

$$\frac{d}{p} = K$$

Questa formola può anche scriversi:

$$d = Kp$$

la quale ci dice che per una data lamina, qualunque essa sia, raddoppiando o triplicando il peso si raddoppia o si triplica la deformazione.

Quando una simile relazione di dipendenza intercede tra la funzione e la variabile si dice che la prima è *direttamente proporzionale* alla seconda.

Supponiamo invece che la dipendenza tra la funzione f e la variabile v sia espressa dalla formola

$$f = \frac{K}{v}$$

ove K è costante mentre variano v ed f; allora se v acquista un valore doppio o triplo, f diviene la metà, un terzo di prima —, si dice in tal caso che la f è *inversamente* proporzionale alla v.

Si riconosce subito che si ha la proporzionalità diretta quando nella formola la variabile v comparisce nel numeratore, mentre si ha la proporzionalità inversa se la v comparisce nel denominatore.

Ammettiamo adesso che la f e la v siano legate dalla formola

$$f = K \times v^2$$

nella quale K è sempre costante — allora raddoppiando v, la f diviene quadrupla; triplicando v, la f diviene nonupla ecc. Si dice in tal caso che la f è proporzionale al *quadrato* di v.

E così nella formola

$$f = K \times v^3$$

f sarà proporzionale al cubo di v, ecc.

La proporzionalità sarebbe inversa se la v elevata a un esponente qualsiasi comparisse invece al denominatore.

In certi casi però la funzione può dipendere da più variabili anzichè da una sola. — Così nella flessione di una lamina la deformazione d dipende oltre che dal peso p anche dalla lunghezza l, dalla larghezza a e dallo spessore b, oltre che dalla natura della lamina. — Si è trovato che per una data sostanza la deformazione è in ogni caso calcolabile con la formola

$$d = K \frac{l^3 p}{ab^3}$$

Essa *contiene* tutte le leggi della flessione, che possono essere tradotte nel seguente enunciato :

La flessione di una lamina è proporzionale al peso e al cubo della lunghezza, è inversamente proporzionale alla larghezza e al cubo dello spessore.

In tal caso dire, per es., che la deformazione è proporzionale alla terza potenza della lunghezza vuol dire che *tenute costanti le altre grandezze contenute nella formola*, quali il peso, la larghezza e lo spessore, e raddoppiando o triplicando la *sola* lunghezza, la deformazione diviene otto volte, o 27 volte maggiore.

MECCANICA GENERALE.

6. Il movimento è il fenomeno fisico per eccellenza; e ad esso si cerca di ricondurre tutti gli altri fenomeni fisici, cosicchè si è anche potuto ritenere che un fenomeno è spiegato quando è possibile attribuirlo a movimento dei corpi o delle loro particelle.

Lo studio della *Meccanica,* o della scienza del moto, è quindi fondamentale per lo studio del resto della Fisica.

La Meccanica si suddivide in tre parti.

La *Cinematica* studia il moto dei corpi, indipendentemente dalle cause che lo producono e dalle qualità particolari del corpo che si muove. Essa classifica le diverse specie di movimento e permette, mercè l'introduzione di due fondamentali grandezze fisiche, la *velocità* e l'a*ccelerazione,* di fissare la posizione nello spazio del corpo in moto nel decorrere del tempo.

La *Dinamica* studia il movimento in connessione con le cause che lo producono e le qualità del corpo che si muove.

La *Statica* studia le condizioni in cui le cause del moto si elidono nei loro effetti sul corpo su cui agiscono.

CINEMATICA

7. Noi riconosciamo che un corpo è in movimento dal fatto che osserviamo i suoi mutamenti di posizione rispetto ad altri corpi che riteniamo non in movimento — il moto osservato è *relativo* a quei corpi ritenuti fissi.

Nessuno di questi, però, è assolutamente fisso, se pure questa frase ha un significato. — Così un treno può trovarsi in movimento rispetto alla stazione ferroviaria, nel senso che si avvicina ad essa o se ne allontana; ma la stazione, a sua volta partecipa al movimento della Terra che ci è solo in parte noto.

Lo studio del moto relativo dei corpi è sufficiente ai bisogni della Scienza, poichè tutti i fenomeni che han luogo alla superficie terrestre, e tra essi il movimento dei corpi, non sono per nulla influenzati dal moto complessivo da cui la Terra può essere animata attraverso allo spazio. È questo il cosiddetto *principio di relatività*, del quale la necessità e la grande portata è stata messa in luce negli ultimi tempi, specialmente dal fisico olandese Lorentz.

8. **Moti traslatori e rotatori** — Ognuno riconosce la differenza sostanziale tra il moto di una slitta trascinata su un piano orizzontale, e quello di una ruota che giri continuamente intorno a un asse fisso. Il primo è un moto *traslatorio,* il secondo un moto *rotatorio.* I due tipi di movimento possono sovrapporsi nel medesimo corpo, come ha luogo, per esempio, in una palla che si avanzi, rotolando, lungo un piano. È utile però separare lo studio dei due movimenti, che in generale si producono sempre insieme con maggiore o minore entità. E per semplificare l'esame del moto traslatorio dei corpi conviene cominciare col moto di corpo avente dimensioni estremamente piccole, che prende il nome di *punto materiale.*

Durante il moto un punto materiale traccia sensibilmente una linea geometrica che si chiama *trajettoria,* e la cui forma serve a una prima classificazione dei movimenti, che si distinguono per ciò in *rettilinei* o *curvilinei* secondo che la trajettoria è una linea retta o una curva; e in quest'ultimo caso il movimento viene anche denominato dalla forma geometrica della traiettoria medesima: si ha così il moto *circolare*, il moto *parabolico* ecc.

La direzione della *tangente geometrica* in ogni punto della trajettoria si assume come direzione del moto in quel punto.

9. **Moto uniforme e moto vario.** – Si dice *uniforme* il moto di un punto che percorre spazi eguali in tempi uguali comunque piccoli; negli altri casi il moto si dice *vario.*

Malgrado l'indice dei minuti secondi in un orologio percorra sempre lo stesso arco a ogni minuto secondo, il suo moto non è uniforme, poichè l'indice resta fermo per una notevole frazione di secondo e subisce un brusco spostamento nella frazione rimanente. Un tale movimento suol anche chiamarsi *periodicamente uniforme*.

Quando diciamo che gl'indici dell'orologio percorrono archi eguali in tempi uguali, noi supponiamo di possedere già un mezzo per riconoscere che due intervalli di tempo non contemporanei sono eguali; e questo mezzo è, reciprocamente, fondato sull'ipotesi che esista già un corpo che per definizione si muove con moto uniforme, di modo che possono chiamarsi tempi eguali quelli impiegati da questo corpo tipo per percorrere spazi eguali. Si trovano appunto in queste condizioni le stelle fisse, nel loro moto apparente diurno da est verso ovest, e che costituiscono l'orologio tipo naturale, al quale vanno perciò riferiti gli orologi ordinari.

10. **Velocità nel moto uniforme** — È lo spazio percorso dal punto mobile nell'unità di tempo. Scegliendo come unità di lunghezza il centimetro, e come unità di tempo il minuto secondo un mobile avrà per es. la velocità 18 se percorre 18 cm. a ogni minuto secondo; avrà la velocità v se percorre v centimetri per minuto secondo. Lo spazio percorso in 2 minuti secondi sarà allora $2v$, in 3 minuti secondi $3v$, ecc.; quindi lo spazio s percorso in t minuti secondi sarà dato dalla formola

$$s = vt$$

dalla quale si ricavano le altre due

$$v = \frac{s}{t}, \qquad t = \frac{s}{v}$$

che sono di utile e frequente impiego.

11. **Velocità nel moto vario** — Se un mobile, animato da un moto vario, percorre in un tempo t lo spazio s, si chiama *velocità media* in quell'intervallo di tempo il quoziente del numero che misura lo spazio s per il numero che misura il tempo t:

$$v_m = \frac{s}{t}$$

La velocità *vera* a un dato istante si definisce nel modo seguente. Si valuti lo spazio piccolissimo percorso a partire da quell'istante in un tempo piccolissimo τ e lo si divida per il tempo τ; con che si otterrà la velocità media tra l'istante considerato e un istante molto prossimo; indi si scelga un intervallo di tempo più piccolo, e si valuti la nuova velocità media; e si diminuisca sempre più l'intervallo di tempo scelto fino a che negli ulteriori impiccolimenti il quoziente ottenuto rimanga sensibilmente lo stesso — questo valore *limite* della velocità media tra l'istante dato e un'istante sufficientemente vicino dicesi *velocità vera* in quell'istante.

È facile riconoscere che applicando questo procedimento nel caso del moto uniforme si ottiene un risultato indipendente dall'intervallo di tempo scelto, e che perciò in questo movimento la velocità media e la velocità vera sono espresse dal medesimo numero, costante in tutti i tempi.

12. **Moto uniformemente vario**. — Supponiamo che la velocità vera di un mobile, valutata nel modo anzidetto, sia 7 a un dato istante; dopo un minuto secondo sia 10; dopo due minuti secondi sia 13, dopo tre sia 16, supponiamo cioè che la velocità vera subisca una variazione qualunque, ma costante a ogni minuto secondo; il moto si dice allora *uniformemente vario,* e la variazione costante di velocità a ogni minuto secondo si dice *accelerazione.* Questa è perciò eguale a + 3 nell'esempio precedente; e sarebbe eguale a —5 se le successive velocità, a distanza di 1 secondo, fossero per es. 65, 60, 55, 50 ecc. Si dà cioè il segno + all'accelerazione se essa rappresenta un accrescimento di velocità, il segno — se rappresenta una diminuzione; e il moto si dice nei due casi *uniformemente accelerato* o *ritardato.*

Se un mobile ha in un certo istante la velocità u, e l'accelerazione a, dopo 1" la velocità diverrà $u + a$, dopo due secondi $u + 2a$, e dopo t secondi essa sarà data dalla formola;

$$v = u + at$$

Questa formola vale anche per il caso del moto uniformemente ritardato, se si tien presente che il fattore a è allora per quanto si è detto, negativo.

La formola stessa permette di conoscere la velocità in un istante qualsiasi, quando sia nota l'accelerazione a, e la velocità u, detta *velocità iniziale,* che rappresenta la velocità posseduta dal mobile all'istante da cui si comincia a contare il tempo.

Con un procedimento non semplice si dimostra poi che lo spazio s percorso con moto uniformemente vario nel tempo t è dato dalla formola

$$v = ut + \frac{1}{2}at^2$$

Nel caso poi che la velocità iniziale sia eguale a zero, che cioè il mobile cominci a muoversi all'istante da cui si conta il tempo, le due ultime formole divengono

$$v = at \qquad\qquad s = \frac{1}{2}at^2$$

Le formole riferite si traducono nelle seguenti leggi :

Nel moto uniformemente vario la variazione di velocità è proporzionale al tempo.

Nel moto uniformemente vario lo spazio percorso in un certo tempo contato dal principio del moto è proporzionale al quadrato del tempo medesimo.

Infine l'ultima formula ci dice che *dopo 1 minuto secondo lo spazio percorso è* $\frac{1}{2}a$, *cioè è eguale alla metà dell'accelerazione.*

13. **Diagramma della velocità**. — Nel moto vario la velocità istantanea, valutata nel modo esposto al § 11, cambia continuamente nei tempi successivi; e noi possiamo servirci del metodo grafico per rappresentare queste variazioni. Basterà contare sull'asse delle ascisse i tempi successivi, e segnare nei vari punti dell'asse altrettante ordinate, di lunghezza corrispondente alle velocità rispettive. Gli estremi delle diverse ordinate, si riuniranno con una curva continua ABC (fig. 2), che sarà il diagramma della velocità.

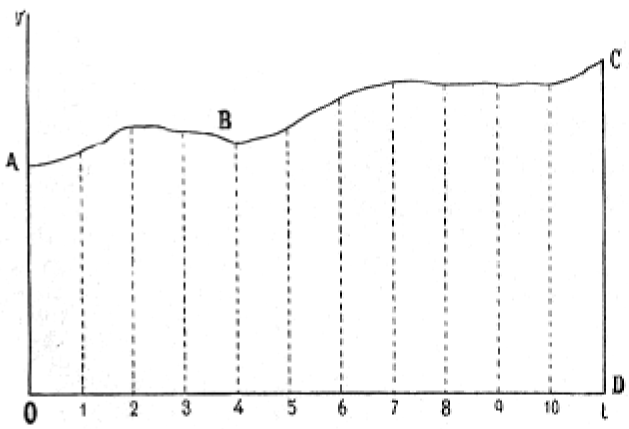


Fig. 2.

Se il moto è uniforme, la velocità è costante in tutti i tempi e come diagramma si ottiene una retta parallela all'asse dei tempi.

Se il moto è accelerato, il diagramma è una curva montante; se il moto è ritardato, si ha invece una curva discendente.

Se il moto è uniformemente vario, gli accrescimenti di velocità a ogni minuto secondo, rappresentati nella fig. 3 dai segmenti AB, CD, EF, GH, sono eguali tra loro.

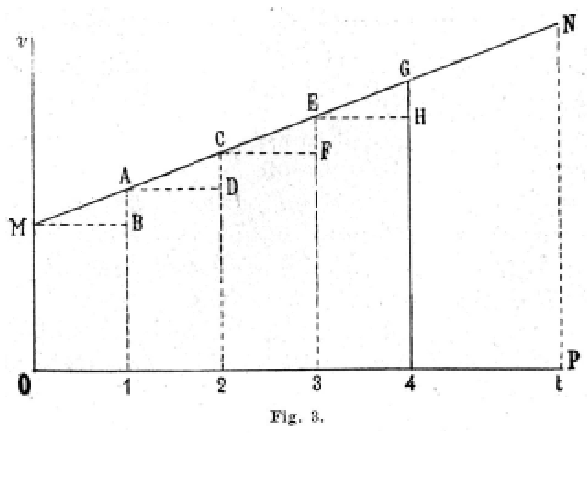


Fig. 3.

Ne risulta, per un noto teorema di geometria, che i punti A, C, E, G sono in linea retta, e perciò il diagramma del moto uniformemente vario è una retta inclinata rispetto all'asse dei tempi.

La conoscenza del diagramma della velocità in un moto vario qualsiasi permette di dedurre facilmente lo spazio percorso dal mobile in un intervallo di tempo qualunque.

Si dimostra infatti, con un procedimento non breve, che lo spazio percorso nel tempo t è misurato dall’area OACD (fig. 2), compresa tra gli assi, il diagramma ABC, e l’ordinata CD corrispondente al tempo *t.* Nel caso del moto uniformemente vario lo spazio sarà quindi misurato (fig. 3) dall’area del trapezio OMNP, di cui le basi OM, NP rappresentano la velocità iniziale *u,* e la velocità finale *u + at,* mentre l’altezza OP è misurata dal tempo *t.* Se ne può dedurre facilmente la formola (1).

14. **Composizione dei movimenti —** A un corpo possono essere impressi due o più movimenti contemporanei, dei quali non sono avvertibili da un osservatore quelli ai quali esso partecipa.

Così se mentre la sfera M (fig. 4) si muove lungo il piano AB, questo viene spostato in basso, il moto effettivo della sfera presenterà apparenze diverse a un osservatore che si trovi sul piano e partecipi alla discesa di questo, e a un altro osservatore che sia in quiete fuori del piano.

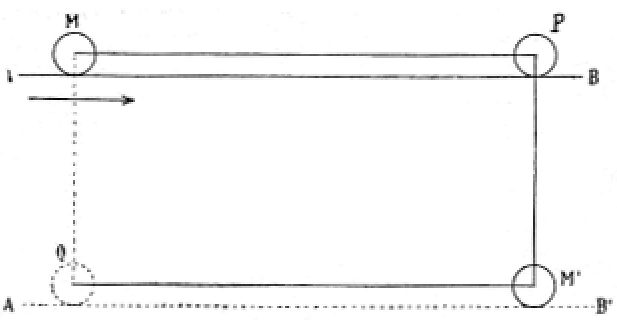


Fig. 4.

Per ricercare il moto effettivo o *risultante* del corpo vale il seguente principio dovuto a Galileo:

La posizione di un punto al quale sono imposti diversi movimenti è in qualunque istante quella che esso occuperebbe se i diversi moti, anzichè contemporaneamente, si producessero l’uno dopo l’altro per la durata medesima.

Nell’esempio precedente se il piano AB restasse fermo la sfera dopo un certo tempo *t* si troverebbe, per esempio, in P; invece nello stesso tempo *t* il piano si sposta in basso di una lunghezza MQ, assumendo la posizione A'B'. Se i due movimenti si compissero successivamente la posizione finale della sfera sarebbe quindi quella segnata M'; la stessa posizione occuperà la sfera se i due moti si compiono insieme.

La trajettoria del corpo risulta dall’insieme di tutte le posizioni intermedie da esso occupate tra M ed M', ciascuna delle quali è data, come è facile riconoscere, dal quarto vertice del parallelogrammo che ha gli altri tre vertici nella posizione iniziale M e nelle due posizioni, analoghe a P e Q, che il corpo occuperebbe se dei due moti si compisse l’uno o l’altro soltanto.

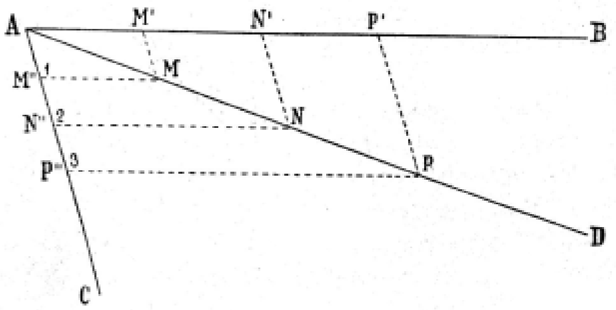


Fig. 5.

Se i due moti componenti sono rettilinei e uniformi, anche il moto risultante è rettilineo e uniforme. Si osservi infatti la figura 5 nella quale AB e AC rappresentano i due moti componenti; M', N', P', le posizioni che sarebbero occupate in virtù del solo primo movimento dopo 1, 2, 3, secondi; e M”, N”, P”, le posizioni corrispondenti per il secondo movimento.

I punti M, N, P, ottenuti con la regola surriferita, rappresentano le posizioni effettive occupate dal punto, e la linea AMNP la traiettoria risultante.

Essendo i due moti uniformi, AN' è doppio di AM' come N'N è doppio di M'M; e così AP' è triplo di AM' come PP' è triplo di M'M. Si deduce, per un noto teorema di geometria, che i punti, A, M, N, P sono in linea retta e che i segmenti AM, AN, NP sono eguali tra loro, cioè che anche il moto risultante è rettilineo e uniforme.

Inoltre i segmenti AM', AM", AM rappresentano gli spazi percorsi in un minuto secondo per virtù dei due moti componenti e del moto risultante, cioè le *velocità componenti* e la *velocità risultante*. Adunque la velocità risultante è rappresentata in grandezza e direzione dalla diagonale di un parallelogrammo avente per lati i segmenti che rappresentano le velocità componenti.

Quando i due moti componenti sono non uniformi, il moto risultante è, in generale, curvilineo. La figura 6 si riferisce al caso della composizione di un moto uniforme con un moto uniformemente vario. La trajettoria del moto risultante ottenuta per punti nel modo sopra indicato, è una curva importante chiamata *parabola*; essa viene seguita dai corpi lanciati obliquamente nel vuoto, e soggetti all'attrazione verso la terra, poichè appunto in tale caso si sovrappongono nello stesso corpo il moto propulsivo uniforme, e il moto di caduta che, come vedremo, è uniformemente accelerato.

15. Sarà utile per lo studioso riflettere alquanto sulle osservazioni che seguono.

Se un piroscafo si muove di moto uniforme lungo la riva e un viaggiatore lancia verticalmente verso l'alto un corpo pesante, questo ricadrà nel posto da cui fu lanciato, descrivendo rispetto a un osservatore che si trovi sulla riva il ramo ascendente e quello discendente di una parabola. Il movimento apparirà invece rettilineo al viaggiatore che partecipa col corpo lanciato al movimento del piroscafo.

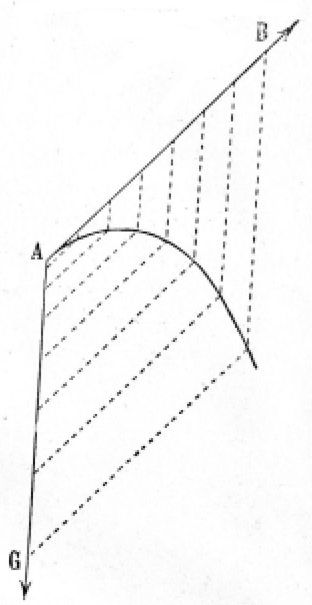


Fig. 6.

Se un fucile è diretto *orizzontalmente* su un piano orizzontale, il proiettile, appena uscito dalla canna, esegue insieme i due movimenti di propulsione e di caduta per effetto della gravità, e quest'ultimo si compirà egualmente come se il proiettile si lasciasse cadere verticalmente dalla bocca del fucile, nel senso che si impiegherà le stesso tempo perchè il proiettile tocchi il suolo, qualunque sia la velocità orizzontale comunicata dall'arma. L'unico effetto di questa sarà perciò di spostare il punto in cui ha luogo la caduta.

Se un orologio, i cui indici sono animati da un moto periodicamente uniforme, è trasportato comunque nello spazio, le indicazioni dell'orologio continuano a essere esatte; questo prova che la posizione occupata in qualunque istante dagli indici è la stessa di quella che spetterebbe loro se i due moti (quello indicatore del tempo, e quello di traslazione subìto da tutto l'orologio) si fossero compiuti l'uno dopo l'altro anzichè contemporaneamente. Il fatto che anche i profani di scienza non dubitano delle indicazioni dell'orologio che trasportano con sè nei moti più vari, dimostra che, per la sola osservazione incosciente dei fenomeni del moto, in tutti noi è latente la nozione del principio di Galileo.

16. **Moto circolare uniforme**. — Se un punto materiale A si muove lungo una circonferenza di raggio R, descrivendo archi eguali in tempi eguali e impiegando T minuti secondi per descrivere un intero giro, esso percorrerà in T secondi la lunghezza $2\pi R$ della circonferenza e la velocità sarà perciò

$$v = \frac{2\pi R}{T}$$

Consideriamo adesso il raggio della circonferenza che unisce il centro col punto mobile; questo raggio descriverà nel tempo T un angolo eguale a quattro retti. Un punto del raggio, situato all'unità di distanza dal centro, descriverà nello stesso tempo una circonferenza di raggio 1 ed avente perciò la lunghezza 2π. La sua velocità sarà quindi

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Questa velocità ω di un punto del raggio situato all'unità di distanza dal centro si chiama *velocità angolare* del raggio, e di tutti i suoi punti, cioè anche del punto A.

Moltiplicando ambo i membri dell'ultima eguaglianza per R si ottiene

$$\omega R = \frac{2\pi R}{T} = v$$

la quale ci dice che la velocità assoluta dei vari punti del medesimo raggio, che hanno comune la velocità angolare ω, è proporzionale alla loro distanza R dal centro.

La durata T di un giro prende anche il nome di *periodo.* Se invece è dato il numero n di giri fatti in un minuto secondo, se cioè n periodi valgono un minuto secondo, sarà

$$nT = 1 \qquad\qquad T = \frac{1}{n}$$

Si ha allora per la velocità angolare

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n$$

STATICA.

17. — **Principio d'inerzia**. — L'esperienza ci insegna che un corpo, non dotato di vita, non si mette in moto senza l'intervento di una causa esterna. C'è anzi di più — noi siamo abituati a vedere che i corpi inanimati, anche dopo ricevuto un impulso, si muovono più o meno lungamente ma finiscono col fermarsi. Ciò indusse i primi naturalisti a ritenere che la materia abbia una tendenza al riposo anche se in movimento.

Un esame più attento ci rivela però che la tendenza dei corpi in moto a fermarsi non è propria del corpo in moto, ma è un effetto degli ostacoli che esso incontra nel movimento; e infatti una palla che, ricevuto un impulso, si ferma presto su un terreno accidentato, si muove più a lungo in un terreno piano, e più a lungo ancora in un piano levigato o in un piano di ghiaccio. Ne possiamo indurre che se gli ostacoli al moto potessero del tutto essere eliminati, se si potesse cioè distruggere interamente l'attrito dovuto alle asperità del terreno e la resistenza dell'aria che avvolge tutti i corpi, il moto si proseguirebbe indefinitamente, in linea retta e con velocità costante. È questo il principio d'inerzia, che può enunciarsi nel modo seguente :

Un corpo, non dotato di vita, persevera nel proprio stato di quiete, o di moto uniforme e rettilineo, a meno che non intervenga una causa esterna che modifichi la velocità o la direzione del moto.

Questo principio non può essere direttamente provato dall'esperienza, poichè non si può sottrarre completamente un corpo all'azione delle cause perturbatrici del moto. Esso viene affermato per *induzione*, e riceve continue conferme dall'accordo tra i fatti reali e le conseguenze che dal principio stesso possono dedursi; il primo ad averne una nozione esatta fu Leonardo da Vinci.

18. **Forze**. — È adunque necessario l'intervento di una causa esterna perchè si abbia una modificazione nella velocità e nella direzione del moto di un corpo; a queste cause esterne si dà il nome di *forze*.

Lanciando verso l'alto un corpo pesante, la sua velocità va progressivamente *diminuendo* per l'azione della forza di gravità; per la medesima forza abbandonando un corpo da una certa altezza esso si muove verticalmente con velocità *crescente*, e, sempre per essa, un proiettile lanciato in una certa direzione viene deviato a ogni istante nel suo moto che diviene perciò curvilineo. In tutti i casi in cui si constata una variazione di velocità in un corpo in moto si può riconoscere l'azione di una o più forze, alcune acceleratrici, se agiscono nel senso del moto, altre ritardatrici se agiscono in senso opposto, e i cui effetti si elidono solo quando il moto del corpo è uniforme e rettilineo, o se il corpo resta in riposo. Si dice allora che le forze si fanno *equilibrio*.

Si può quindi riconoscere la presenza di una forza dal fatto che un corpo resta in quiete, malgrado su esso agisca già un'altra forza. Così se noi cerchiamo di separare con le mani un corpo in due parti e non vi riusciamo, diciamo subito che tra le parti del corpo si esercitano delle forze che si oppongono al loro allontanamento; sono le *forze molecolari* o di *coesione*, che nell'esempio citato si oppongono alle nostre *forze muscolari*.

19. **Le forze molecolari**, che sono specialmente evidenti nei corpi solidi, si oppongono non solo alla separazione del corpo in parti, ma anche ai cambiamenti di forma e di volume del corpo; esse però si estrinsecano solo quando è già avvenuto uno spostamento delle parti del corpo o una

deformazione, manifestandosi come una tendenza del corpo a riprendere la forma o il volume di prima; si chiamano anche *forze elastiche*.

Un corpo nel quale per qualsiasi forza esterna non si produca una deformazione anche piccola, non esiste — per lo studio della Meccanica è però utile il concepirne l'esistenza; gli si dà il nome di *corpo rigido*, e si chiama Meccanica dei sistemi rigidi la Meccanica di tali corpi ideali. Le leggi cui si perviene in tal modo sono soltanto in parte applicabili ai corpi solidi reali, che son sempre corpi deformabili; ma mentre, da un canto, lo studio della Meccanica riesce con ciò molto semplificato, esso è sempre utilissimo, poichè è sempre possibile ricercare le modificazioni che devon subire i risultati generali per essere applicabili ai corpi reali, tanto più se l'intensità delle forze messe in giuoco è tale da produrre deformazioni piccole dei corpi medesimi.

Un esempio chiarirà meglio la cosa. Concepita l'esistenza di un corpo rigido, è possibile trovare due forze che pur agendo in due punti diversi del corpo lascino questo in quiete; e allora noi possiamo dire che le due forze, non mettendo in moto il corpo, e non deformandolo, poichè lo si è supposto rigido, si distruggono completamente nei loro effetti; cioè noi possiamo astrarre interamente dalla loro presenza e considerarle come non esistenti. Se, invece, si fosse trattato di un corpo reale, le due forze agenti in due suoi punti diversi possono ancora lasciarlo in quiete, ma non si potrà dimenticarne l'esistenza, poichè esse deformano alquanto il corpo su cui agiscono. Se la deformazione è di tale piccola entità da non modificare sensibilmente i fenomeni più appariscenti che abbiamo di mira, noi possiamo ancora ritenere che le due forze siano come non esistenti; e, analogamente, applicare al corpo reale i risultati cui si perviene con lo studio dei corpi rigidi.

Ma la deformazione ha luogo in ogni caso: un corpo pesante distende notevolmente un filo di caoutchouc, ed è per questo allungamento che si sviluppa la forza che controbilancia il peso del corpo e ne impedisce la caduta; se lo stesso corpo è sospeso a una corda di acciaio, anche questa si allungherà per quanto in misura impercettibile, cioè basterà un allungamento molto minore di quello osservato nel caoutchouc perchè si sviluppi una forza sufficiente a impedire la caduta del grave.

Ed è solo in virtù di queste deformazioni, e delle forze elastiche che ne derivano, che un corpo può mettersi in moto come un insieme per l'azione di una forza su alcuni punti di esso; poichè appena cominciano a spostarsi i punti direttamente sollecitati, si sviluppano le forze molecolari tra essi e i punti vicini ancora in quiete, cosicchè si mettono in moto anche questi e così il moto si propaga alle parti più lontane. Se la forza continua ad agire, la velocità del corpo è crescente, e se si potessero misurare le dimensioni con mezzi opportuni, esso apparirebbe deformato nel senso del moto, finchè questo è accelerato. Dovendosi il moto comunicare progressivamente dai punti direttamente sollecitati a quelli più lontani, può avvenire che per un impulso molto energico ricevuto dai primi essi si spostino troppo prima che gli ultimi si mettano in moto — ne risultano delle deformazioni eccessive del corpo che possono anche determinare la sua rottura.

Questo avverrà quand'anche il corpo sia perfettamente libero di muoversi; si spiega così che una lastra di vetro, sospesa a un lungo filo verticale, pur essendo in grado di obbedire al minimo soffio di vento, viene forata nettamente da un proiettile che la investa con grande velocità.

20. **Direzione di una forza**. — Se un punto materiale, perfettamente libero e in quiete, vien sottoposto all'azione di una forza, esso si muove in una direzione che si assume come direzione della forza. Così un punto pesante, quando obbedisce all'azione della gravità, si muove secondo la retta che lo unisce col centro della Terra; questa retta dicesi *verticale* e coincide con la direzione della forza di gravità.

Se una forza agisce all'estremo di un filo flessibile e tenuto fermo all'altro estremo, il filo assume la direzione della forza. Così un filo al cui estremo sia legato un peso, e che è tenuto fermo all'altro estremo, può servire a determinare la direzione della gravità (*filo a piombo*), cioè la verticale passante per il punto fisso.

21. **Misura statica delle forze.** — Le forze sono *grandezze fisiche* suscettibili di misura. Per stabilire la loro misurabilità occorre, come per tutte le grandezze fisiche che andremo incontrando, definire il *criterio di uguaglianza* e il *criterio di molteplicità*, servendoci di uno qualunque dei loro

effetti, per esempio della loro attitudine a ristabilire l'equilibrio di un corpo sottoposto ad altre forze.

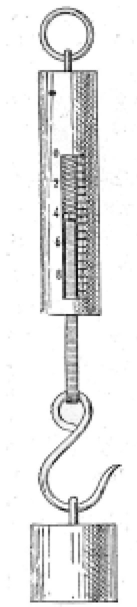


Fig. 7.

Così diremo che *due forze sono eguali,* se agendo in direzione opposta su un corpo si fanno equilibrio, cioè non alterano lo stato di quiete o di moto uniforme e rettilineo di esso; e che una forza è doppia, tripla, *emmupla* di un'altra se è capace di fare equilibrio a due, tre, *m* forze eguali alla seconda e agenti nella stessa direzione opposta a quella della prima. Posto ciò chiamiamo *grammo-peso* la forza con cui la Terra attira un centimetro cubo d'acqua distillata alla temperatura di 4°, e prendiamola come *unità di misura provvisoria* delle forze. Risulta da quanto si è detto che se una forza sconosciuta è capace di sostenere per es. sette centim. cubi d'acqua di cui ciascuno è sottoposto da parte della terra alla forza di un grammo peso, la forza sconosciuta avrà l'*intensità* di 7 grammi peso.

Il confronto delle forze può essere agevolato dalle bilance a molla o dai dinamometri (Fig. 7), consistenti in una molla d'acciaio che si deforma più o meno sotto l'azione di forze più o meno intense, e le cui deformazioni sono facilmente misurabili per mezzo di una scala graduata.

Per graduare l'apparecchio si sospendano alla molla dei pesi conosciuti, per esempio dei volumi d'acqua esattamente misurati in centimetri cubi, e si segnino sulla scala i numeri 1, 2, 3 ecc. nei punti ove si ferma l'indice fissato alla molla quando ad essa son sospesi 1, 2, 3 centimetri cubi d'acqua. L'apparecchio sarà pronto per misurare, con le sue indicazioni, una forza sconosciuta qualsiasi. Praticamente bisogna tener conto del fatto che la elasticità della molla varia col tempo, cosicchè sospendendo ad essa dopo un certo tempo dalla graduazione la stessa serie di pesi, si ottengono indicazioni diverse dalle primitive — bisogna quindi di tanto in tanto *verificare la graduazione* e tener conto delle correzioni che si riscontrassero necessarie.

22. **Rappresentazione grafica delle forze**. — Una forza è perciò una entità che è perfettamente individuata quando ne siano dati il punto di applicazione, che non ha bisogno di esser definito, la direzione e l'intensità. Noi possiamo rappresentarla graficamente con un segmento avente un estremo nel punto d'applicazione, la direzione della forza, e una lunghezza corrispondente all'intensità della forza, secondo una scala di riferimento da stabilire.

23. **Composizione delle forze applicate a un punto**. — Se sopra un punto agiscono più forze comunque dirette, è sempre possibile sostituire al loro insieme una forza unica capace di produrre lo stesso effetto, e che si chiama *risultante* delle forze date. Si chiama invece *equilibrante* di un sistema dì forze quell'unica forza che è capace di ristabilire l'equilibrio di un punto sul quale agisce il sistema.

L'equilibrante è eguale ed opposta alla risultante di un sistema di forze. Difatti l'equilibrante farebbe equilibrio al sistema di forze: ma a questo è equivalente la sua risultante, quindi l'equilibrante e la risultante si fanno equilibrio e son perciò eguali ed opposte.

24. **Parallelogrammo delle forze**. — *La risultante di due forze applicate a un punto è rappresentata graficamente dalla diagonale del parallelogrammo che ha per lati i segmenti che rappresentano le forse componenti.*

Per verificare sperimentalmente questo principio si ricorre all'apparecchino rappresentato dalla fig. 8. Dal punto O partono tre fili, dei quali uno porta direttamente un peso R, e gli altri due, passando per le corrucole G e K, son messi in tensione dai due pesi P e Q.

Il punto O è perciò sollecitato dalle tre forze P, Q, R agenti secondo le direzioni dei fili; se le tre forze son tali che ciascuna sia minore della somma delle altre due, il

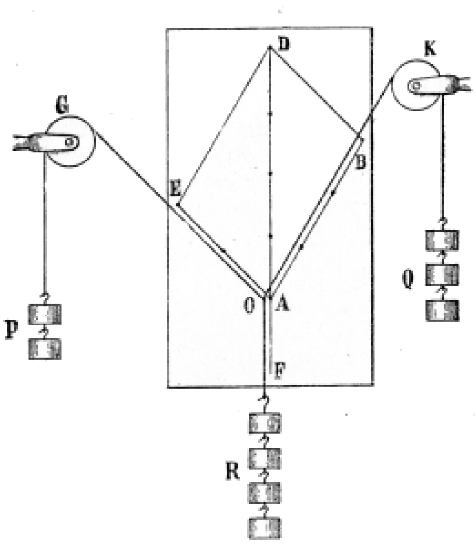


Fig. 8.

punto O raggiunge una posizione di riposo nella quale le tre forze si fanno equilibrio — e allora ciascuna funziona, per definizione, da *equilibrante* delle altre due.

Or disponendo un foglio dietro il piano dei tre fili, riportandovi le direzioni dei tre fili, e tagliando sulle tre rette ottenute tre segmenti proporzionali ai pesi P, Q, R, cioè tre segmenti che rappresentano le tre forze equilibrantisi nel punto O, si può verificare graficamente sul foglio che ciascuno dei tre segmenti, per esempio AF, è eguale ed opposto alla diagonale AD del parallelogrammo costruito cogli altri due.

Adunque la forza rappresentata da AD, essendo eguale ed opposta all'equilibrante AF delle forze AB, AE, è appunto la risultante di queste (§ 23).

Il principio è così verificato. — Esso vale ancora nel caso che le due forze abbiano la stessa retta d'azione, quando cioè la risultante è eguale alla somma o alla differenza delle componenti secondo che queste agiscono nello stesso senso o in senso opposto.

Del resto quest'ultima proprietà è conseguenza diretta dei criteri adottati, per definizione, nella misura statica delle forze (§ 21).

25. **Risoluzione di una forza in due.** — Inversamente ci si può proporre di sostituire a una forza data un sistema di due forze capace di produrre lo stesso effetto, e si può scegliere una coppia di forze qualsiasi tale che il parallelogrammo costruito con i segmenti che le rappresentano abbia per diagonale il segmento che rappresenta la forza data. Il problema ha infinite soluzioni poichè data la diagonale, cioè due vertici del parallelogrammo, ci sono infiniti parallelogrammi che hanno in comune quella diagonale. Occorre quindi assegnare ancora o la direzione di entrambe le componenti, o la direzione e l'intensità di una di esse.

26. **Composizione di più forze applicate a un punto**. — Se le forze da comporre sono in numero qualunque basterà comporne due, poi comporre la loro risultante con la terza forza, e poi la nuova risultante con la quarta e così di seguito.

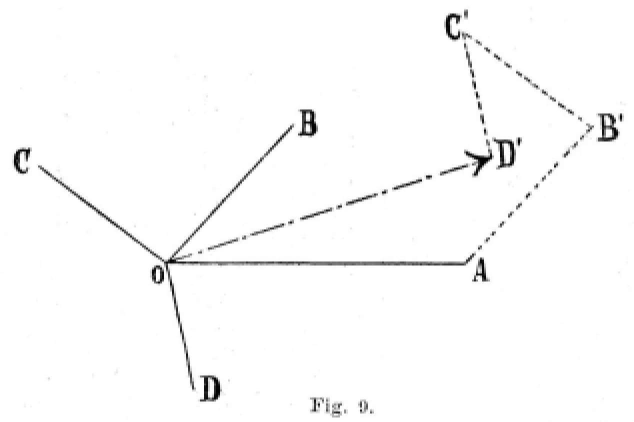


Fig. 9.

La costruzione si semplifica ricorrendo al cosiddetto *poligono delle forze*. Dal vertice A di una delle forze (fig. 9) si traccia la spezzata AB'C'D' composta di segmenti eguali e paralleli alle altre forze. È facile riconoscere che la congiungente di O con l'estremo D' della spezzata rappresenta la risultante di tutto il sistema. — Se il punto D' coincidesse con O la risultante sarebbe nulla, cioè le forze si farebbero equilibrio.

27. **Spostamento del punto di applicazione delle forze nei corpi rigidi.** — Sia applicata nel punto A di un corpo rigido (fig. 10) la forza AF. Ad essa si può sostituire, in tutti gli effetti, la forza eguale BF', il cui punto di applicazione è situato nella retta AF.

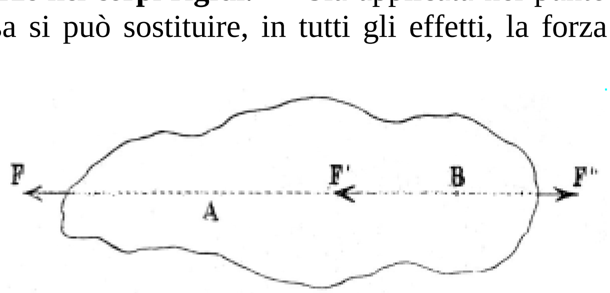


Fig. 10.

Difatti se in B si fanno agire le due forze eguali ed opposte BF' e BF'' le condizioni del corpo non son mutate; abbiamo così tre forze agenti AF, BF' e BF'' delle quali le AF e BF'' si neutralizzano nei loro effetti, perchè eguali, opposte, e agenti su due punti di un corpo rigido (§ 19); resta quindi soltanto attiva la BF'.

28. **Composizione di due forze applicate a un corpo rigido e concorrenti in un punto.** — Basta prolungare le direzioni delle forze fino al loro punto d'incontro, trasportare in questo i due punti di applicazione, (§ 27), e applicare le regola del parallelogrammo.

29. **Caso delle forze parallele.** — I. *La risultante di due forze parallele applicate in due punti rigidamente uniti e dirette nello stesso senso è uguale alla loro somma, è parallela ad esse, e il suo punto di applicazione divide la congiungente i punti d'applicazioni delle componenti in parti inversamente proporzionali alle componenti medesime*.

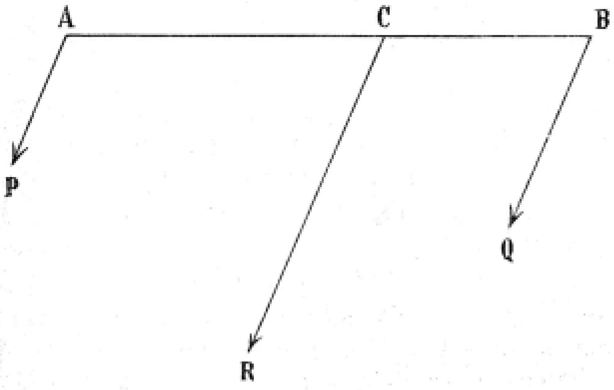


Fig. 11.

Così se AP e BQ (fig. 11) sono le componenti, la risultante CR è parallela ad esse, e si ha $CR = AP + BQ$; $AC{:}CB = BQ{:}AP$

II. *La risultante di due forze parallele applicate in punti rigidamente uniti e dirette in senso inverso è parallela alle componenti, eguale alla loro differenza e diretta nel senso della maggiore; il suo punto di applicazione giace sul prolungamento della congiungente i punti di applicazione delle componenti, dalla parte della maggiore; e le sue distanze dai punti di applicazioni delle componenti sono inversamente proporzionali alle componenti medesime*.

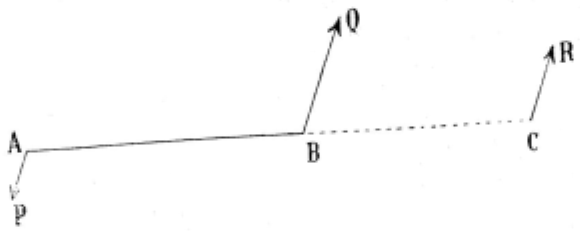


Fig. 12.

Così se AP e BQ sono le componenti (figura 12) la risultante è CR, e si ha

$$CR = BQ - AP;\ CA : CB = BQ : AP$$

Di questi due teoremi si può dare una dimostrazione fondata sui teoremi precedenti della statica.

Noi ci contenteremo di verificarli sperimentalmente per mezzo dell'apparecchino rappresentato nella fig. 13.

Per sottrarre l'asticella AB all'azione del suo peso, due fili attaccati agli estremi di essa, passando per due carrucole, sostengono due pesetti p, q; così l'asticella è libera di muoversi in tutti i sensi. Applicando inoltre agli estremi dei fili due altri pesi P e Q l'asticella tenderà a salire per effetto delle forze P e Q che vengono ad agire, per mezzo dei fili, nei punti A e B.

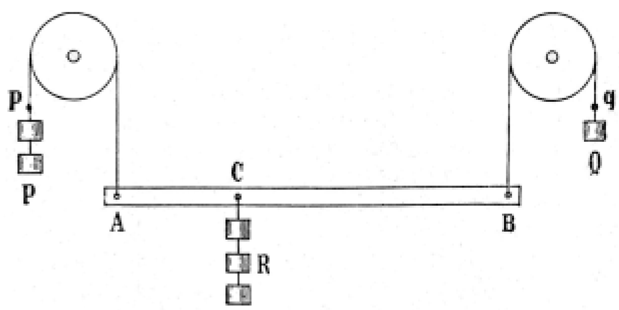


Fig. 13.

L'aggiunta di un peso R = P + Q, in un punto C tale che si abbia

$$AC : CB = Q : P$$

è sufficiente a ristabilir l'equilibrio. Cioè la CR è la equilibrante del sistema di forze P e Q, cosicchè la risultante di queste sarà una forza eguale e contraria a R, come richiede l'enunciato I.

Considerando invece la forza Q come la equilibrante delle forze A ed R, riesce verificato l'enunciato II**.**

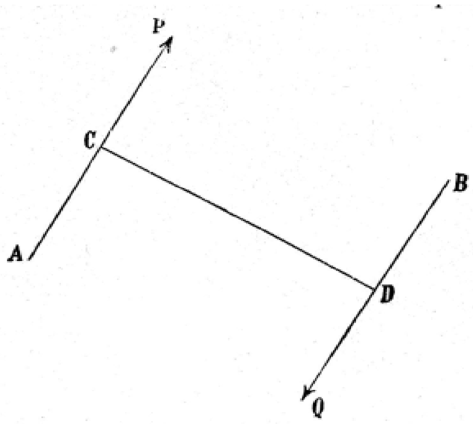


Fig. 14.

30. **Coppia di forze parallele.** — Se nel caso dell'enunciato II (forze parallele dirette in senso inverso) le componenti sono eguali, si dimostra che non esiste più una *equilibrante,* cioè non è possibile con una forza sola fare equilibrio alle due forze date.

Si dice allora che le due forze formano una coppia, la quale tende a imprimere al corpo su cui agisce un moto rotatorio.

Si dice *braccio* della coppia la distanza CD delle due rette parallele secondo cui agiscono le due forze (fig. 14); *momento* della coppia il prodotto del braccio per l'intensità di una delle forze.

Il momento di una coppia misura la sua efficacia, nel senso che due coppie agenti in piani paralleli, e che hanno egual momento, sono equivalenti se tendono a produrre la rotazione nel medesimo verso, e si equilibrano se agiscono in senso inverso.

Per accrescere l'efficacia di una coppia si può quindi aumentare l'intensità delle forze o la distanza delle loro rette d'azione.

31. **Centro delle forze parallele.** - La risultante di più forze parallele si trova componendone due, componendo la risultante ottenuta con la terza, e poi con la quarta e così di seguito. Se le forze date non agiscono tutte nel medesimo verso, converrà dividerle in due gruppi distinti, e comporre separatamente quelle agenti in un senso e quelle agenti in senso inverso, fino a ottenere due forze sole, delle quali sarà agevole trovare la risultante in base all'enunciato II (§ 29). Il punto d'applicazione della risultante finale chiamasi *centro delle forze parallele.*

Si osservi intanto, nelle fig. 11 e 12, che il punto d'applicazione C della risultante è determinato solo dalla intensità delle componenti e non dalla loro direzione; lo stesso può dirsi se le forze sono in numero maggiore, cosicchè il centro delle forze parallele ha una posizione che resta immutata se le componenti girano tutte di un angolo eguale, conservandosi perciò parallele.

32. **Statica dei corpi girevoli attorno a un asse.** — Le condizioni di equilibrio di un corpo non interamente libero, ma che ha solo facoltà di girare intorno a un asse fisso, sono naturalmente diverse da quelle sopra stabilite, poichè oltre alle forze effettivamente agenti possono intervenire le altre, inesauribili se l'asse è assolutamente fisso, che hanno origine nei sostegni dell'asse e nelle forze molecolari di questo, o del corpo.

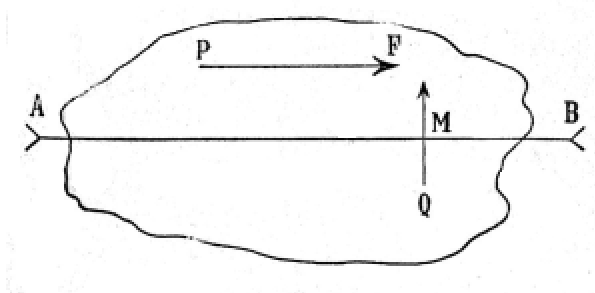


Fig. 15.

Se, per es., il corpo rappresentato nella figura 15, ha solo libertà di girare intorno all'asse AB, una forza come la PF agente parallelamente all'asse in un punto qualunque P è di nessun effetto, poichè essa tende solo a spostare il corpo lungo l'asse, ciò che si è supposto non possa avvenire. E così è senza effetto la forza Q M, che taglia l'asse AB nel punto M, e che tende solo a spostare l'asse trasversalmente o a infletterlo. È quindi inefficace qualunque forza giacente in un piano qualunque che passi per l'asse AB.

Supponiamo adesso che l'asse di rotazione sia normale al piano della figura 16, e si projetti in essa nel punto O. Una forza come la AB, giacente nel piano della figura, potrà produrre la rotazione del corpo in senso inverso a quello degli indici dell'orologio; e un moto inverso tende a produrre la forza CD.

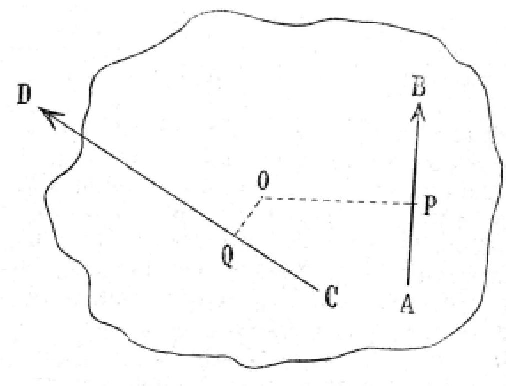


Fig. 16.

In tal caso si dà il nome di *braccio* della forza AB al segmento OP che misura la distanza tra l'asse e la forza; e si chiama *momento della forza* il prodotto dell'intensità della forza (AB) per il suo braccio (OP). Il momento della forza CD sarà quindi CD × OQ.

Il momento misura l'efficacia della forza, nel senso che due forze si fanno equilibrio se hanno egual momento e tendono a produrre la rotazione in senso opposto; così le due forze AB, CD lasceranno in quiete il corpo se si ha

$$AB \times OP = CD \times OQ$$

Se invece le due forze tendono a produrre la rotazione nel medesimo verso, e hanno egual momento, esse producono egual effetto e son perciò sostituibili l'una all'altra.

Se le forze non agiscono in un piano perpendicolare all’asse, ne è solo efficace la componente presa in questo piano; mentre l’altra componente parallela all’asse è di nessuno effetto, per quanto si è visto sopra (fig. 15).

Di tutte queste proposizioni, che vengono dimostrate nei Corsi completi di Meccanica, noi possiamo verificarne qualcuna per mezzo dell’apparecchino della fig. 17.

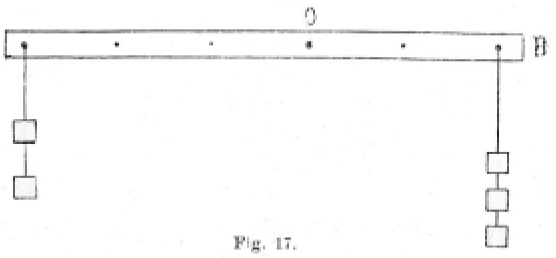


Fig. 17.

L’asticella AB è imperniata nel punto O, scelto in modo che l’asticella, malgrado il suo peso, resti in equilibrio in qualunque posizione. Lungo AB per mezzo di appositi uncini possono sospendersi diversi pesi dall’una e dall’altra parte di O; e si può constatare che l’asticella resta in equilibrio quando i momenti dei due pesi, cioè i prodotti dei pesi per le distanze dal pernio O, sono eguali: e che perciò un piccolo peso può equilibrare l’azione di un peso maggiore, purchè esso sia attaccato a distanza maggiore dall’asse, purchè abbia cioè un braccio più lungo.

33. **Statica dei corpi soggetti alla gravità. —** La forza di gravità agisce su ciascuna particella dei corpi, per quanto piccola, nella direzione della retta che la unisce col centro della Terra; e tutte queste forze agenti su ciascuna molecola possono considerarsi praticamente come parallele, trovandosi il centro della Terra a distanza grandissima. Se il corpo è rigido noi possiamo comporre tutte queste forze in una risultante unica, eguale alla loro somma; essa sarà il *peso* del corpo e sarà applicata in un punto che occupa una posizione invariabile nel corpo e che si chiama centro delle forze parallele di gravità, o, più semplicemente, *centro di gravità* o *baricentro.*

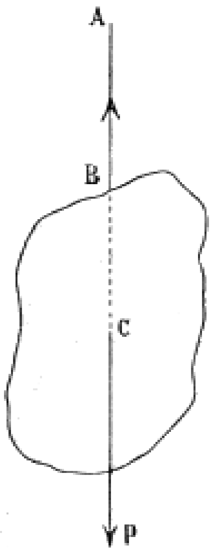


Fig. 18.

Ciò significa che noi possiamo, nella statica dei corpi pesanti rigidi, dimenticare le forze di gravità agenti nei vari punti di essi, e tener conto soltanto di una forza unica eguale al peso del corpo, applicata nel suo centro di gravità e agente in direzione verticale.

Quando, perciò, un corpo è sostenuto esattamente per il suo centro di gravità, esso si comporterà come se la gravità non esistesse, poichè il sostegno eserciterà, in virtù della sua deformazione, una forza che annullerà gli effetti della gravità. Se poi il filo è attaccato al corpo in un punto B qualsiasi di questo (fig. 18), il corpo sarà in equilibrio solo quando la forza CP di gravità applicata nel centro di gravità C e la forza BQ esercitata dal filo in tensione siano eguali e direttamente opposte. Se quindi si constaterà che l’equilibrio è ottenuto, ciò vorrà dire che AB e CP appartengono a un’unica retta, e che perciò:

1. Il filo AB assume la direzione verticale.
2. Il suo prolungamento passa per il centro di gravità C del corpo.

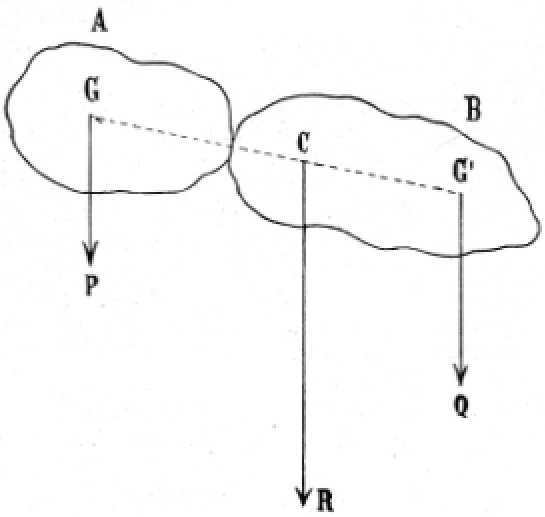


Fig. 19.

Basterà così sospendere il corpo per un altro suo punto qualsiasi, e cercare il punto d’incontro dei due prolungamenti dei fili; esso sarà il centro di gravità del corpo.

La posizione del centro di gravità può essere prevista col ragionamento per i corpi *omogenei* (aventi cioè la stessa natura chimica e la stessa costituzione fisica in tutti i punti) e di forma geometrica determinata. Noi ci limitiamo a riferire i risultati principali:

Un segmento pesante ha il suo centro di gravità nel suo punto di mezzo.

Il triangolo ha il centro di gravità nel punto d’incontro delle tre mediane.

Il cerchio e la sfera hanno il centro di gravità nel centro geometrico.

La piramide e il cono hanno il centro di gravità nella congiungente il vertice col centro di gravità della base, a tre quarti dal vertice.

Il prisma e il cilindro hanno il centro di gravità nel punto di mezzo della congiungente i centri di gravità delle basi. Infine se due corpi A e B (fig. 19) hanno i pesi P e Q, e i centri di gravità G e G', riunendo rigidamente i due corpi in modo qualsiasi, si otterrà il centro di gravità dell'insieme dei due corpi nel seguente modo. Si applichino in G e G' due forze parallele GP e G'Q rappresentanti i pesi dei due corpi, e si compongano le due forze con la regola del § 29, I; il punto di applicazione O della risultante OR sarà il centro di gravità del sistema.

34. **Equilibrio di un corpo pesante girevole attorno a un asse**. Sono applicabili i risultati stabiliti al § 32, tenendo presente che l'azione della gravità si riduce a quella di una forza eguale al peso del corpo e applicata nel suo centro di gravità.

Si vide allora che una forza è inefficace se agisce parallelamente all'asse. Cosichè se l'asse di rotazione del corpo pesante è verticale, cioè parallelo alla forza di gravità, il corpo sarà in equilibrio in qualunque posizione. Si trova in questa condizione, per es., un cancello i cui cardini siano su una retta verticale.

Quando l'asse di rotazione è orizzontale o inclinato, la forza di gravità sarà inefficace, e quindi il corpo in equilibrio, se il momento di essa è nullo, cioè se è nulla la distanza tra l'asse e la retta verticale che passa per il centro di gravità. Questo avverrà:

1° se il centro di gravità giace sull'asse, per qualunque posizione del corpo; esempio una ruota pesante girevole intorno a un asse sul quale si trovi il centro di gravità.

2° se il corpo è in tale posizione che il centro di gravità si trovi nel piano verticale condotto per l'asse. Così se l'asse di rotazione orizzontale si projetta in C (fig. 20) e il centro di gravità S si trova sulla verticale condotta per O, il momento del peso è nullo perchè è nullo il suo braccio, e il corpo è

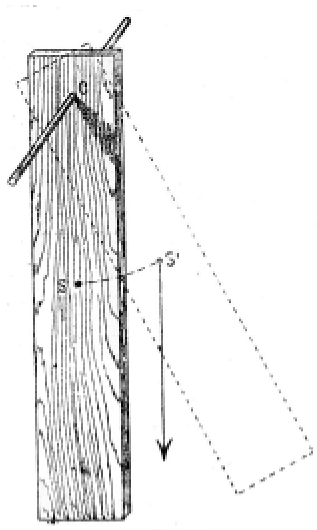


Fig. 20.

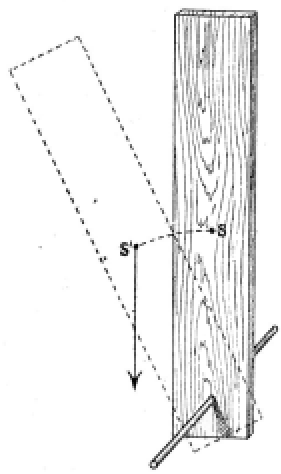


Fig. 21.

in equilibrio. Lo stesso può dirsi se il corpo trovasi capovolto nella posizione della fig. 21.

Si riconosce però subito una differenza notevole tra le due posizioni corrispondenti alle fig. 20 e 21. Nella prima se il corpo viene allontanato dalla posizione di equilibrio, la forza di gravità tende a ricondurvelo. Nella seconda, spostando anche di poco il corpo, la medesima forza tende a capovolgerlo, per portarlo nella posizione della fig. 20. Si dice che quest'ultima è posizione di *equilibrio stabile,* e l'altra di equilibrio *instabile.* Come si vede dalla figura nell'equilibrio stabile il centro di gravità occupa la posizione più bassa tra tutte le possibili.

Quando poi il corpo è in equilibrio in qualunque posizione, l'equilibrio si dice *indifferente.* Ciò ha luogo, come si è detto, quando l'asse è verticale o quando il centro di gravità giace sull'asse.

35. **Equilibrio dei corpi sospesi in un punto, o poggiati su un piano. —** Quando un corpo è mobile intorno a un punto si avrà l'equilibrio se la verticale condotta per il centro di gravità passa per il

punto di sospensione. Possono aversi anche qui i tre casi di equilibrio (stabile, instabile e indifferente).

Quando il corpo è poggiato su un piano, esso è in equilibrio se la verticale condotta per il centro di gravità incontra il piano in un punto interno al poligono costruito coi punti più esterni di appoggio.

36. **Leva e carrucola fissa.** — Come applicazione dei principi studiati al § 32 studieremo la leva e la carrucola fissa.

La leva è un'asta girevole intorno a un asse che prende il nome di *fulcro;* in due punti di essa agiscono due forze; nel suo impiego pratico viene utilizzata per vincere una forza, cui si dà il nome di resistenza, per mezzo di un'altra forza cui si dà il nome di potenza.

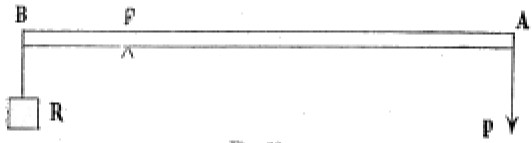


Fig. 22.

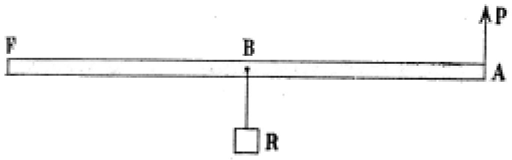


Fig. 23.

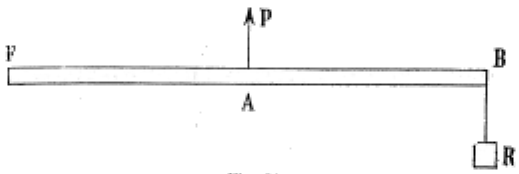


Fig. 24.

Nel caso della fig. 22 la potenza P è impiegata per equilibrare l'azione della resistenza costituita dal peso R; F è il fulcro. Una tale leva dicesi di 1° genere. Nella fig. 23 è rappresentata invece la leva di 2° genere; in essa il fulcro è a un estremo, la potenza P all'altro estremo, e la resistenza B è interposta.

Infine nella leva di 3° genere (fig. 24) è invece interposta la potenza.

Le due forze P ed R, trascurando il peso dell'asta, devono equilibrarsi intorno all'asse F; chiamando p ed r i rispettivi bracci, ponendo cioè

$$AF = p, \qquad BF = r$$

devono perciò essere eguali i momenti delle forze P ed R, cioè si deve avere in tutti i casi

$$Pp = Rr, \text{ ovvero } P : B = r : p.$$

Si potrà quindi, se è $r < p$, equilibrare la resistenza R con una forza P minore di R.

Sono leve di primo genere: i pali di ferro dei muratori, il *giogo* della bilancia e della stadera (§ 37), le due lame delle forbici, ecc.; di secondo genere: i due pezzi dello schiaccianoci, il remo della barca, ecc.; di terzo genere: le mollette o pinzette, il pedale dell'arrotino, l'avambraccio dell'uomo ecc.

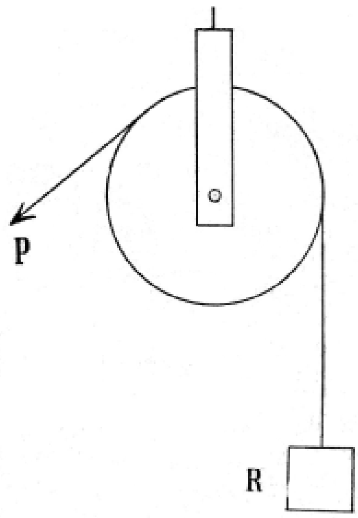


Fig. 25.

Nella *carrucola fissa* (fig. 25) le due forze che si fanno equilibrio agiscono agli estremi della fune che si avvolge sulla *gola* del disco girevole. Esse hanno entrambe per braccio il raggio del disco; e l'equilibrio si ha quindi soltanto se le due forze P ed R hanno eguale intensità. La carrucola adunque trasmette le forze senza alterazione, modificandone solo la direzione. Di questo principio noi abbiamo implicitamente ammessa la verità facendo uso dell'apparecchio della fig. 8 per la verifica del principio del parallelogrammo delle forze.

37. **Bilancia e stadera.** — La *bilancia di precisione* è una leva a braccia eguali che permette il confronto dei pesi applicati ai suoi estremi. La parte mobile è costituita dal *giogo,* che è un telaio metallico resistente e simmetrico attraversato nel suo centro da un prisma triangolare di acciaio; agli estremi del giogo si trovano altri due prismi paralleli a quello centrale; i tre prismi hanno ciascuno uno spigolo lavorato con cura grandissima; essi son collocati come nella fig. 26, in modo che i tre spigoli siano paralleli e disposti in unico piano.

Lo spigolo centrale poggia su un piano di pietra dura (agata), sostenuto da una colonna centrale; sugli spigoli laterali poggiano invece due piani pure di agata, che per mezzo di due *staffe,* reggono i piatti. Il giogo porta inoltre un lungo indice che ha l'estremo inferiore prospiciente a una piccola scala graduata, come nella fig. 27, che rappresenta una bilancia più semplice, ove i piattelli son retti da due uncini. Togliendo i piattelli e le staffe il giogo resta appoggiato per mezzo dello spigolo di mezzo, e siccome il centro di gravità del solo giogo è alquanto al di sotto dello spigolo, esso si trova in una posizione di equilibrio *stabile,* quando è disposto orizzontalmente; allora l'indice si ferma avanti allo *zero* della scala graduata.

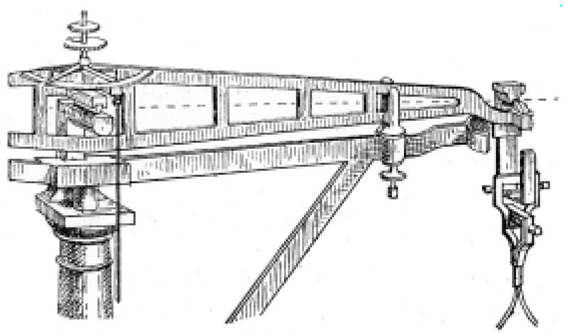


Fig. 26.

Se adesso si applicano i piattelli, di egual peso, e si caricano questi con corpi di peso eguale, essendo per costruzione i coltelli laterali ad eguale distanza dal centrale, l'equilibrio non sarà turbato; che se poi si aggiunge un piccolo sovrappeso, il giogo si inclinerà fino a che il momento del peso sopraggiunto eguaglia il momento inverso del giogo che tende a rimanere orizzontale. L'inclinazione ci rivela adunque che esiste una differenza tra i pesi disposti sui piatti; e se si vuole che venga avvertita una differenza minima tra i pesi medesimi, occorre che la tendenza del giogo a restare orizzontale, cioè la sua stabilità, sia molto piccola; allora la bilancia è sensibile, e si misura la sua sensibilità valutando lo spostamento che l'indice subisce per l'aggiunta di un piccolo peso determinato, per esempio un milligrammo, a uno dei piatti.

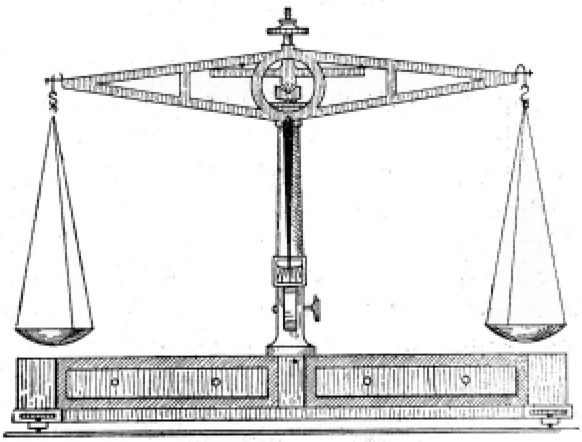


Fig. 27.

Come si è detto il momento del sovrappeso viene equilibrato, dopo l'inclinazione del giogo, dal momento inverso del peso di questo. Se si vuole quindi accrescere la sensibilità della bilancia occorrerà aumentare il momento del sovrappeso, e ridurre quello del giogo. Si ottiene il primo risultato ricorrendo a un giogo molto lungo, e il secondo diminuendo il suo peso, e costruendolo in modo che il suo centro di gravità, pur giacendo al di sotto dello spigolo per assicurare la stabilità, sia molto vicino ad esso; in tali condizioni il giogo oppone un ostacolo minimo contro le forze inclinatrici. Però, allungando molto il giogo, se ne aumenta il peso, e inoltre è più facile che esso s'infletta sotto l'azione di pesi rilevanti, nel qual caso i tre spigoli non si trovano più in un piano, e la sensibilità della bilancia viene diminuita per altre ragioni. Per questi e altri motivi si preferiscono oggi le bilance a braccia corte, e se ne aumenta la sensibilità avvicinando convenientemente il centro di gravità del giogo al coltello. E poichè in molti casi una eccessiva sensibilità può essere d'incomodo, si può per mezzo di un bottone metallico, spostabile lungo una vite verticale, trasportare più o meno in basso il centro di gravità del giogo, e ridurre così la sensibilità. Per completare la parte descrittiva basti accennare che per mezzo di una forchetta messa

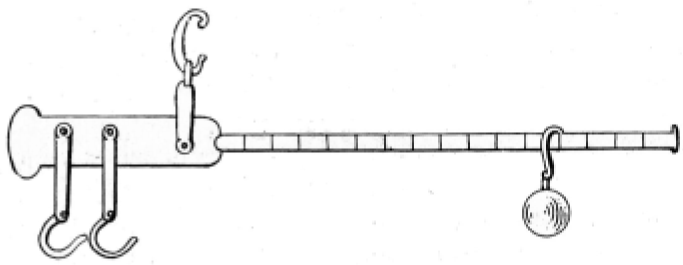


Fig. 28.

in moto da un bottone a cremagliera, sporgente alla base della colonna, si può sollevare l'intiero giogo quando la bilancia non è in funzione e staccare i prismi dai piani di agata, con che si evita che essi si sciupino inutilmente. Una custodia di vetro circonda tutto l'apparecchio, e serve a riparare i pezzi mobili dalle correnti d'aria che turberebbero le pesate.

Abbiamo finora supposto che le braccia siano esattamente eguali, ciò che non può mai ottenersi malgrado la più accurata costruzione. Tale eguaglianza non è però indispensabile se ci si contenta di far la pesata in due tempi. Il mezzo più semplice consiste nel disporre su un piattello il corpo da pesare, e nell'altro una zavorra qualsiasi capace di ristabilir l'equilibrio; quindi togliere il corpo e sostituire *nello stesso piattello* tanti pesi numerati quanti ne occorrono per ristabilir l'equilibrio. Questi pesi danno il valore vero del peso del corpo, anche se le braccia della bilancia non sono eguali. Una pesata di precisione va sempre fatta in tal modo, o con altri procedimenti analoghi.

Nella stadera (fig. 28), che è una leva a braccia disuguali, il corpo da pesare agisce con un braccio costante, e viene equilibrato con un corpo di peso costante, detto *romano*, che si porta a distanze diverse dal fulcro. L'apparecchio viene graduato per mezzo di una serie di pesi conosciuti, e segnando sull'asta, lungo cui scorre il romano, il valore dei pesi nei punti in cui si deve portarlo per ottenere volta a volta l'equilibrio.

DINAMICA.

38. **Primo e secondo principio fondamentale della Dinamica**. — Il primo principio è stato già da noi enunciato col nome di *principio d'inerzia*. Esso può anche esprimersi dicendo che *l'effetto di una forza su un corpo si manifesta con una variazione di velocità o con una variazione di direzione nel movimento del corpo*.

La forza è adunque la causa delle variazioni di moto di un corpo; e appunto il secondo principio della Dinamica serve a rilegare l'effetto alla causa. Esso può enunciarsi così:

Una forza costante produce una variazione di moto costante a ogni unità di tempo per tutta la sua durata d'azione; e la variazione di moto prodotta è proporzionale all'intensità della forza.

Adunque, se il moto è rettilineo, una forza costante che agisca nel senso del moto imprimerà una costante variazione di velocità a ogni minuto secondo, cioè un moto uniformemente accelerato; e l'accelerazione impressa sarà proporzionale all'intensità della forza misurata staticamente.

Questo principio è di origine sperimentale; ma è stato convalidato, più che da esperienze dirette, dall'accordo sempre constatato tra le conseguenze che se ne posson dedurre, e i fatti reali. Noi ce ne serviremo per stabilire un nuovo criterio di misura delle forze.

39. **Massa**. — Corpi diversi per natura o per dimensioni, sottoposti all'azione di una stessa forza, acquistano un moto uniformemente accelerato, ma con accelerazioni diverse; si esprime ciò dicendo che essi *presentano inerzia diversa*, o che hanno *massa diversa*. Diremo che hanno la stessa massa quei corpi che sottoposti alla stessa forza acquistano la stessa accelerazione; e che un corpo ha una massa doppia, tripla, *emmupla* di quella di un altro se richiede una forza doppia, tripla, emmupla di quella occorrente all'altro per acquistare la stessa accelerazione.

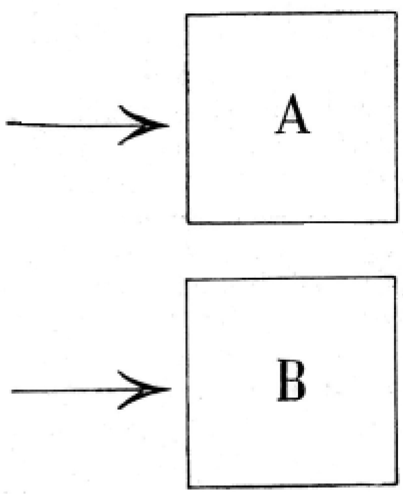


Fig. 29.

Finchè si tratti di corpi della stessa natura, per esempio di diversi pezzi di rame, l'esperienza insegna che hanno massa eguale i pezzi di rame che hanno eguale volume, qualunque sia la loro forma. Inoltre se i due cubi A e B identici (fig. 29) sottoposti a due forze eguali acquistano una certa accelerazione, è evidente che riunendo insieme i due cubi, con che si forma un corpo di volume doppio, e le due forze, con che si ha una forza doppia 2 *f*, si otterrà ancora la stessa accelerazione, e perciò il volume doppio A + B, richiedendo una forza doppia per acquistare la stessa accelerazione, ha una massa doppia di quella di ciascuno dei due cubi. Adunque per corpi della stessa natura la massa è proporzionale al volume del corpo, e quindi alla *quantità di materia* in esso contenuta. Per corpi di natura diversa possiamo ancora effettuare il confronto delle masse, coi criteri sopra stabiliti; ma non potremo più parlare di confronto tra le quantità di materia.

Fissato il criterio di eguaglianza e di molteplicità tra le masse, non ci resta, per misurarle, che scegliere un'unità di misura. A questo scopo si è convenuto di prendere come unità la massa di 1 cm^3 d'acqua distillata a + 4° C, e le si è dato il nome di *grammo*.

Adunque un corpo di qualunque natura avrà la massa di 1 grammo se sottoposto a una forza qualsiasi acquista la stessa accelerazione che acquisterebbe 1 cm^3 d'acqua distillata a + 4°; e avrà la massa di m grammi se per acquistare la stessa accelerazione richiede una forza m volte maggiore di quella necessaria per un corpo di un grammo.

Come conseguenza tra le forze F, F' che imprimono la stessa accelerazione a due corpi di massa m, m' sussiste la relazione

$$F : F' = m : m' \qquad (1)$$

Invece, per il secondo principio dianzi enunciato, tra le forze F, F' capaci di imprimere le accelerazioni a, a' a *uno stesso corpo* sussiste la relazione

$$F : F' = a : a' \qquad (2)$$

40. **Misura dinamica delle forze**. — Le due relazioni ultime permettono di eseguire il confronto tra due forze che imprimono la stessa accelerazione a due masse diverse, o tra due forze che imprimono accelerazioni diverse allo stesso corpo.

Supponiamo adesso che una forza F sia capace di imprimere l'accelerazione a alla massa m, e un'altra forza F' sia capace di imprimere l'accelerazione a' alla massa m'. Per confrontare le due forze, immaginiamone una terza, Φ, capace di imprimere l'accelerazione a' alla massa m'.

Il confronto tra F e Φ può farsi in base alla (1)

$$F : \Phi = m : m'$$

E quello tra Φ e F' in base alla (2)

$$\Phi : F' = a : a'$$

Per un teorema sui rapporti avremo dunque

$$\frac{F}{\Phi} \times \frac{\Phi}{F'} = \frac{F}{F'} = \frac{ma}{m'a'}$$

Supponiamo adesso che la F' sia una forza capace di imprimere alla massa di 1 grammo l'accelerazione di 1 centimetro per secondo: chiamiamola *dine* e assumiamola come *unità di misura delle forze*. Confrontando con essa la F avremo

$$\frac{F}{dine} = \frac{ma}{1 \times 1} = ma$$

Adunque: *Se una forza agendo su un corpo di m grammi gl'imprime l'accelerazione di a centimetri per secondo, il valore della forza misurato in dine sarà il prodotto di m per a*.

Possiamo adesso far il confronto tra la nuova unità di forza, la *dine*, e l'antica, il grammo-peso, cioè la forza con cui la Terra attira la massa di un grammo.

Noi vedremo che quella forza è capace di imprimere alla massa su cui agisce l'accelerazione di circa 980 cm. Avremo perciò

$$\textit{grammo-peso} = 1 \times 980 = 980 \; \textit{dine}$$

e analogamente

$$\textit{chilogrammo-peso} = 1000 \times 980 = 980000 \; \textit{dine}$$

Come si vede la dine corrisponde all'incirca al peso di 1 milligrammo.

Vedremo che l'accelerazione dovuta alla gravità è diversa nei diversi paesi; in conseguenza mentre è assolutamente costante la massa di 1 cm^3 d'acqua distillata, e resterebbe tale anche al di fuori della Terra, è invece variabile il grammo-peso, cioè la forza con cui 1 cm^3 d'acqua è attirato dalla Terra. Queste variazioni raggiungono, dal Polo all'Equatore, circa il 4 per mille del valore totale del peso.

41. **Impulso e quantità di moto**. — Scelta la dine come unità di forza, e ferme restando le unità di massa e di accelerazione, si ha dunque

$$F = m\,a \qquad (4)$$

Se la forza agisce per t secondi, e il corpo è inizialmente in quiete, la velocità finale raggiunta sarà

$$v = at \qquad (5)$$

Moltiplichiamo nella (4) ambo i membri per t; avremo

$$Ft = m\,a\,t$$

cioè; per la (5)

$$F\,t = M\,v$$

Al prodotto $F\,t$ dell'intensità della forza per la sua durata di azione si è dato il nome di *impulso della forza*; e, al prodotto $M\,v$ della massa per la velocità acquistata il nome di *quantità di moto*.

Adunque *l'impulso di una forza è uguale alla quantità di moto comunicata nel tempo d'azione*.

E inoltre: *la stessa forza, agendo per lo stesso tempo sopra corpi diversi, comunica a tutti la stessa quantità di moto*.

42. **Densità**. — Sotto uguale volume le diverse sostanze hanno massa differente; si esprime ciò dicendo che le diverse sostanze hanno diversa densità; e si misura la densità di ciascuna col valore della massa contenuta nell'unità di volume, ovvero col rapporto tra la massa e il volume del corpo:

$$d = \frac{M}{V}$$

La densità dell'acqua, che in un centimetro cubo contiene la massa di 1 gr., sarà quindi eguale a *uno.*

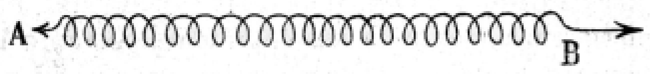


Fig. 30.

43. **Il terzo principio della dinamica**. — Sul punto B (fig. 30) agisca una forza dovuta a una molla compressa, tenuta ferma nel punto A. La molla tenderà a distendersi dalle due estremità, ed eserciterà una forza su B, ed una forza eguale ed opposta su A, cosicchè in questo caso si può dire che in tanto si esercita una forza su un punto B, in quanto se ne esercita contemporaneamente una eguale ed opposta in un altro punto A. La forza è cioè una entità *bipolare*.

Il terzo principio della Dinamica fondato anch'esso sull'esperienza, ci dice che la stessa cosa avviene in tutti i casi in cui si constata l'azione di una forza su un punto, anche senza il meccanismo visibile di una molla deformata; e che perciò *se una forza agisce in un punto, contemporaneamente agirà su un altro punto, in senso opposto e con intensità eguale*. Newton enunciò questo principio con le parole: *a ogni azione corrisponde una reazione eguale e contraria*.

Citiamo alcuni esempi per illustrare il principio medesimo. Una calamita attira un pezzo di ferro, e il ferro attira la calamita con una forza eguale ed opposta. Lo stesso può dirsi delle attrazioni e repulsioni elettriche ed elettromagnetiche.

La Terra attira un corpo qualsiasi alla sua superficie; ma se fosse possibile tener fermo il corpo, si constaterebbe che esso attira la Terra con una forza eguale.

Se un cavallo tira una slitta su un piano, eserciterà uno sforzo solamente quando la cinghia d'attacco è in tensione: allora l'azione si estrinseca sulla slitta, per superare gli attriti o per accrescerne la velocità; la reazione, sempre esercitata dalla cinghia, si manifesta sul cavallo, e gli dà il *senso dello sforzo*.

Quando i due corpi su cui si esercitano l'azione e la reazione son liberi di muoversi, essendo sollecitati in ogni istante dalla medesima forza acquisteranno in ogni istante quantità di moto eguali; se m è la massa dell'uno e v la velocità acquistata in un certo tempo, e se m', v' sono gli elementi analoghi per l'altro corpo sarà perciò

$$m\,v = m'v'$$

ovvero

$$v : v' = m' : m$$

cioè le velocità staranno in ragione inversa delle masse dei due corpi. Lo stesso può dirsi degli spazi percorsi alla fine di un tempo qualsiasi; ed è perciò che la Terra e un corpo cadente si spostano in realtà insieme l'uno verso l'altra; ma la Terra, in ragione della sua massa enorme, subisce uno spostamento impercettibile.

Nello sparo di un'arma da fuoco agisce in ogni istante una forza eguale sul proiettile e sulla culatta dell'arma (il rinculo); e gli spostamenti sono tanto diversi per virtù delle masse così notevolmente disuguali del proiettile e dell'arma con i sostegni connessi.

44. **Dinamica del moto circolare uniforme**. **— Forza centripeta**. Per imprimere a un corpo un moto circolare uniforme è necessaria l'azione di una forza *deviatrice*, senza di che il moto sarebbe rettilineo.

La forza dev'essere costante, poichè ne è costante l'effetto, cioè la deviazione, trattandosi d'un moto circolare; dev'essere, inoltre, diretta in ogni punto verso il centro, poichè se non lo fosse si potrebbe decomporla in due: una verso il centro, e una tangente al cerchio; e quest'ultima, agendo nel senso del moto, altererebbe la velocità, e il moto non sarebbe uniforme. La si chiama *forza centripeta*.

Leghiamo un corpo pesante a un tubo di caoutchouc, e tenendo l'altro estremo per mano imprimiamo al corpo un moto rotatorio uniforme intorno ad essa. Constateremo che il tubo di caoutchouc si allunga; nella sua tendenza a contrarsi esso eserciterà appunto sul corpo la forza deviatrice centripeta necessaria per fargli percorrere un cerchio. Contemporaneamente il tubo disteso esercita una trazione eguale sulla nostra mano, per il terzo principio; e noi proveremo una impressione come se il corpo tenda a sfuggire nella direzione del tubo, cioè del raggio. A questa seconda manifestazione della forza centripeta, esercitatesi sul centro, si dà il nome di *reazione centrifuga*.

Aumentando la velocità del corpo rotante si richiede una forza centripeta maggiore; il tubo si allungherà di più, poichè solo così esso potrà esercitare sul corpo un'azione deviatrice maggiore. Che se il tubo venisse bruscamente tagliato, il corpo continuerebbe a muoversi con moto rettilineo nella direzione posseduta all'istante del taglio, cioè nella direzione della tangente al cerchio nel posto allora occupato. Il corpo sfuggirebbe allora dal cerchio per *mancanza di forza centripeta*: si suol dire impropriamente, anzi inesattamente, che il corpo sfugge per *forza centrifuga*.

Se un disco circolare gira intorno al suo centro, ogni raggio di esso si allunga, come il tubo di caoutchouc dell'esperienza surriferita, fino a che la tendenza elastica a raccorciarsi di ogni raggio sviluppi la necessaria forza deviatrice per tutte le masse distribuite sul disco. Nella rotazione quindi il disco aumenterà di diametro, e così aumentano di lunghezza i raggi dei grandi volani nelle macchine; anzi tale deformazione può, per velocità esagerate, determinarne la rottura.

La meccanica razionale dimostra che la forza centripeta F necessaria per far muovere una massa m con velocità v su un cerchio di raggio r è data dalla formola

$$F = M\,\frac{v^2}{r} \qquad (6)$$

ed essendo

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

ove T indica la durata di un giro, si ha anche

$$F = 4\frac{\pi^2 Mr}{T^2} \qquad (7)$$

La prima formola ci dice che con la stessa velocità assoluta la forza centripeta è maggiore quando il raggio è più piccolo; sono in questa condizione i punti della ruota grande e della piccola di una carrozza. La seconda invece ci dice che, se è la stessa la durata d'un giro, la forza centripeta è maggiore quando il raggio è più grande; sono in quest'ultima condizione i punti di uno stesso corpo rotante, situati a distanza diversa dall'asse.

Per dimostrare gli effetti della reazione centrifuga si sogliono eseguire delle interessanti esperienze; ma la loro interpretazione esatta non è facile in un corso elementare.

Ci limitiamo a dire che si dimostra in meccanica che *le condizioni di equilibrio di uno o più corpi animati da un moto circolare si riducono a quelle degli stessi corpi in quiete, purchè si aggiunga a ciascuno una forza immaginaria, eguale in valore alla forza centripeta, applicata sul corpo, e agente in senso centrifugo*. È appunto questa forza, per esempio, che permette anzi obbliga il ciclista a tenere inclinata verso il centro la macchina in una pista circolare; la macchina in quiete ribalterebbe verso il centro per effetto della gravità, senza l'intervento di quella forza ideale *centrifuga* che le fa equilibrio.

45. **Applicazione della Dinamica alla forza di gravità**. — Come abbiamo visto nella statica dei corpi pesanti alle forze che la Terra esercita sulle singole particelle di un grave può essere sostituita un'unica forza, eguale al peso del corpo, e applicata nel centro di gravità.

Questa forza, misurabile con un dinamometro a molla, è sensibilmente costante alle diverse altezze, poichè diminuisce appena di mezzo millesimo del suo valore portando il corpo a 2000 metri di altezza. Considerando quindi la forza come praticamente costante, essa imprimerà ai corpi che cadono liberamente un moto uniformemente accelerato. Chiamando con P la forza motrice, cioè il peso del corpo, con m la sua massa e con g l'accelerazione impressa avremo dunque

$$P = Mg$$

L'esperienza dimostra che l'accelerazione g è la stessa per tutti i corpi, nello stesso posto della superficie terrestre.

Per un altro corpo di massa M' e di peso P' si avrà adunque:

$$P' = M'g$$

e dividendo queste due eguaglianze membro a membro, si deduce

$$\frac{P}{P'} = \frac{M}{M'}$$

relazione importantissima, la quale permette di eseguire il confronto delle masse di due corpi confrontando i loro pesi. Con ciò il rapporto dei pesi di due corpi, valutato per esempio con la bilancia o con un dinamometro, fornisce immediatamente il rapporto delle masse; e quindi si ottiene in grammi la misura della massa di un corpo qualsiasi confrontando il suo peso con quello di 1 cm^3 d'acqua distillata.

Per la libera caduta valgono poi le formole da noi stabilite per il moto uniformemente vario.

In realtà però tutti i corpi alla superficie terrestre, movendosi in seno all'aria, provano da parte di questa una resistenza al moto che modifica le leggi della caduta. Non solo il moto non è più uniformemente accelerato, e talora neanche rettilineo (come avviene per es. di un pezzo di carta) ma la resistenza dell'aria agendo in misura diversa su corpi di peso diverso ne riduce in modo disuguale la velocità. È perciò che noi vediamo cadere con diversa rapidità un pezzetto di piombo e un fiocco di bambagia. Ma nel tubo di Newton, dal quale può essere estratta l'aria con una macchina che studieremo appresso, dei pezzetti di sughero, di piombo, di carta ecc., cadono insieme, anzichè l'uno dopo l'altro come avviene facendo rientrare l'aria.

Lungo un piano inclinato AB (fig. 31) senza attrito non tutto il peso MP del corpo è attivo nel senso del moto. La forza totale MP può essere invero decomposta nelle componenti MN ed MQ, delle quali l'ultima è inefficace nel moto di discesa del corpo, e la sola forza motrice è MN.

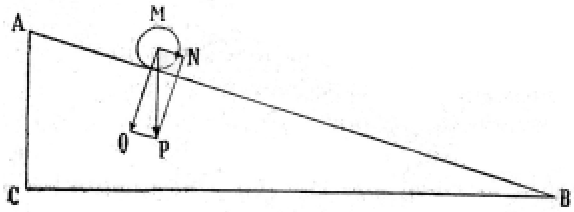


Fig. 31.

Or si vede dalla figura, per la similitudine dei triangoli MNP e ABC, che

$$MN : MP = AC : AB$$

si ha quindi

$$MN = MP \times \frac{AC}{AB}$$

cioè la forza motrice è eguale al peso totale moltiplicato per il rapporto tra l'altezza del piano inclinato (AC) e la sua lunghezza (AB).

Come si vede la forza motrice è sempre minore del peso totale; e quindi l'accelerazione da essa comunicata al corpo nella discesa sarà minore dell'accelerazione *g* che acquisterebbe il corpo cadendo verticalmente.

46. Un caso importantissimo di movimento dovuto alla gravità è quello del **pendolo**, cioè di un corpo girevole attorno a un asse collocato al di sopra del suo centro di gravità.

Spostandolo dalla sua posizione di riposo e abbandonandolo a sè, esso acquista un moto alternativo di va e vieni intorno alla posizione medesima.

Per semplicarne lo studio supponiamo anzitutto che si tratti di un *pendolo semplice* costituito da una pallina piccolissima pesante M (fig. 32) sospesa mediante un filo inestensibile, senza peso e fissato per l'altro estremo in C.

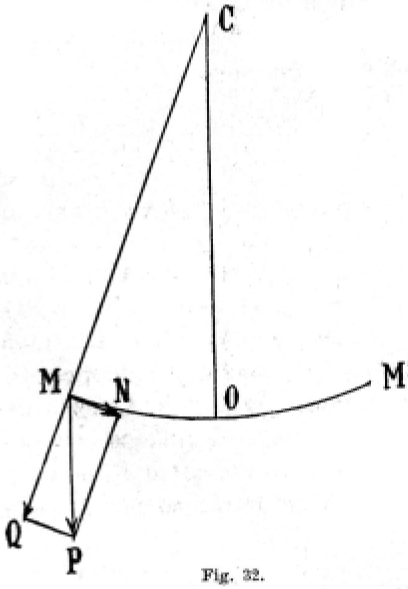


Fig. 32.

Spostando la pallina dalla posizione di riposo O e abbandonandola a sè, essa si avvierà verso O seguendo l'arco di cerchio MO, e sollecitata dalla componente MN del peso MP, valutata secondo la tangente al cerchio mentre l'altra componente MQ nel senso del filo è inefficace, come la componente analoga MQ nel caso del piano inclinato. Mentre però nel piano inclinato la componente utile, MN, è costante lungo la discesa, e perciò il moto è uniformemente accelerato, adesso la componente medesima va diminuendo a misura che la pallina si avvicina ad O, fino ad annullarsi nella posizione di riposo. Il moto durante la discesa sarà quindi *accelerato*, ma non uniformemente. Giunta in O la pallina possiede una certa velocità, quindi proseguirà il suo cammino per inerzia, mentre interverrà a rallentarla la nuova componente del peso che adesso agisce in senso opposto al moto. A tutti i primitivi accrescimenti successivi di velocità, avuti nella discesa, seguiranno altrettante diminuzioni in eguale misura e in ordine inverso, fino a che la pallina avrà perduto interamente la velocità posseduta quando raggiungerà la posizione M', simmetrica di M rispetto ad O. Allora la pallina tornerà a ridiscendere lungo M'O e il moto durerebbe così indefinitamente, se non intervenissero le resistenze al moto dovute all'attrito con l'aria.

La pallina è sottoposta in ogni istante a una forza motrice eguale al valore corrispondente di MN, che è massimo nella posizione estrema, nullo nella posizione di riposo; e che, si dimostra, è proporzionale in una posizione qualunque X allo spostamento XO dalla posizione di riposo, se *l'ampiezza massima* MO è molto piccola. Il moto di un punto che, come il pendolo, è sollecitato verso la posizione di riposo da una forza proporzionale allo spostamento della posizione medesima si chiama *moto oscillatorio semplice*. Noi ne incontreremo frequenti esempi in seguito.

Nel caso delle oscillazioni del pendolo aventi una piccola ampiezza si dimostra che la durata di un'oscillazione semplice, cioè di un'andata da M in M', è calcolabile con la formola

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

nella quale l denota la lunghezza del pendolo e g l'accelerazione dovuta alla gravità.

La pallina impiega lo stesso tempo a discendere da M in O, a salire da O in M', a ridiscendere da M' in O, e a risalire da O in M. — Tutto questo movimento prende il nome di *oscillazione completa,* che ha una durata doppia dell'oscillazione semplice. Si dimostra inoltre che, per un punto qualunque X della traiettoria, si impiega sempre lo stesso tempo, cioè quello di un'oscillazione completa, perchè la pallina passando per X, percorra il cammino XOM'OMX, cioè ripassi due volte *nello stesso senso* per lo stesso punto.

Contando i tempi dall'istante in cui la pallina passa per la posizione di riposo in un certo senso, e notando il tempo t che intercede fino al passaggio per il punto X, si chiama *fase* nel punto X il rapporto $\frac{t}{T}$ del tempo t per l'intero *periodo T*, cioè per la durata di una oscillazione completa.

La formola dianzi riferita comprende le leggi delle oscillazioni del pendolo:

1° Si vede anzitutto che il valore di t non dipende dell'ampiezza, la quale non comparisce nella formola purchè l'ampiezza sia molto piccola, poichè solo allora la formola è valida.

Quindi: *le oscillazioni di piccola ampiezza sono isocrone*, cioè si compiono nello stesso tempo.

2° Nella formola non comparisce neanche la massa della pallina. Adunque: *la durata di oscillazione è indipendente dalla massa del pendolo e dalla sostanza con cui è costruito*.

3° Nel secondo membro della formola è contenuta la lunghezza l del pendolo sotto il segno del radicale. Adunque la *durata delle oscillazioni è proporzionale alla radice quadrata della lunghezza*; cosicchè se diversi pendoli hanno le lunghezze 1, 4, 9, le rispettive durate d'oscillazione staranno come i numeri 1, 2, 3.

Tutte queste leggi possono verificarsi con dei pendoli che si avvicinano abbastanza al pendolo semplice teorico, costituendoli con delle palline piccole sospese a fili di seta.

4° Infine la durata di oscillazione è inversamente proporzionale alla radice quadrata dell'accelerazione della gravità. Cosicchè in un paese dove l'intensità della gravità è maggiore, come al Polo, le oscillazioni si compiranno in un tempo più breve.

47. Se si potesse realizzare un pendolo semplice corrispondente alla sua definizione teorica, si potrebbe, **misurare l'accelerazione della gravità** in un posto misurando la lunghezza l del pendolo e la durata t delle sue oscillazioni. La formola del pendolo, infatti, risoluta rispetto a g diviene:

$$g = \pi^2 \frac{l}{t}$$

Coi pendoli praticamente realizzabili la misura così ottenuta sarebbe però ben poco esatta.

Si gira la difficoltà profittando di una interessante proprietà di qualunque pendolo, per esempio di un'asta metallica portante in basso una massa lenticolare e girevole intorno allo spigolo di un prisma di acciaio poggiato su un piano di pietra dura. Si dimostra, cioè, in Meccanica che, se si capovolge un tal pendolo, è possibile trovare un altro asse disposto nelle vicinanze della lente, e tale che la durata di oscillazione intorno ad esso sia eguale a quella di prima; e inoltre, quando questo è ottenuto, la distanza tra i due coltelli è rigorosamente eguale alla lunghezza di un pendolo semplice che abbia la stessa durata d'oscillazione.

Basta perciò, ottenuta l'identità delle due durate d'oscillazione prima e dopo l'inversione, misurare la durata comune e la distanza tra i coltelli, e sostituire questi valori nell'ultima formola, per avere il valore esatto di g.

Una tale determinazione richiede però delle cautele delicatissime per evitare molteplici cause di errore; costituisce perciò una delle più difficili misure della Fisica, qualora si voglia conoscere con grande esattezza il valore di g.

Così in una serie di misure rimasta celebre i Proff. Pisati e Pucci trovarono a Roma

$$g = cm.\ 980{,}38$$

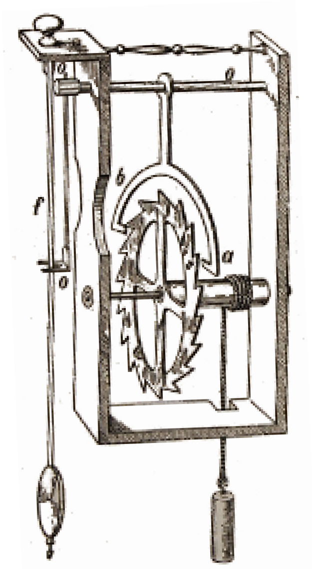


Fig. 33.

Per le misure relative in paesi diversi è adesso molto in uso il **metodo** di **Sternecke** che consiste nel determinare con grande esattezza la durata di oscillazione di un pendolo unico, trasportato in diversi paesi. Basta che in uno di questi sia misurato esattamente il valore di g per dedurre il valore corrispondente negli altri posti.

49. **Applicazione agli orologi**. — Una ruota è messa in moto da una molla o da un peso, e trasmette il suo movimento per mezzo di una serie di ruote dentate agli indici. Per regolare il movimento l'ultima ruota (fig. 33), detta di scappamento, ha i suoi denti impegnati in una forchetta *oab (bilanciere)* che oscilla insieme a un pendolo; e le cose son regolate in modo che la ruota può muoversi di un dente solo quando il pendolo, passando per la posizione di riposo, la lascia libera per un istante.

Immediatamente dopo il dente successivo è arrestato dalla forchetta, cui imprime un impulso che restituisce al pendolo la velocità perduta per gli attriti. Così il pendolo regola in moto, e riceve l'impulso necessario per continuare indefinitamente le sue oscillazioni.

LAVORO ED ENERGIA.

49. **Lavoro meccanico**. — Quando una forza F agente su un punto lo accompagna nel suo movimento, si dice che essa compie un *lavoro L,* che si valuta col prodotto dell'intensità della forza per il cammino s percorso nella direzione della forza:

$$L = F \times s \qquad (1)$$

Così se noi solleviamo verticalmente un grave all'altezza h dal suolo la nostra mano compie un lavoro, e lo compie egualmente la gravità, poichè la forza da questa esercitata, il peso del corpo, accompagna il corpo nel suo movimento. Però la forza sviluppata dalla nostra mano agisce nel senso del moto, mentre la gravità in senso inverso al moto: si dice che la prima compie un *lavoro motore,* la seconda un *lavoro resistente.*

Se la direzione della forza non coincide con quella dello spostamento, il lavoro si valuta moltiplicando la forza per la proiezione del cammino sulla direzione della forza, ovvero moltiplicando lo spostamento per la proiezione della forza sulla direzione dello spostamento. Si ottiene coi due metodi lo stesso risultato.

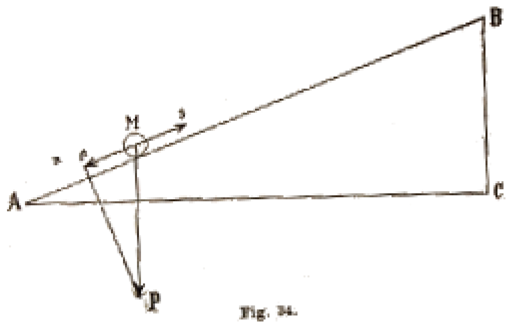


Fig. 34.

Supponiamo, per esempio,che un corpo pesante M sia trascinato di moto uniforme lungo il piano inclinato AB (fig. 34); occorrerà un forza s minore del peso P del corpo. Se lo spostamento totale è *AB,* il lavoro motore compiuto dalla forza motrice s sarà $s \times AB;$ il lavoro resistente compiuto dalla gravità sarà dato da P $\times$ *BC* essendo *BC* la proiezione del cammino *AB* sulla direzione (verticale) della forza; ovvero da $AB \times p,$ essendo p la proiezione della forza sulla direzione del cammino *AB.* E siccome noi abbiamo stabilito che per l'equilibrio del corpo sul piano dev'essere

$$s = p$$

e la stessa eguaglianza dev'essere verificata se si vuole che il moto di salita sia uniforme, sarà anche

$$s \times AB = AB \times p$$

cioè: *finchè il moto lungo il piano è uniforme, il lavoro motore è eguale al lavoro resistente*.

In tal caso le forze *s* e *p* si neutralizzano, e il corpo procede nella salita per inerzia. Ma mentre nella quiete le due forze non compiono lavoro, nel moto il lavoro è compiuto, finchè dura il moto medesimo. Si vede subito che tra i due casi c'è una differenza profonda: la funzione di far equilibrio a una forza lasciando il corpo in quiete può essere esercitata da una qualunque delle forze di cui ci sono riserve inesauribili nel mondo che ci circonda: così per sostenere un corpo pesante basta poggiarlo su un tavolo o legarlo a una fune, utilizzando le forze di coesione: invece per sollevare anche una piuma occorre una *sorgente di forza mobile*; e noi vedremo che le sorgenti di forze mobili non sono inesauribili e hanno perciò un valore industriale.

50. **Unità di misura del lavoro.** — Si assume come unità di misura l'*ergon*, che è il lavoro compiuto dalla forza di una dine quando il suo punto d'applicazione si sposta di 1 cm. nella sua direzione. Nella formola (1) misurando le forze in dine e gli spostamenti in centimetri, il loro prodotto esprime il lavoro in ergon.

Quando l'unità di misura delle forze era il chilogrammo-peso, l'unità di lavoro era il chilogrammetro, cioè il lavoro compiuto dalla forza di un chilogrammo per lo spostamento di 1 metro. E siccome il chilogrammo-peso è all'incirca 980000 dine, e un metro è cento centimetri, il chilogrammetro sarà 980000 × 100 volte maggiore dell'ergon:

1 Kgm. = 98000000 ergon

L'ergon è perciò un'unità praticamente troppo piccola; se ne è introdotta un'altra, per gli usi industriali, dieci milioni di volte più grande, e le si è dato il nome di *Joule*:

1 Joule = 10 milioni di ergon

si ha quindi

1 Kgm. = 9,8 Joule

51. **Potenza di un motore.** — Un *motore* è una sorgente di forza mobile, capace perciò di eseguire un lavoro. Il lavoro che esso è capace di compiere in un minuto secondo si chiama *potenza dei motore.* Questa si valuta in *Watt,* e corrisponde al numero di joule che il motore è capace di eseguire in un secondo. Così un motore ha la potenza di 1000 Watt (1 Kilowatt) se esso può eseguire 1000 joule per secondo.

Un'unità più antica è il *cavallo-vapore*, che corrisponde alla potenza di un motore capace di eseguire 75 chilogrammetri per secondo. E siccome 75 Kgm. equivalgono a 75 × 9,8 = 735 joule, è chiaro che

1 cav. vap. = 735 Watt.

Il lavoro totale compiuto con la potenza di 1 Watt durante un'ora è 3600 joule; esso ha ricevuto il nome di Wattora:

1 Wattora = 3600 joule

1 Kilowattora = 3.600.000. joule = circa 370.000 Kgm.

52. **Forza viva**. — Un corpo animato di moto uniforme può essere libero da forze agenti, o sottoposto a forze che si fanno equilibrio e non alterano perciò le sue condizioni di moto.

Questo equilibrio si dice *dinamico*; ne è un esempio il caso della fig. 34 di un corpo mobile lungo un piano inclinato, sottoposto alla forza *s* e alla componente *p* del peso. Dall'equilibrio delle forze si deduce l'eguaglianza delle componenti nella direzione del moto; e quindi l'eguaglianza del lavoro da esse compiuto. Si ha perciò che *nell'equilibrio dinamico il lavoro motore è eguale al lavoro resistente,* come appunto avviene nel piano inclinato. La stessa condizione è soddisfatta, come è facile verificare, nella leva, e nella carrucola, e permette di trovare le condizioni d'equilibrio con grande facilità, anche con gli ordigni più complicati. Così si calcola facilmente che un ciclista il quale si avanzi su un piano inclinato con una pendenza del 5 per cento, percorrendo 10 metri per ogni metro di spostamento circolare del pedale, deve esercitare coi due piedi, per vincere la gravità, uno sforzo eguale alla metà del peso complessivo del suo corpo e della macchina.

Quando invece una forza agisce da sola su un corpo, la velocità di questo subisce un continuo aumento se la forza è motrice, una continua diminuzione se la forza è resistente, cioè se agisce in senso opposto al moto. Nel primo caso la forza compie un lavoro sul corpo, aumentandone la velocità; nel secondo *il corpo esegue un lavoro contro la forza a spese della sua velocità.*

La vita comune ci offre frequenti esempi di corpi in moto che eseguono lavoro nel diminuire di velocità; così un corpo lanciato verso l'alto compie il lavoro necessario per vincere il suo peso, e lo fa a spese della sua velocità che va sempre diminuendo; un treno animato da una certa velocità può procedere vincendo le forze di attrito, per un certo tratto, malgrado sia soppressa la forza propulsiva del vapore; un proiettile lanciato da un'arma da fuoco può perforare l'ostacolo. Or si dimostra in Meccanica che: *Il lavoro che può eseguire una massa nel restituirsi in quiete* è *eguale al lavoro che fu necessario impiegare per imprimerle la velocità posseduta*; esso rimane immagazzinato nella massa finchè questa conserva invariata la sua velocità ed è misurato dal semiprodotto della massa per il quadrato della velocità $\frac{mv^2}{2}$. Si è dato il nome di *forza viva* a questo lavoro che è capace di eseguire il corpo in moto nel ridursi in quiete. Così un proiettile di 5 grammi, animato dalla velocità di 800 metri = 80.000 centimetri al secondo, possiede la forza viva:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{5 \times 80.000^2}{2} = 16.000.000.000 \ ergon = 1600 \ joule = 163 \ Kgm$$

cioè è capace di eseguire, prima di fermarsi, 1600 joule di lavoro. Se l'arresto avviene con un moto uniformemente ritardato in un decimo di minuto secondo, il proiettile equivarrà per quel tempo a un motore di 16 kilowatt, ovvero di circa 21,7 cavalli.

L'enunciato precedente è un caso particolare di un principio più generale detto *principio delle forze vive,* per il quale: *se su un sistema di corpi in moto agiscono insieme forze motrici e forze resistenti, la somma di tutti i lavori motori, diminuita della somma di tutti i lavori resistenti è eguale al guadagno di forza viva di tutte le parti del sistema*; se perciò il moto è uniforme, la somma di tutti i lavori motori è eguale a quella dei lavori resistenti.

In uno di questi sistemi i diversi lavori motori, i lavori resistenti e la forza viva posson paragonarsi agli introiti, alle spese e alla riserva di cassa di una banca: la riserva si aumenta finchè gl'introiti superano le spese, e così avviene della forza viva; inoltre la banca può far fronte alle spese anche senza entrate, impiegando la propria riserva; e così in un sistema meccanico il lavoro resistente può essere temporaneamente superato a spese della forza viva del sistema.

È chiaro adunque che il lavoro resistente può per qualche tempo esser maggiore del lavoro motore; ma allora la differenza è colmata dalla forza viva, che va perciò diminuendo; che se si vuole un andamento continuo di moto uniforme, il lavoro resistente *non deve* superare il lavoro motore; anzi in realtà il *lavoro utile* sarà sempre minore del lavoro motore, poichè il totale lavoro resistente è in parte *lavoro utile* e in parte *lavoro perduto* negli attriti, negli urti ecc. Si ha perciò, in regime uniforme:

$$\textit{Lav. motore} = \textit{Lav. resistente}$$

$$\textit{Lav. resist.} = \textit{Lav. utile} + \textit{Lav. perduto}$$

e quindi

$$\textit{Lav. utile} < \textit{Lav. motore}$$

Adunque una macchina che utilizzi, per es., una caduta d'acqua di 100 m., a ogni 1000 Chilogrammetri di lavoro motore e quindi a ogni 10 Kg. di acqua caduta, potrà far corrispondere un numero minore di Kgm. di lavoro utile. Siano essi 800; se vengono impiegati per alzare acqua alla stessa altezza, solo 8 Kg. di acqua potranno essere riportati all'altezza di prima. Or i ricercatori del famoso *moto perpetuo* sperano invece che si possa riportare *più* acqua di quanta ne cade, impiegando l'eccesso per ottenere un altro lavoro gratuitamente. È evidente, sulla base dei principi sopra esposti, che un tal risultato non potrà mai ottenersi qualunque sia l'artificio, più o meno ingegnoso, proposto; come non accadrà mai che due persone scambiandosi per vaglia postale alternativamente lo stesso denaro si trovino alla fine in possesso di un capitale maggiore, malgrado la spesa di posta impiegata a ogni invio.

53. **Lavoro perduto, attrito**. — Nello scorrere gli uni sugli altri i corpi incontrano un ostacolo, la forza di attrito, che funziona da forza resistente qualunque sia il senso del moto. L'attrito *statico* è misurato dalla forza minima necessaria a produrre lo spostamento relativo dei due corpi; l'attrito *dinamico* dalla forza necessaria per mantenere costante la velocità durante il moto.

Aumentando la pressione tra i due corpi in contatto, aumenta in proporzione la forza d'attrito; e chiamasi appunto *coefficiente d'attrito* il rapporto costante tra la forza d'attrito e la forza premente. Quando si dice, per es., che il coefficiente di attrito di una vettura su una via ferrata è $\frac{13}{1000}$, ciò significa che per ogni 1000 Kg. di peso da trascinare occorre una forza di 13 Kg.

Il coefficiente di attrito non dipende dall'estensione della superficie di contatto a parità di forza premente *totale*; e infine esso è sensibilmente costante a tutte le velocità. Però l'attrito statico è alquanto superiore a quello dinamico; si richiede perciò uno sforzo maggiore nella messa in moto (*sforzo di smarramento o di avviamento*).

Le stesse leggi valgono per un corpo che rotola su un altro; l'attrito si chiama allora *volvente*, mentre si chiama *radente* quello di strisciamento tra due corpi.

L'attrito volvente è minore se il corpo rotolante ha un maggior diametro; esso è poi sempre minore, a parità delle altre condizioni, dell'attrito radente; cosicchè quando per mezzo dei *freni* si impedisce alle ruote dei veicoli di girare, l'attrito aumenta moltissimo e il moto diviene più difficile. È perciò che i freni arrestano rapidamente il moto, dopo la soppressione della forza motrice.

Quando la forza propulsiva è applicata alle ruote, come nelle locomotive, nelle vetture elettriche, negli automobili, nelle biciclette, senza l'attrito le ruote striscerebbero sulla linea o sul terreno, e il veicolo non procederebbe. Si richiede in tali casi che l'*aderenza* della ruota alla strada impedisca lo *slittamento;* si ottiene questo risultato aumentando convenientemente il peso totale del veicolo, e in generale con tutte le altre cause che aumentano il coefficiente di attrito.

Se l'attrito mancasse, la vita comune riuscirebbe impossibile, come si riconosce subito con un esame molto facile, divertente e inesauribile delle conseguenze.

Altre resistenze al moto sono offerte dai fluidi, comunemente l'aria, che avvolgono i corpi in movimento. Tali resistenze obbediscono a leggi piuttosto complicate; esse dipendono dall'estensione e dalla forma superficiale del corpo, crescendo con la superficie medesima, e aumentano rapidamente con la velocità; cosicchè mentre quando questa è molto piccola la resistenza è proporzionale alla velocità, per valori maggiori di questa è proporzionale al loro quadrato, e per velocità molto grandi cresce ancora più rapidamente.

La resistenza dell'aria produce effetti molto notevoli nella caduta dei gravi e nel moto dei proiettili. A misura che aumenta la velocità di un corpo cadente, aumenta la resistenza offerta dell'aria, fino a che essa arriva a neutralizzare la forza di gravità, e il corpo continua a scendere con moto uniforme in equilibrio dinamico. Senza di ciò una palla di fucile lanciata in alto, e ricadente dopo aver raggiunta la massima altezza cui può spingerla la forza viva iniziale, toccherebbe il suolo con la stessa velocità con cui partì dalla bocca dell'arma, e produrrebbe quindi gli stessi effetti come un colpo esploso a bruciapelo. E così, senza la resistenza dell'aria che ne rallenta il moto, anche le gocce di pioggia riuscirebbero pericolose.

Sul movimento dei proiettili, a causa della loro enorme velocità, l'aria determina delle perturbazioni molto rilevanti. Di esse si occupa la *Balistica.*

54. In generale in tutti i meccanismi in moto il complesso delle resistenze passive aumenta con la velocità; cosicchè se all'inizio del moto il lavoro motore supera il lavoro resistente, l'eccesso convertendosi in forza viva fa crescere la velocità e con essa il lavoro perduto; si raggiunge presto

l'**equilibrio dinamico**, nel quale l'aumentato lavoro resistente eguaglia l'intero lavoro motore, e la velocità del meccanismo diviene costante. La inevitabile presenza delle resistenze d'attrito adunque fa sì che a una forza costante non corrisponde mai in pratica un moto uniformemente accelerato, ma si ottiene dopo un certo tempo un moto uniforme; questo fatto mascherò per molti secoli (fino a Leonardo da Vinci) il vero spirito della legge d'inerzia, poichè generò la falsa convinzione che per avere un moto uniforme è necessario l'intervento di una forza costante, senza la quale la materia tenderebbe a restare in quiete.

Quando le forze motrici son debolissime, e son perciò presto eguagliate dalle forze d'attrito, l'equilibrio dinamico può esser raggiunto per velocità molto piccole. Così delle particelle minutissime, più pesanti dell'aria, possono apparentemente rimaner sospese in essa, mentre in realtà cadono lentissimamente; ne è un esempio la nebbia. Il Fisico inglese Stokes dedusse una formola la quale permette di determinare le dimensioni delle particelle sospese, conoscendosi la velocità, piccolissima, della loro caduta. Questo calcolo, come vedremo, ha acquistato una certa importanza nelle moderne ricerche sui fenomeni elettrici.

55. **Energia. Sue diverse forme. —** Abbiamo visto che una massa in moto possiede l'attitudine a eseguire lavoro perdendo la sua velocità. Una tale attitudine può anche esser posseduta da un corpo in quiete per virtù della sua *forma* o della sua *posizione.* Così una molla compressa può eseguire lavoro nel distendersi; un grave situato a una certa altezza dal suolo può anch'esso nella discesa vincere delle resistenze.

Chiamando *energia* l'attitudine di un corpo a eseguire lavoro, noi possiamo dire perciò che un corpo in moto, una molla compressa, un grave sollevato dal suolo possiedono energia; più precisamente si designa col nome di energia *cinetica* o *attuale* quella dei corpi in moto, e con quello di energia *statica*, o *potenziale*, quella posseduta dai corpi per virtù della loro forma o della loro posizione.

Le due energie posson trasformarsi l'una nell'altra. Così un pendolo ha energia cinetica quando passa per la posizione di riposo, la perde quando raggiunge il massimo spostamento, ma allora ha, rispetto alla posizione di riposo, una certa energia di posizione. Nei punti intermedi possiede insieme energia cinetica di posizione. Si dimostra però in Meccanica che in qualunque punto la somma delle due energie è costante; che cioè, passando da una posizione a un'altra, di tanto si accresce l'una di quanto diminuisce l'altra, come se fosse avvenuta una trasformazione integrale della seconda nella prima o viceversa. Lo stesso può dirsi di un corpo che cade liberamente nel vuoto: l'energia potenziale posseduta alla massima altezza va diminuendo, mentre il corpo va acquistando energia cinetica; e quando il corpo raggiunge il suolo l'energia potenziale si è trasformata integralmente in energia cinetica. Infatti se P è il peso del corpo, e h l'altezza iniziale, l'energia potenziale, che è eguale al lavoro che può eseguire il corpo nella discesa, sarà data da $P \times h$; ma si ha

$$P = Mg \qquad (2)$$

essendo M la massa del corpo e g l'accelerazione della gravità; e inoltre se il corpo impiega t secondi a cadere, la velocità finale sarà

$$v = gt \qquad (3)$$

e sarà ancora

$$h = \frac{1}{2} gt^2 \qquad (4)$$

Moltiplicando membro a membro la (2) e la (4) sarà

$$Ph = \frac{1}{2} Mg^2 t^2$$

e tenendo presente la (3)

$$Ph = \frac{1}{2}Mv^2$$

perciò l'energia potenziale primitiva si è trasformata integralmente nella forza viva finale $\frac{1}{2}Mv^2$, cioè nell'energia cinetica.

Se si procede a un calcolo analogo per le posizioni intermedie, si può constatare che è costante la somma delle due energie.

Tutto ciò presuppone però che il grave sia lasciato libero nella sua caduta, non esistano cioè altre forze che eseguano sul corpo un lavoro motore o resistente; che se intervenisse, per esempio, un ostacolo come l'attrito, allora l'energia potenziale andrebbe scomparendo nella caduta senza un aumento eguale della forza viva, poichè parte del lavoro motore andrebbe impiegato a vincere il lavoro delle nuove resistenze introdotte.

Escludiamo, per il momento, queste resistenze parassite del moto; e, mentre un grave poggia sul suolo, impieghiamo un certo lavoro *muscolare* per sollevarlo a una certa altezza. Il lavoro da noi eseguito resterà immagazzinato nel corpo come energia di posizione; se adesso si lascia cadere il corpo, lo stesso lavoro si ritroverà sotto forma di energia cinetica: se il corpo battendo sul suolo potesse invertire il senso del moto conservando la velocità (come avverebbe di un corpo perfettamente elastico urtante contro un piano ugualmente elastico) esso risalirebbe all'altezza di prima, riprenderebbe cioè la stessa energia di posizione. In ogni caso adunque il lavoro iniziale da noi eseguito non andrebbe perduto, ma si ritroverebbe in qualunque istante sotto forma di energia cinetica e potenziale del corpo.

Che se il corpo nel suo movimento incontrasse non attrito, ma per esempio una molla deformabile, il nostro lavoro non sarebbe neanche perduto, ma si trasformerebbe in energia potenziale della molla deformata; questa ci restituirà, nel distendersi, il lavoro assorbito. Avremmo così una serie indefinita, molteplice di scambi che lascerebbe inalterato il lavoro primitivo da noi compiuto.

A questa descrizione di fenomeni ideali non corrisponde per nulla la realtà, poichè la presenza delle resistenze passive, e la mancanza di corpi perfettamente elastici fan progressivamente diminuire l'ammontare iniziale dell'energia disponibile, e alla fine di un certo tempo più o meno lungo noi troveremo che il lavoro primitivo è sparito, poichè avremo il corpo al suolo, in quiete, e la molla indeformata; non ritroveremo più, cioè, nè energia di posizione nè energia cinetica.

Un esame più attento dello stato delle cose ci persuaderà però che se dell'energia è sparita, qualche altra cosa è comparsa. In tutti i casi, invero, in cui del lavoro sparisce per causa di attriti o di imperfezioni elastiche dei corpi, si trova che in essi si è sviluppato *calore.* Noi studieremo più attentamente in seguito questo fenomeno: per ora ci basti dire che il calore prodotto è in misura del lavoro sparito. E siccome in altri casi del calore può sparire, mentre del lavoro si manifesta, e si trova la stessa corrispondenza numerica tra il calore sparito e il lavoro prodotto, noi possiamo far rientrare i fenomeni reali nella descrizione ideale surriferita, nella quale c'era conservazione del lavoro primitivo disponibile, purchè alle forme menzionate di energia se ne aggiunga una nuova, l'*energia termica,* suscettibile di trasformazioni reciproche con l'*energia meccanica.*. È chiaro allora, nell'esempio di sopra, che il lavoro muscolare da noi impiegato non è andato perduto, ma si è trasformato in una quantità equivalente di energia termica.

Stabilito che il calore può trasformarsi in lavoro, e viceversa, è chiaro che tutte le *sorgenti di calore* possono in fondo dare lavoro, possiedono cioè energia. Se, per esempio, si considerano le reazioni chimiche capaci di sviluppare calore, noi potremo ritenere che i corpi reagenti possiedono un'energia reattiva, o *energia chimica,* che si trasforma in energia termica all'atto della reazione.

Con dei criteri analoghi si sono riconosciute altre forme di energia, tutte trasformabili l'una nell'altra; noi possiamo riferire, in aggiunta alle altre sopramenzionate, l'energia sonora (che è una specie di energia cinetica), l'energia luminosa e specialmente l'energia elettrica che tanta importanza ha acquistato negli ultimi tempi, e che costituisce, come vedremo, la forma più adatta alle trasformazioni.

56. **Conservazione dell'energia**. — Abbiamo visto nell'esempio di sopra che, tenendo conto anche dell'energia termica, il lavoro impiegato per sollevare un grave non è perduto, ma si ritrova integralmente, in un istante qualsiasi, sotto forma di energia potenziale, cinetica e termica. Se il sollevamento iniziale del grave fosse dovuto, per esempio, alla distensione di una molla, questa perderebbe dell'energia potenziale, che passerebbe definitivamente al sistema costituito dal grave e dalla Terra. Adunque di questi due sistemi in presenza, la molla compressa, e il gruppo grave-Terra, l'uno perderebbe energia l'altro ne guadagnerebbe una quantità eguale. Se adesso noi consideriamo il sistema complessivo risultante dalla molla, dal grave e dalla Terra, potremo dire che la somma delle energie posseduta dalle varie parti rimane costante.

Questo risultato può essere esteso ai fenomeni più complicati e ai sistemi più complessi, purchè si tenga conto di tutte le forme note dell'energia. Quando *due* sistemi sono in presenza, l'uno può cedere energia all'altro, e inoltre in ciascuno l'energia posseduta può assumere le forme più svariate. Ma in ogni istante la somma delle energie perduta dall'uno è eguale a quella guadagnata dall'altro; cosicchè se i due sistemi si considerano uniti in un sistema unico, la somma totale delle varie energie possedute in ogni istante conserva un valore invariato.

Che se noi ci riferiamo a un sistema così vasto che nulla esista al di fuori di esso, ci riferiamo cioè all'intero Universo, potremo dire che *nell'Universo posson variare le energie delle varie forme localizzate nelle diverse parti, ma ne è costante la somma totale.* È questo il celebre *principio della conservazione dell'energia* che domina tutta la scienza contemporanea, e costituisce la conquista più poderosa e feconda dello spirito umano. Non si sottraggono ad esso neppure le forze vitali, in quanto posson dar luogo a trasformazioni di energia suscettibili di misura; e così il lavoro muscolare e il calore animale rappresentano una trasformazione, numericamente equivalente, dell'energia chimica posseduta dagli alimenti ingeriti.

Nessun fenomeno è stato finora scoperto in contradizione col principio medesimo; e gli Uomini di Scienza son così profondamente convinti della sua illimitata validità, che a ogni apparente eccezione son piuttosto disposti a pensare a qualche forma di energia per il momento ignota, che sia capace di ristabilire il compenso. Così dopo la scoperta del *radio* che è capace di creare indefinitamente calore, e quindi energia, senza che si possa constatare la diminuzione equivalente di altre energie già possedute, si è pensato alla possibilità che il calore sviluppato sia dovuto alla trasformazione continua dell'atomo di quella sostanza, con la conseguente perdita di una provvista enorme di *energia interatomica.* E appunto di queste trasformazioni interatomiche si sono avute più tardi, per altra via, delle prove molto persuasive, confermandosi così che la fede nell'incrollabilità del principio era ben fondata.

ELASTICITÀ DEI SOLIDI.

57. **Elasticità di volume**. — Applichiamo una forza costante in tutti i punti di un corpo, perpendicolarmente alla sua superficie. Se il corpo è *isotropo,* cioè ha eguali proprietà in tutte le direzioni, esso diminuirà di volume conservando la stessa forma di prima. La diminuzione di volume è proporzionale alla forza esercitata, e cambia da corpo a corpo. Chiamasi *coefficiente di compressibilità* la diminuzione subita da ogni centimetro cubo del corpo per effetto di una forza superficiale corrispondente ad una dine per ogni centimetro quadrato. I valori del coefficiente di compressibilità così definito sono molto piccoli; in pratica si sogliono anche riferire all'effetto prodotto da 1 Kg. per cm^2.

58. **Elasticità di forma**. — I corpi possono essere deformati per *trazione,* per *compressione,* per *flessione* e per *torsione.* In tutti i casi, finchè non si oltrepassino certi limiti mutevoli da corpo a corpo, la deformazione risulta sensibilmente proporzionale alla forza che l'ha prodotta.

La trazione può essere provocata sospendendo un filo o una sbarra verticalmente a un estremo, e applicando all'altro estremo dei pesi. L'allungamento ottenuto è proporzionale alla lunghezza primitiva del corpo, al peso traente e inversamente proporzionale alla sezione.

La compressione non può esser esercitata su fili ma su sbarre cilindriche o prismatiche, prendendo cura di evitare il loro incurvamento. Lo stesso peso agendo nei due sensi, cioè producendo allungamento o compressione della medesima sbarra, determina eguali variazioni di lunghezza.

Chiamasi *coefficiente di allungamento* l'aumento di lunghezza di ciascun centimetro di un filo di 1 mm^2 di sezione sotto l'azione di 1 Kilogrammo-peso. Indicandolo con λ, il numero inverso $\frac{1}{\lambda}$ dicesi *modulo d'elasticità* della sostanza da cui il corpo è costituito. Così il vetro ha il coefficiente d'allungamento $\frac{1}{7000}$ e il modulo d'elasticità 7000. Ciò significa che un filo di vetro della sezione di 1 mm^2 si allunga, sotto l'azione di 1 Kg., di $\frac{1}{7000}$ di centimetro per ogni centimetro della sua lunghezza iniziale.

La *flessione* di una sbarra è proporzionale al quadrato della sua lunghezza, e inversamente proporzionale alla larghezza e al cubo dello spessore. In conseguenza si richiede uno sforzo minore per inflettere egualmente una lamina a sezione rettangolare nel senso in cui è minore lo spessore.

Per lo studio della *torsione* di una sbarra cilindrica basta fissarla a un estremo e applicare all'altro una carrucola sulla gola della quale è avvolto un filo destinato a esercitare lo sforzo deformatore. L'effetto dipenderà dal *momento* della forza torcente e quindi dal prodotto della forza applicata per il raggio della carrucola. L'angolo di torsione è proporzionale al momento suddetto, alla lunghezza della sbarra, e inversamente proporzionale alla quarta potenza del raggio della sbarra.

Se si tratta di un filo sottile, converrà disporlo verticalmente e tenderlo alquanto con un peso. In ogni caso occorrerà evitare, con opportune disposizioni, che la sbarra o il filo si inflettano, oltre che torcersi, sotto l'azione della forza deformatrice.

59. **Conseguenze della legge di proporzionalità tra la forza e le deformazioni. —** Abbiamo visto, trattando la teoria del pendolo semplice, che un moto analogo a quello del pendolo, cioè un moto oscillatorio, si ottiene tutte le volte che un corpo è sollecitato verso una posizione di riposo con una forza proporzionale all'allontanamento dalla posizione medesima.

Or quando un corpo elastico è deformato, le sue parti tendono a ritornare alla configurazione normale per l'azione delle forze elastiche, che sono appunto, per deformazioni non troppo grandi, proporzionali alle deformazioni. E siccome le parti medesime son dotate d'inerzia, raggiungeranno, per una brusca soppressione della forza deformatrice, la posizione di riposo con una certa velocità e l'oltrepasseranno, ottenendosi con ciò una deformazione inversa. Si avranno così delle oscillazioni di forma da parte del corpo intorno alla forma normale, e queste oscillazioni saranno *isocrone,* cioè avranno una durata indipendente dalla deformazione iniziale, finchè questa non è troppo grande.

Queste oscillazioni sono in generale molto rapide, poichè grandi sono le forze motrici e piccole le masse in movimento; vedremo appunto che a tali oscillazioni son dovuti i *fenomeni sonori.* Ma si possono rallentare le oscillazioni, e renderle utilizzabili praticamente, fissando al corpo oscillante delle grandi masse, obbligate così a partecipare al movimento, e aventi per effetto di renderlo più o meno lento.

Così all'estremo di un filo metallico, sospeso all'altro estremo, può esser fissata una sfera che prenderà parte alle oscillazioni di torsione rese con ciò molto lente; e si può controllare in tal modo che la durata delle oscillazioni è sensibilmente costante qualunque sia l'ampiezza iniziale. Un simile sistema non dà luogo a oscillazioni che durino indefinitamente; esse si smorzano invece, più o meno lentamente, come quelle di un pendolo comune non munito di meccanismo vivificatore; e la causa dello smorzamento non è da attribuire soltanto all'attrito dell'aria, ma vi contribuiscono delle azioni interne nel corpo elastico, assimilabili a un *attrito interno* tra le sue particelle che si muovono le une rispetto alle altre. Almeno così si ritenne finchè il Prof. Cantone non ebbe a dare la vera spiegazione di questo cosidetto *attrito interno,* fondandola sui fenomeni di *isteresi elastica* da lui a lungo studiati.

60. **Elasticità susseguente. Isteresi**. — In realtà i fenomeni non procedono così semplicemente come noi li abbiamo descritto finora. Anzitutto le deformazioni non sono esattamente proporzionali alla forza deformatrice, anche se son molto piccole; inoltre l'azione della forza lascia una piccola *traccia* nel corpo, cioè una deformazione permanente che non si elimina sopprimendo la forza: se perciò il corpo è sottoposto a una serie di forze crescenti prima, e decrescenti poi, la forma del corpo dipende non solo dalla forza attuale, ma dalla serie di forze a cui fu precedentemente sottoposto.

Questo fenomeno ebbe il nome di *isteresi elastica* ed è stato sottoposto ad accurata indagine sperimentale dal Cantone che ne ha dato le leggi e ne ha dedotto la spiegazione dell'attrito interno e quindi dello smorzamento delle oscillazioni elastiche.

In generale questi fenomeni sono più accentuati nei metalli *ricotti,* sottoposti cioè a un riscaldamento, e poscia a un raffreddamento lentissimo; invece i corpi si avvicinano alle condizioni elastiche ideali per il *rincrudimento* dovuto alla lavorazione, al passaggio alla filiera ecc.; e meglio ancora per la *tempera,* consistente nel riscaldamento a temperatura elevata seguito da un brusco raffreddamento. Una grande influenza ha anche la natura del metallo, poichè alcuni si approssimano abbastanza alle condizioni ideali, come l'acciaio temperato, e altri se ne allontanano fino a presentare una specie di *pastosità,* come il piombo.

61. **Tenacità, durezza, ecc**. — Quando le deformazioni superano un certo limite, le forze di coesione vengono definitivamente superate e il corpo si rompe. Si chiama appunto *coefficiente di rottura* di una sostanza il peso necessario per rompere un filo avente la sezione di 1 mm^2. I corpi che hanno un grande coefficiente di rottura si dicono dotati di una grande *tenacità.* Ha grande influenza in questi fenomeni il modo d'azione, più o meno improvviso, della forza, e l'essere o no il corpo sottoposto a tremiti o ad altre perturbazioni; di tutto ciò si deve tener conto nel calcolo della resistenza dei materiali da costruzione.

Non è da confondere poi con la tenacità la *durezza,* che è la resistenza opposta dai corpi alla scalfittura con arnesi appuntiti, e che può essere, come nel diamante, accompagnata dalla *fragilità,* per cui taluni corpi vanno in pezzi sotto l'azione di piccole forze deformatrici. Si chiamano poi corpi *duttili* quelli che, come il platino si lasciano tirare in fili molto sottili, e *malleabili* quelli che si lasciano distendere, come l'oro, in foglioline di piccolissimo spessore.

Molti corpi infine, sotto l'azione di uno sforzo debole ma di lunga durata, subiscono deformazioni rilevanti. Così la ceralacca, che ha una certa fragilità, si inflette notevolmente se è tenuta per lungo tempo sospesa agli estremi; la pece in pezzi, tenuta in un recipiente forato, si salda a lungo andare in unica massa, che vien fuori a grosse gocce dai fori. Un comportamento analogo presentano anche i metalli comuni quando son sottoposti a enormi pressioni su tutta la superficie esterna; e ciò costituisce come uno stato di transizione tra lo stato solido e lo stato liquido, qual'è offerto del resto in condizioni normali dai corpi pastosi e vischiosi, es. la cera in vicinanza del punto di fusione, il miele, gli sciroppi molto densi, che non si saprebbe decisamente classificare nè come solidi nè come liquidi.

MECCANICA DEI LIQUIDI

62. **Proprietà dei liquidi. Compressibilità.** — I corpi liquidi sono caratterizzati da una mobilità grande delle singole parti per cui essi non tendono ad avere una forma propria, ma assumono quella del recipiente che li contiene. Hanno invece un volume proprio, e si oppongono anzi energicamente contro le forze che tendono a diminuirlo, cosicchè si potè ritenere, per qualche tempo, che essi fossero addirittura *incompressibili.* In realtà la loro comprimibilità è così piccola da sfuggire

all’osservazione, non ricorrendo a cautele particolari; l’osservazione è resa malsicura e difficile dal fatto che il recipiente, in cui il liquido è contenuto, prende parte alla deformazione, e occorre separare dall’effetto totale la variazione di volume propria del primo. Serve a tal uopo il *piezometro* (fig. 35) nel quale l’ampolla A, contenente il liquido da esaminare e costituita di vetro non troppo spesso, è immersa in un recipiente più grande B pieno d’acqua e comunicante col cannello sottile G; anche l’ampolla A finisce in un cannello C uguale di diametro a G, e attraverso al quale può esercitarsi, per mezzo di un gas compresso, una pressione sulla superficie libera visibile nel cannello medesimo. In conseguenza di questa pressione il livello del liquido scende in C; ma per la contemporanea dilatazione del recipiente A, una certa quantità di acqua del recipiente viene B spinta nel cannello G; lo spostamento in C è maggiore dell’inalzamento in G, il che prova che il liquido di A ha veramente subito una diminuzione di volume, misurata dalla differenza delle due colonne liquide. I livelli riprendono esattamente la posizione di prima al cessare della pressione, dimostrando così che i liquidi non soffrono variazioni di volume permanenti.

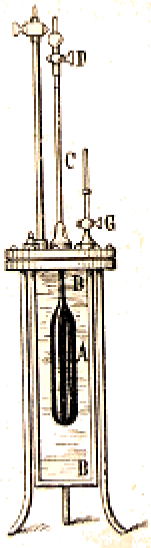


Fig. 35.

63. **Principio di Pascal. Pressione in un liquido.** — Immaginiamo un liquido chiuso in un vaso indeformabile (fig. 36), che comprende un cilindro nel quale è mobile uno stantuffo S. Esercitando su S una forza F, essa determinerà una piccola diminuzione di volume e quindi un piccolo spostamento in basso dello stantuffo, fino a che la reazione del liquido, costretto in minor volume, non equilibri la tendenza dello stantuffo a discendere.

La compressione del liquido cesserebbe di esistere se la parete del vaso, cedendo in un punto, gli consentisse di riprendere il volume di prima; ed è chiaro che il liquido, nella sua tendenza a riprendere il volume di prima, eserciterà uno sforzo contro l’ostacolo costituito dalla rigidità delle pareti *in tutti i punti* del vaso. Il risultato sarà una pressione in tutta la superficie interna del recipiente, per cui ciascun centimetro quadrato di essa verrà spinto normalmente al piano tangente, con una forza eguale in tutti i punti. È questo il *principio di Pascal,* secondo il quale *la pressione*

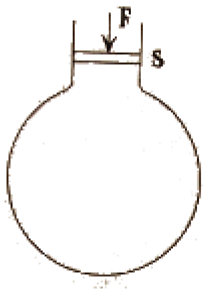


Fig. 36.

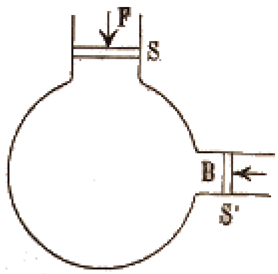


Fig. 37.

esercitata in un punto di un liquido si trasmette egualmente in tutte le direzioni.

Se, perciò, nel recipiente di sopra si pratica un’apertura B (figura 37) e vi si innesta un secondo cilindro munito di stantuffo S', per impedire il moto in fuori di S' occorrerà applicare una forza F che dovrà essere eguale ad F se i due stantuffi S ed S' hanno la medesima area. In tal caso è indifferente dire che su S' il liquido trasmette la forza F esercitata in S, o che su S si trasmette la forza F' esercitata in S'. Sarà meglio dire che la forza F, la forza F' e tutte le altre analoghe destate nel recipiente, (che risulterà sempre un po’ deformato), determinano nel liquido una diminuzione di volume, e un conseguente stato particolare per cui si dice che il liquido è *in pressione,* con l’effetto di esercitare una forza F su ciascuna superficie S mobile o fissa della parete. È chiaro allora che se l’orifizio B, e il corrispondente stantuffo avesse un area doppia di S, il liquido vi eserciterebbe una forza doppia, o ciò che è lo stesso, una forza doppia 2F si dovrebbe esercitare dall’esterno per tenere a posto lo stantuffo.

Ne risulta una conseguenza fondamentale. Per precisare lo stato di compressione interna del liquido, non basta assegnare la forza F che grava su uno stantuffo, ma occorre conoscere anche la superficie di questo; in altri termini lo stesso stato di compressione può esser prodotto da una forza

F sullo stantuffo di area S, o da una forza 2F su uno stantuffo di area 2S. Ciò che precisa lo stato del liquido è la forza esercitata su un'area conosciuta, per es. su un cm^2; a questa nuova grandezza fisica, la forza esercitata sull'unità di superficie, che caratterizza lo stato del liquido, daremo il nome di *pressione* del liquido.

Il valore così definito della pressione caratterizza lo stato del liquido, eguale in tutti i suoi punti. Ciò importa che se perforando il recipiente, (fig. 38), si introduce fino in B un piccolo canale cilindrico di 1 cm^2 e munito di stantuffo, si eserciterà su questo la stessa forza qualunque sia il punto B, e qualunque sia l'*orientazione* dello stantuffo medesimo. Chiamiamo la forza così ottenuta sullo stantuffo di 1 cm^2 sprofondato fino in B *pressione del liquido nel punto B.* Il risultato precedente ci dice che il liquido ha la stessa pressione in tutti i punti che se invece la pressione così definita risultasse diversa nei diversi punti, si constaterebbe un movimento permanente del liquido dai punti dove la pressione è maggiore verso quelli dove essa è minore. Questo avviene, per esempio, in una condotta d'acqua nella quale il liquido si trovi in movimento dall'uno all'altro estremo. Un canale munito di un piccolo stantuffo insinuato nel tubo ai due estremi rivelerebbe che la pressione è diversa e precisamente è maggiore nel posto da cui l'acqua viene ed è minore in quello in cui va. La differenza di pressione permane finchè permane il movimento e può considerarsi insieme come causa del movimento, e mezzo per constatarlo.

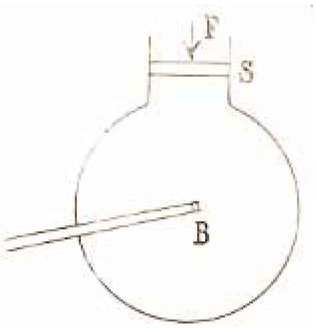


Fig. 38.

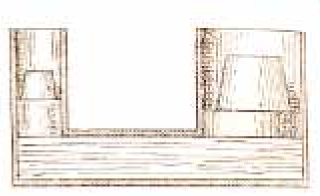


Fig. 39.

Abbiamo visto che la stessa *pressione* in un liquido può esser determinata con una grande forza agente su uno stantuffo di grande superficie o con una piccola forza agente su una piccola superficie, e che perciò se una piccola forza si esercita su uno stantuffo di piccola superficie essa si trasmetterà su uno di grande superficie amplificata secondo il rapporto delle aree (fig. 39).

Su questo principio è fondato il **torchio idraulico.** L'acqua aspirata da un serbatoio viene spinta per mezzo di un piccolo stantuffo in un grande cilindro ove solleva uno stantuffo più largo e una piattaforma con una forza cento, mille volte maggiore, se la superficie del secondo è cento, mille volte più estesa di quella del primo.

64. **Superficie libera di un liquido —** È la superficie che separa il liquido dal gas, per esempio l'aria, che riempie il resto del vaso. Essa quando il liquido è in equilibrio deve essere in ogni punto *normale* alla risultante delle forze esercitate in quel punto, poichè solo così il liquido, per la sua non indefinita compressibilità, può opporsi al moto delle particelle direttamente sollecitate dalla forza: mentre se quella risultante avesse una componente nel senso tangenziale, la mobilità delle particelle consentirebbe a queste di muoversi in quel senso, e l'equilibrio non sussisterebbe.

Se la forza agente è la gravità, la superficie libera dev'essere in ogni punto normale alla direzione verticale e quindi in ogni punto *orizzontale.* Se la superficie è di piccola estensione, essa avrà praticamente la forma di un piano orizzontale, e può quindi servire, come il filo a piombo, per determinare la direzione della gravità, che è a quel piano normale.

65. **Liquidi pesanti, pressione sul fondo**. — Fin qui noi abbiamo supposto che i liquidi siano soltanto sottoposti a forze superficiali, come le pressioni esercitabili con uno stantuffo. In realtà i liquidi, alla superficie terrestre, sono sempre soggetti a una forza di massa, la gravità, che agisce su tutte le molecole. È necessario quindi studiarne gli effetti.

Noi abbiamo già nel precedente paragrafo riferita una di queste conseguenze, che cioè i liquidi in equilibrio, se sottoposti alla sola forza di gravità, hanno una superficie libera piana e orizzontale.

Un altro effetto molto importante è questo: nel liquido in equilibrio si determina una pressione variabile in strati situati a diversa profondità. Immaginiamo invero un liquido pesante, in equilibrio entro un vaso cilindrico, diviso in tanti straterelli orizzontali. Il primo grava sul secondo; questo trasmette sul terzo il peso del primo, accresciuto del proprio, e così ogni strato esercita sul successivo una forza eguale al peso degli strati precedenti più il proprio. Le condizioni del liquido in ogni strato saranno quindi quelle che si otterrebbero se si sopprimesse il liquido soprastante e gli si sostituisse uno stantuffo premuto da una forza eguale al peso del liquido soppresso. Adunque, poichè il vaso è di forma cilindrica, la pressione in uno strato orizzontale qualsiasi è data dal peso di una colonna liquida cilindrica avente per altezza la distanza tra lo strato medesimo e la superficie libera. La forza gravante su una superficie s sarà perciò il peso $s \times a \times p$ di una colonna liquida avente il volume $s \times a$, (dove a rappresenta la distanza suddetta), e il peso p per ogni unità di volume, dipendente dalla natura del liquido *(peso specifico* di esso liquido). *La pressione* che ivi si esercita, che è la forza gravante sull'unità di superficie; sarà $a \times p$, cioè il prodotto della profondità dello strato per il peso specifico del liquido. Un'eguale pressione, per il principio di Pascal, si esercita sui punti della parete del vaso in contatto con lo strato.

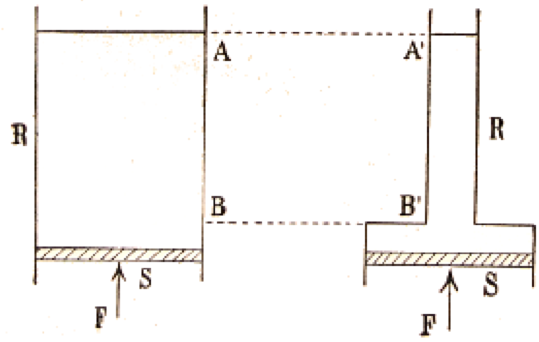


Fig. 40.

Lo stesso risultato vale se la forma del vaso non è cilindrica. Consideriamo, per es., i due recipienti della fig. 40, nei quali il fondo è sostituito da uno stantuffo mobile, tenuto a posto, contro l'effetto dovuto alla pressione di gravità del liquido, da una forza F agente verso l'alto; e supponiamo che il liquido giunga in entrambi alla stessa altezza, contata dal fondo, e che i due stantuffi abbiano eguale superficie.

Il peso effettivo delle colonne AB, A'B' nei due recipienti è notevolmente diverso; ma nel trasmettersi agli stantuffi S, il primo resta inalterato — il secondo si amplifica, per il principio del torchio idraulico, nel rapporto della superficie S alla base della colonna A'B'. Se perciò la base di A'B' è 1/10 di quella di AB, il peso della colonna A'B' sarà pure 1/10, ma si trasmetterà *decuplato* sullo stantuffo S, e produrrà così lo stesso effetto della colonna AB. Quindi le forze F da applicare sui due stantuffi-base saranno le stesse. Questo risultato, detto *paradosso idrostatico,* è verificabile con l'esperienza, per mezzo di diversi recipienti di forma diversa, ma aventi lo stesso fondo mobile, e tenuto a posto da forze misurabili.

Se invece il fondo è attaccato al recipiente, e noi disponiamo *tutto* il recipiente sul piatto di una bilancia, troveremo un peso minore col recipiente R'; e ciò perchè il peso del liquido contenuto in un vaso non coincide con la pressione sul fondo, ma è la risultante di *tutte* le pressioni esercitate sulle pareti *rigidamente* connesse. Ed è facile riconoscere che nel recipiente R' sul tratto di parete che unisce il cilindro A'B' con l'altro più largo, il liquido esercita delle pressioni verso l'alto che compensano la grande forza esercitata sul fondo S.

In seno a un liquido soggetto alla gravità la pressione definita come al paragrafo 62 risulta diversa in strati a diversa altezza ed eguale, in tutti i punti di uno stesso strato orizzontale, al prodotto della sua profondità per il peso specifico del liquido. Questo non contraddice alla legge enunciata che in un liquido in equilibrio la pressione deve esser la stessa in *tutti* i punti, e che senza di ciò si ha un *moto continuo* del liquido dai punti di maggiore a quelli di minore pressione; poichè i punti aventi pressioni diverse sono a diversa altezza, e perchè il liquido possa spostarsi nel senso suddetto dovrebbe vincere il suo peso che tende a portarlo in basso. — Questa tendenza è appunto controbilanciata dalla differenza di pressione, cosicchè ogni particella è in realtà sottoposta a una forza nulla.

66. **Pressioni sulle pareti.** — La stessa pressione esercitantesi per la gravità su uno strato orizzontale si determina, come abbiamo detto, sulle pareti nella regione in cui esso la incontra. Tutta la parete risente quindi una pressione crescente con la profondità e diretta normalmente ad essa. Così se pratichiamo nel vaso della fig. 41 un'apertura in A, e vi disponiamo uno stantuffo mobile, per tenerlo a posto occorrerà una forza *f* eguale al peso di una colonna liquida che ha per base l'area dello stantuffo e per altezza la sua distanza verticale dalla superficie libera. In generale i recipienti hanno sufficiente rigidità per resistere a questa pressione laterale; ma un tubo di caoutchouc si sfianca facilmente se è riempito di un liquido pesante, come il mercurio, fino ad altezza notevole.

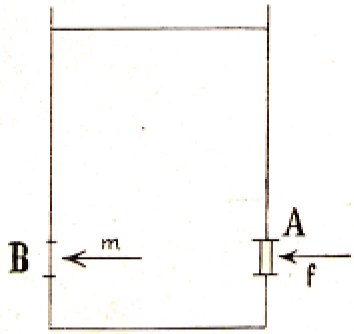


Fig. 41.

Movimenti d'insieme del vaso non posson aver luogo, poichè per ogni pezzetto di parete su cui si esercita una forza, ne esiste un altro contrapposto, e rigidamente connesso col primo, sul quale si esercita una forza eguale ed opposta. Sono in questa condizione, per es., gli elementi A e B delle pareti nella fig. 41.

Ma se, per un'apertura praticata in A, viene a mancare il pezzetto di parete su cui si esercita la pressione che controbilancia quella esercitata su B, il liquido sgorgherà dall'apertura, ma contemporaneamente sarà turbato l'equilibrio del vaso, che sarà totalmente sottoposto a una forza non compensata esercitantesi sull'elemento B. Se perciò il vaso è mobile nel senso orizzontale, esso si sposterà nel senso della freccia m.

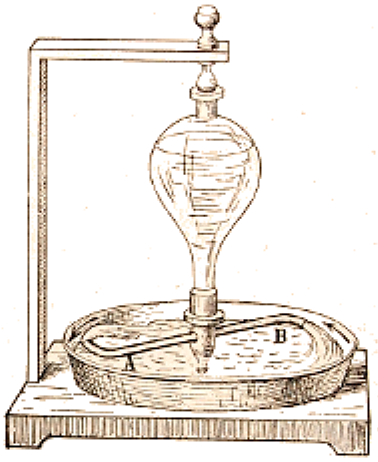


Fig. 42.

Un effetto di questo genere si ha nell'*arganetto idraulico* (fig. 42) che gira appunto nel senso opposto a quello in cui effluisce il liquido dalle aperture A e B; questo fenomeno viene utilizzato in grande nelle cosiddette *turbine* a *reazione.*

67. **Vasi comunicanti.** — Lo stesso liquido versato in due vasi comunicanti di qualsiasi forma, deve portarsi in tutti allo stesso livello, poichè solo così le pressioni in uno stesso piano orizzontale

possono avere lo stesso valore in tutti i rami che in fondo costituiscono un unico vaso. Sperimentalmente la cosa riesce provata dall'apparecchio della fig. 43.

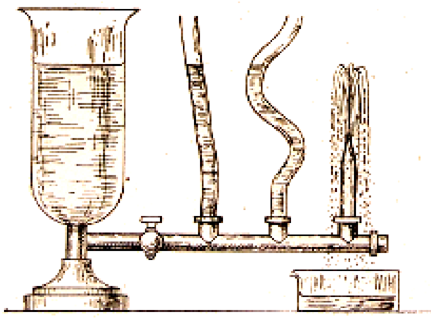


Fig. 43.

Che se in due vasi comunicanti come quelli della fig. 44 si dispongono due liquidi differenti, per esempio acqua e mercurio, non miscibili, le altezze AC, BD, contate dal piano orizzontale AB che passa per la superficie di separazione dei due liquidi, devono essere in ragione inversa delle rispettive densità. Infatti per avere la stessa pressione, dalle due parti, nel piano AB, dette a e a' le due altezze e p, p' i pesi specifici, dev'essere

$$a\,p = a'\,p'$$

cioè

$$a : a' = p' : p$$

Nel caso del mercurio e dell'acqua si avrà perciò

$$a : a' = 13{,}596$$

La teoria dei vasi comunicanti spiega il fenomeno dei *pozzi artesiani,* per il quale introducendo in certe pianure dei lunghi tubi nel suolo, fino a trovare delle falde d'acqua comprese fra strati impermeabili, e comunicanti con serbatoi naturali situati ad altezza maggiore, l'acqua vien fuori a getto dal tubo.

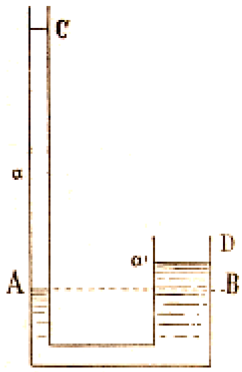


Fig. 44.

68. **Spinta dal basso in alto.** — Il tubo della *fig.* 45 porta un fondo mobile *ab,* costituito da un disco che può essere tenuto a posto da un filo. Immergendo il tubo col disco in un recipiente pieno d'acqua, il fondo aderisce fortemente all'orlo del tubo, poichè esercitandosi le pressioni in tutti i sensi, esso sarà spinto verso l'alto con una forza eguale al peso della colonna liquida capace di riempire il tubo fino al livello esterno. E difatti, riempiendo il tubo stesso con acqua fino a quel livello, il disco, sottoposto ora a due forze eguali e contrarie, si stacca e cade se è più pesante del liquido.

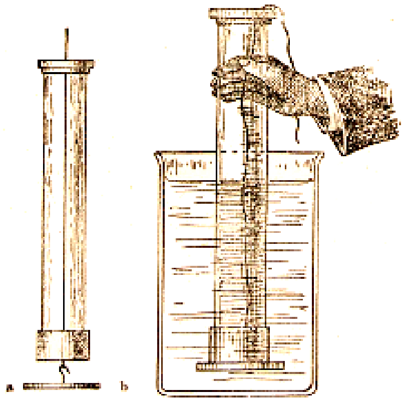


Fig. 45.

69. **Principio d'Archimede.** — Un corpo immerso in un liquido subisce una pressione in tutti i punti della sua superficie, pressione maggiore nei punti situati a maggiore profondità. Le forze esercitate sui vari punti non si compenseranno, ma daranno luogo a una risultante che si può dimostrare esser diretta verso l'alto, eguale in valore al peso del liquido spostato, ed applicata nel centro di gravità di quest'ultimo.

Per dimostrare questo celebre principio, dovuto ad Archimede, pensiamo a una superficie ideale che, come un velo, isoli una porzione di liquido contenuto in un recipiente. Dappoichè il liquido contenuto non discende malgrado il suo peso, ciò prova che l'insieme delle pressioni subite da parte del liquido circostante eguaglia il suo peso; naturalmente questa risultante delle pressioni conserverà lo stesso valore se al posto del liquido si sostituisce un corpo limitato dalla medesima superficie.

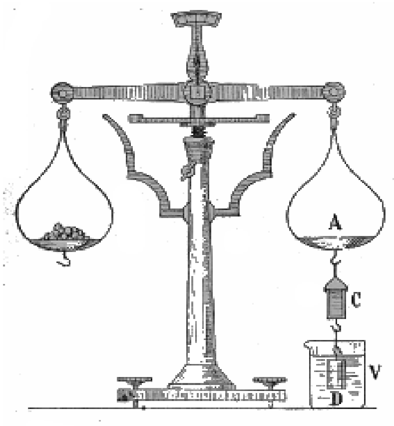


Fig. 46.

Il principio d'Archimede è suscettibile di verifica sperimentale per mezzo di un apparecchio detto *bilancia idrostatica* (fig. 46). A un piatto di questa si sospende un cilindro vuoto C, e sotto un cilindro massiccio D capace di occupare esattamente la capacità del primo; l'equilibrio della bilancia è ottenuto aggiungendo dei pesi qualsiasi nell'altro piattello. Se ora si fa pescare il cilindro pieno nell'acqua di un bicchiere, la bilancia traboccherà dalla parte dei pesi, e si potrà ristabilire l'equilibrio riempiendo di acqua il cilindro vuoto, il che prova che la spinta subita dal pieno è eguale al peso di un egual volume d'acqua.

70. **Galleggianti.** — Un corpo parzialmente o totalmente immerso è adunque soggetto a due forze: l'una è il proprio peso, ed è applicata nel centro di gravità del corpo, l'altra è la spinta, eguale al peso del liquido spostato e applicata nel centro di gravità di questo.

Se il peso supera la spinta il corpo andrà a fondo; se è eguale il corpo starà in equilibrio a qualunque altezza; se il peso è minore della spinta, il corpo emergerà parzialmente, fino a che il suo peso eguagli la spinta subita dalla sola parte immersa. Ma in quest'ultimo caso, se il corpo è omogeneo, il suo centro di gravità si troverà al di sopra del centro di spinta; ed è facile riconoscere che, in generale, l'equilibrio non sarà stabile. La stabilità sarà certo ottenuta con un corpo immerso eterogeneo avente in basso una notevole densità, tale che il suo centro di gravità sia al di sotto del centro di spinta. Così è stabile l'equilibrio di un tubo di vetro chiuso in basso e portante del mercurio. Ma anche quando il centro di spinta è al di sotto l'equilibrio può essere stabile, se alla declinazione del corpo corrisponde tale variazione di forma della parte immersa che la nuova spinta tenda a ricondurre il galleggiante nella posizione primitiva. Questo avviene, per la loro forma speciale, nei bastimenti.

Ma noi non possiamo addentrarci in simili particolari.

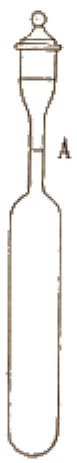


Fig. 47.

71. **Misura dei pesi specifici.** — Il peso specifico relativo di un corpo è il rapporto tra il peso del corpo e il peso di un eguale volume d'acqua; e siccome il rapporto tra questi due pesi è eguale al rapporto delle masse del corpo e dell'acqua, e la massa dell'acqua è praticamente misurata dallo stesso numero che ne misura il volume, in pratica il peso specifico relativo coincide con la densità definita come al § 42, cioè la massa contenuta nell'unità di volume del corpo.

La definizione data sopra conduce subito a un metodo semplice per determinare il peso specifico di un corpo solido.

Infatti dappoichè il peso di un egual volume d'acqua è dato, per il principio d'Archimede, dalla spinta che il corpo subisce nell'acqua, basterà pesare il corpo, misurare con la bilancia idrostatica la spinta che esso subisce nell'acqua, con l'aggiungere pesi sul piatto corrispondente fino a riottenere l'equilibrio dopo l'immersione: si otterrà, per quoziente dei due numeri, il peso specifico cercato.

Un metodo simile può essere adottato per misurare il peso specifico dei liquidi. Ma converrà in tal caso ricorrere al *metodo della boccetta* o del *picnometro.* Una ampolla di vetro (fig. 47) munita di un collo sottile, che si allarga poi in una specie d'imbuto chiuso da un tappo a smeriglio. Si pesa la boccetta vuota, e la si ripesa dopo averla riempita di liquido fino a un certo segno tracciato sul cannello; si deduce così, per differenza, il peso del liquido. Poscia la si riempie d'acqua fino allo stesso punto, e si ottiene, ancora per differenza con la prima pesata, il peso di un eguale volume d'acqua. Dividendo tra loro i due pesi si avrà il peso specifico del liquido.

Ancora più comodo è, per la misura del peso specifico dei liquidi, l'impiego degli *areometri* o *densimetri.* Sono essi degli apparecchi di vetro (fig. 48) aventi nel fondo una zavorra, come mercurio o pallini di piombo, destinata ad assicurarne la stabilità quando, immersi in un liquido, ne emergono parzialmente. Il cannello superiore porta una graduazione costruita in modo che per lettura diretta del punto di galleggiamento in un liquido si abbia il peso specifico di questo; naturalmente l'apparecchio emergerà di più nei liquidi aventi un peso specifico maggiore.

Alcuni di questi areometri hanno una graduazione empirica, anzichè la graduazione che dà direttamente la densità. Così ha una graduazione empirica l'areometro di Beaumè, le cui indicazioni permettono però, con l'impiego di tabelle apposite, di dedurre il valore della densità corrispondente.

Fig. 48.

FENOMENI CAPILLARI.

72. In conseguenza delle attrazioni tra le molecole di un liquido (coesione) e delle attrazioni tra quelle di un liquido e quelle di un solido che si toccano (adesione), si manifestano dei fenomeni, detti *capillari,* i quali costituiscono un'apparente eccezione alle leggi dell'idrostatica. Citeremo i principali:

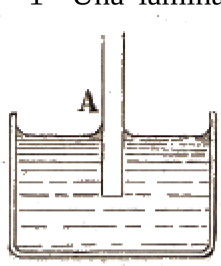


Fig. 49.

1° Una lamina di vetro ben pulita, immersa in un bicchiere d'acqua, solleva intorno a sè il liquido circostante (fig. 49) che non ha perciò nelle vicinanze del solido la superficie libera piana e orizzontale. Alla superficie libera curva che si determina in vicinanza della lamina si dà il nome di *menisco.* In questa esperienza ci si è serviti di acqua e vetro, cioè di un solido che è *bagnato* dal liquido; se si rifà l'esperienza con un solido non bagnato dal liquido, come avviene del vetro col mercurio, si constata che la superficie libera del liquido si *deprime* in vicinanza del solido, costituendo un *menisco convesso* (fig. 50).

2° Immergendo un cerchio di fil di ferro nell'acqua saponata, ed estraendolo con garbo, resta aderente al filo una intera pellicola liquida molto sottile che occupa tutta l'area abbracciata dal filo, e che ha tutte le proprietà di una lamina elastica tesa al contorno. Così essa si avvalla, assumendo la forma di una borsa, soffiandovi contro leggermente; e al cessare della forza deformatrice riprende subito la forma piana. Questa lamina, quindi, che resta aderente al contorno malgrado il suo peso, possiede una certa elasticità di forma.

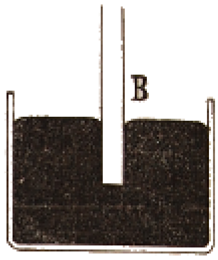


Fig. 50.

3° Una piccola goccia di mercurio, disposta su una lastra orizzontale di vetro, assume la forma sferica; e se è schiacciata da un corpo esterno riprende dopo l'allontanamento di questo la forma sferica — possiede cioè anch'essa elasticità di forma. — Invece una goccia d'acqua, versata sopra una lastra di vetro ben tersa, la ricopre per intero, distendendosi in una lamina molto sottile, e rimane aderente al vetro anche capovolgendo la lastra. Analogamente una bacchetta di vetro immersa nell'acqua si copre di un velo liquido, e una goccia del liquido resta aderente in basso malgrado il suo peso.

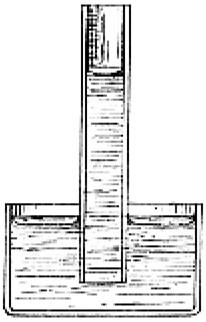


Fig. 51.

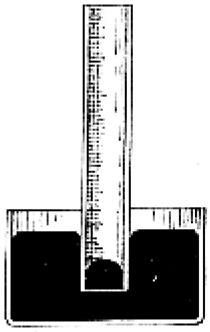


Fig. 52.

4° In un tubo di vetro sottile (fig. 51) immerso nell'acqua questa si porta a un livello più alto che all'esterno, e la superficie terminale assume una forma concava; lo stesso avviene con due tubi comunicanti di diametro molto diverso. Invece se il tubo è immerso nel mercurio (fig. 52), questo si porta più in basso nel tubo stretto, assumendo nella superficie terminale la forma convessa. Gl'innalzamenti o le depressioni nel tubo sottile o capillare sono inversamente proporzionali al diametro del tubo (*legge di Jurin*).

73. **Spiegazione dei fenomeni capillari.** — Si dimostra nei trattati di Fisica Superiore che la proprietà delle lamine liquide di comportarsi come lamine elastiche stirate, di possedere cioè una *tensione superficiale*, è una immediata conseguenza delle forze di coesione che si esercitano tra le molecole del liquido. Se poi le forze di adesione tra il liquido e il solido superano le forze di coesione del liquido, è chiaro che il liquido deve bagnare la superficie del solido immerso. Or nelle vicinanze di una parete solida ciascuna particella liquida è sottoposta alle attrazioni da parte del solido e del liquido circostante, oltre alle forze di gravità. La risultante di queste forze ha una direzione diversa da punto a punto, e si giustifica così la formazione del menisco in vicinanza della parete solida, poichè la superficie libera deve in ogni punto esser normale alla risultante AR delle forze agenti (fig. 53 e 54) la quale sarà diretta verso l'esterno o verso l'interno del liquido secondo che predomina l'adesione o la coesione.

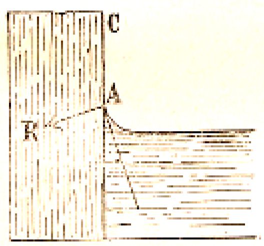


Fig 53.

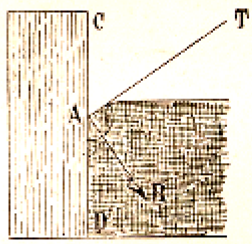


Fig. 54.

La proprietà delle lamine liquide di esser contrattili è anche posseduta dalla superficie libera di un liquido, la quale tenderà perciò ad acquistare la minima estensione possibile; è dovuta a ciò la tendenza alla forma sferica delle piccole gocce di mercurio. In conseguenza di questa contrattilità una superficie libera non piana tende a spianarsi. Cosicchè immergendo un tubo stretto nell'acqua, il menisco concavo che si forma per l'adesione col solido tende a spianarsi, e solleva il liquido sottostante: ma con ciò si solleva anche il contorno con cui esso si appoggia al tubo, e ne consegue un nuovo sollevamento, finchè la tendenza del menisco a spianarsi sia compensata dal peso della colonna sollevata, e possan così conciliarsi la forma concava della superficie, imposta dal tubo, e la sua tendenza alla forma piana dovuta alla tensione superficiale.

Molti fenomeni della vita comune si lasciano facilmente ricondurre ai casi tipici di fenomeni capillari da noi passati rapidamente in rassegna.

Altri fenomeni aventi per origine le forze molecolari, quali quelli dell'*osmosi,* saranno esposti in seguito.

STATICA DEGLI AERIFORMI.

74. Mentre i liquidi assumono la forma del recipiente che li contiene, ma hanno un volume invariabile, gli aeriformi occupano tutto il volume che è loro concesso, ed anzi hanno una tendenza ad espandersi, che si esplica come una pressione sulle pareti del recipiente. Questa tendenza è contrastata, ordinariamente, dall'atmosfera in cui noi viviamo, la quale esercita una compressione su tutti i corpi che si trovano alla superficie terrestre; è perciò che una vescica contenente poco gas resta floscia sotto l'azione dell'atmosfera: che se si colloca la vescica sotto una campana, e con la *macchina pneumatica* si porta via l'aria della campana, si osserva la vescica gonfiarsi per l'espansione del gas contenuto.

La tendenza espansiva dei gas si esalta costringendoli a occupare un piccolo volume. Così se un cilindro pieno di un gas è chiuso superiormente da uno stantuffo mobile, premendo con la mano contro lo stantuffo si incontra un ostacolo crescente a misura che lo stantuffo si abbassa. E abbandonando lo stantuffo a sè esso torna indietro, come spinto da una molla, fino a che la tendenza espansiva del gas sottostante è uguagliata dall'azione compressiva dell'atmosfera.

75. **Peso degli aeriformi.** — Pesando un pallone di vetro, munito di rubinetto, prima e dopo di averne estratta l'aria con la macchina pneumatica, si può dimostrare chiaramente che l'aria è un corpo dotato di peso. E riempiendo il pallone con gas differenti si può provare che essi pesano differentemente a parità di volume.

Siccome però la stessa massa di gas può occupare volumi molto diversi a seconda della pressione e della temperatura cui è sottoposta, nel precisare il peso, per es., di un litro d'aria secca occorre tener conto della sua pressione e della temperatura.

E per definire bene il concetto di pressione, e fornire il mezzo migliore per misurarla, occorre anzitutto parlare della *pressione atmosferica.*

76. **Pressione atmosferica.** — Noi viviamo in un immenso oceano d'aria che circonda la Terra da ogni parte, penetrando in tutte le cavità, ed estendendosi fino a un'altezza non ben precisata, ma certo superiore a parecchie centinaia di chilometri. E siccome l'aria è un corpo dotato di peso, gli strati superiori graveranno sui sottostanti, e questi su quelli che stanno più in basso, cosicchè ogni parte del suolo è, come il fondo dell'oceano, sottoposto ad una pressione eguale al peso di una colonna cilindrica d'aria fino al limite dell'atmosfera. Se questa colonna avesse dovunque la stessa densità, sarebbe facile calcolarne il peso complessivo, conoscendo l'altezza, ovvero dedurre questa dal valore della pressione determinato altrimenti. In realtà la densità dell'aria non è costante alle diverse altezze, data la sua grande comprimibilità; è quindi notevolmente maggiore nelle regioni più basse dell'atmosfera, ove è maggiore la pressione sopportata.

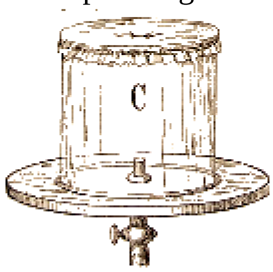


Fig. 55.

La pressione totale atmosferica non si eserciterà soltanto sul suolo libero, sotto il cielo; ma per il principio di Pascal, evidentemente applicabile agli aeriformi, si manifesterà ovunque l'aria è in contatto con un solido o un liquido, normalmente alla superficie di separazione. E così l'aria di una stanza atmosfera, si trova sotto l'azione comprimente dell'atmosfera, e quindi, anche chiudendo le aperture, eserciterà una pressione espansiva, eguale all'esterna, sul pavimento, sulle pareti e sul tetto.

Un foglio di sottilissima carta sopporta delle pressioni grandissime, eguali sulle due facce, da parte dell'aria; e resiste solo per l'eguaglianza di quelle pressioni. Che se, come nel *crepavesciche* (fig. 55) si diminuisce con la macchina pneumatica la pressione da una parte, il foglio comincia con l'avvallarsi dall'esterno verso l'interno e tosto si rompe fragorosamente.

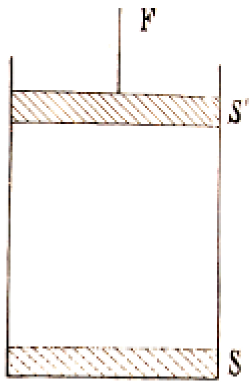


Fig. 56.

Se si potesse in un cilindro (fig. 56) applicare sul fondo uno stantuffo S in perfetto contatto, in modo da eliminare tra il fondo e lo stantuffo ogni traccia di aria, allora per portare lo stantuffo nella posizione *S′* lasciando il vuoto dietro di sè, occorrerebbe applicare una forza F eguale appunto alla pressione che vi esercita l'atmosfera dall'esterno. Questa forza dovrebbe essere di kg. 1,033 per ogni centimetro quadrato; cosicchè lo stantuffo S', che ha il vuoto sotto di sè, si comporterà come se sostenesse superiormente una colonna d'acqua dell'altezza di metri 10,33, o una colonna di mercurio di 76 centimetri. Basterà praticare un forellino nel cilindro perchè, penetrandovi l'aria, essa eserciti sulla faccia inferiore dello stantuffo una forza eguale, capace cioè di tenerlo in equilibrio, rimanendo solo la tendenza dello stantuffo a discendere per il suo peso. Questa esperienza potrebbe servire per dare una valutazione approssimativa della pressione atmosferica; ma intervengono a falsare i risultati, oltre al peso dello stantuffo, il suo attrito contro le pareti, e la difficoltà di ottenere una *buona tenuta,* di fare cioè che l'aria non penetri nel cilindro attraverso ai meati inevitabili tra lo stantuffo e le pareti laterali.

77. **Esperienza di Torricelli**. — Questi inconvenienti vengono eliminati nella celebre esperienza di Torricelli, con la quale egli dimostrò per primo l'esistenza della pressione atmosferica e fornì il mezzo per misurarla esattamente.

Una canna di vetro, lunga circa un metro, è chiusa a un estremo; la si riempie di mercurio, avendo cura che la canna e il mercurio siano ben asciutti, e che non restino bollicine d'aria aderenti tra il solido e il liquido; indi si capovolge la canna, tenendola chiusa inferiormente col dito, su una vaschetta piena di mercurio. Liberando l'orifizio inferiore (fig. 57) si constata che una parte del mercurio vien fuori dalla canna nella vaschetta, ma il liquido si ferma a tale altezza che il dislivello tra il vertice della colonna interna e la superficie libera nella vaschetta sia di circa 76 cm. Nella parte superiore della canna, abbandonata dal mercurio, si ha il *vuoto torricelliano*, mentre sulla superficie libera della vaschetta grava la pressione atmosferica. È quindi evidente che la pressione atmosferica eguaglia il peso di una colonna di mercurio avente l'altezza di 76 cm., cioè 1 chilogrammo e 33 grammi per ogni centimetro quadrato.

E siccome le pressioni esercitate dai liquidi dipendono solo dal dislivello, e non dalla forma del recipiente, quel dislivello sarà costantemente 76 cm. anche inclinando la canna, o ricorrendo a un tubo non cilindrico.

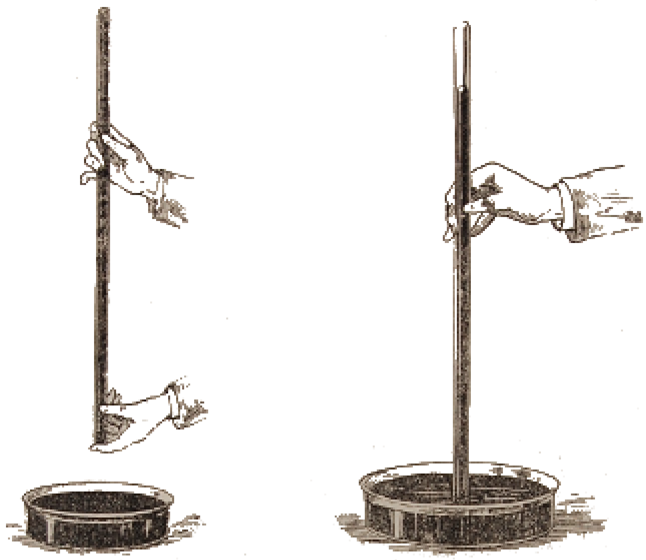


Fig. 57.

Se poi tutta la canna con la vaschetta si porta sotto la campana della macchina pneumatica e si estrae con questa l'aria che comprime la superficie libera del mercurio nella vaschetta, si vedrà la colonna torricelliana diminuire d'altezza. E così, come ebbe a verificare il Pascal in Francia ripetendo l'esperienza di Torricelli su un'alta montagna, l'altezza della colonna è minore di 76 cm., poichè ivi la pressione atmosferica è minore, mancando il peso di tutta la massa d'aria sottostante.

78. **Barometri a mercurio.** — La pressione atmosferica è diversa nei diversi luoghi, anche alla stessa altezza sul mare; e in uno stesso luogo muta col tempo; si notano spesso variazioni anche di due centimetri in più o in meno del valore normale. Alle sue variazioni son connessi i più

importanti fenomeni metereologici cosicchè è molto utile seguirne esattamente e regolarmente l'andamento nei diversi luoghi e nei diversi tempi. Servono a tal uopo i *barometri,* di cui i migliori utilizzano appunto l'esperienza di Torricelli, permettendo di misurare l'altezza della colonna con la massima esattezza e insieme con la massima comodità.

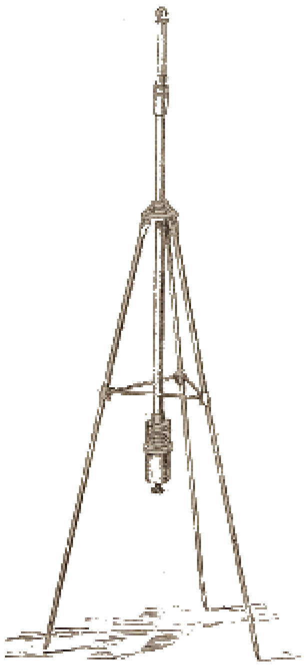


Fig. 58.

Il riempimento della canna va fatto con cautele grandissime per evitare che restino aderenti al vetro tracce di aria o umidità, le quali si diffonderebbero nella camera torricelliana, determinando una pressione e quindi un abbassamento nella colonna barometrica. Inoltre la canna nel punto ove termina la colonna medesima deve avere una grande sezione, per impedire che si formi, come nei tubi stretti, un menisco convesso il quale determinerebbe anch'esso una depressione. Infine un termometro deve indicare la temperatura del mercurio, poichè, come vedremo, la colonna di mercurio che serve a misurare la pressione pesa più o meno, a pari lunghezza, secondo che è più o meno fredda.

Per eseguire esattamente la misura dell'altezza della colonna si dovrebbe ricorrere a un apparecchio speciale, detto *catetometro*, che noi non possiamo descrivere. In pratica ci si contenta, come nel *barometro di Fortin* (fig. 58) di rinchiudere la canna di vetro in un astuccio di ottone graduato in millimetri, mentre il pozzetto è costituito da un serbatoio inferiore che ha il fondo mobile per mezzo di una vite, cosicchè si può sempre ricondurre il livello del mercurio nel pozzetto fino a venire in contatto con una puntina fissa di avorio, dalla quale prende origine la graduazione segnata sull'astuccio. Una speciale sospensione, detta *cardanica,* permette di tener la canna verticalmente nell'atto della misura. Questo apparecchio permette che la pressione venga misurata con un'approssimazione eguale circa a 1/10 di millimetro, sufficiente per tutti gli usi comuni.

Per confrontare poi le letture barometriche fatte in posti diversi occorre tener conto dell'altezza sul mare del luogo ove si fa la misura. Per dislivelli non troppo grandi basta tener presente che un dislivello di circa 10 metri e mezzo produce una differenza di 1 millimetro nella colonna barometrica.

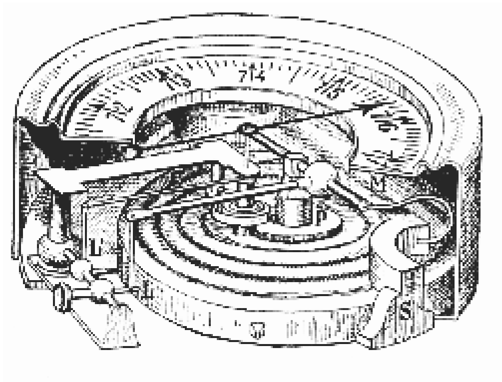


Fig. 59.

79. **Barometri metallici**. — Meno esatti, ma molto più comodi dei precedenti sono i barometri metallici, nei quali si fa a meno del mercurio e si ricorre invece alla elasticità di scatolette metalliche, che vengono più o meno deformate dalla pressione esterna.

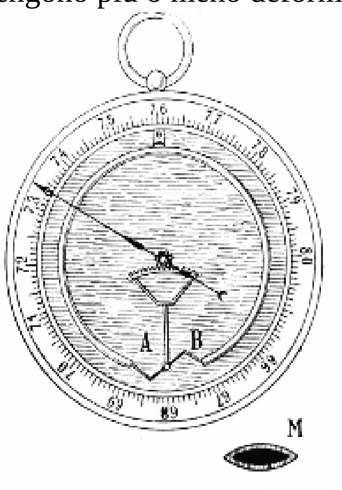


Fig. 60.

Nell'*aneroide* di Bourdon, (fig. 59), un tubo piegato ad arco di cerchio e avente le pareti molto sottili è vuoto d'aria nell'interno; un suo estremo è fissato, mentre l'altro estremo si avvicina o si allontana dal primo, secondo che la pressione esterna aumenta o diminuisce; questi spostamenti, piccolissimi, vengono amplificati con un sistema di leve e di ingranaggi e si traducono in movimento di una lancetta sopra un cerchio, graduato per confronto con il barometro a mercurio.

Invece nel *barometro olosterico* (fig. 60) una scatola chiusa e priva d'aria è limitata superiormente da una lamina ondulata molto flessibile, i cui spostamenti, provocati dalle variazioni nella pressione esterna, sono amplificati coi soliti sistemi di leve e ingranaggi e determinano il moto dell'indice sul quadrante.

A causa delle imperfezioni elastiche questi barometri non danno indicazioni costanti, e vanno confrontati spesso con un barometro a mercurio; inoltre gli attriti degli ingranaggi costituiscono una notevole causa di errore e riducono la sensibilità dello strumento.

80. **Altimetria.** — Quando il barometro segna 76 cm. e la temperatura è zero un litro d'aria secca, pesa 1,293 gr. e perciò una colonna di mercurio di 1 mm. d'altezza ha un peso eguale a quello di una colonna d'aria di m. 10,532. Se la densità dell'aria fosse costante alle diverse altezze, il barometro si abbasserebbe dunque di un mm. per ogni 10,532 m. di sollevamento dell'intero apparecchio. In realtà a misura che la pressione diminuisce l'aria diviene meno densa, e quindi si richiedono spostamenti sempre maggiori di 10,532 m. perchè il barometro si abbassi di 1 mm. per volta.

Il problema di dedurre l'altezza sul livello del mare di una stazione misurando nello stesso momento la pressione in quel posto e in un altro non troppo lontano ma situato al livello del mare, richiede dei calcoli complicati; ci si può servire, a tal uopo delle *formole altimetriche* quali vengono calcolate nei corsi di Fisica Superiore.

81. **Pressione di un gas — Densità relativa. —** Se un gas è rinchiuso in un recipiente avente una parete mobile, come un cilindro limitato da uno stantuffo senza peso, questo sarà in equilibrio quando la pressione esercitata dal gas è eguale alla pressione atmosferica. Meglio ancora rinchiudendo il gas in un recipiente (fig. 61) che comunica con un tubo ad U contenente per es. mercurio e con l'altro estremo aperto all'aria libera, il gas avrà una pressione eguale all'atmosferica se il liquido si porta allo stesso livello nei due rami. Quando invece si constata un dislivello, la pressione del gas sarà eguale alla pressione atmosferica (misurata dal barometro), aumentata o diminuita del dislivello medesimo, secondo che il liquido in contatto col gas è a un livello più basso o più alto di quello in contatto con l'aria libera.

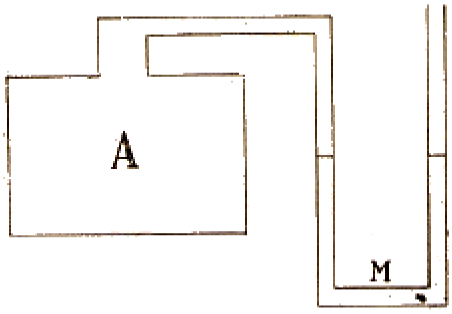


Fig. 61.

Il tubo ad U col liquido contenuto, si chiama *manometro ad aria libera.*

Supponiamo adesso che un gas sia raccolto entro una provetta inizialmente piena di mercurio e capovolta su una vaschetta con mercurio (fig. 62), e sia a il dislivello del mercurio tra l'interno e l'esterno della provetta. Allora è chiaro che la pressione del gas, sommata col peso della colonna *a* di mercurio, fa equilibrio alla pressione atmosferica; e perciò la pressione propria del gas si otterrà sottraendo dalla pressione atmosferica (misurata col barometro) il dislivello *a*.

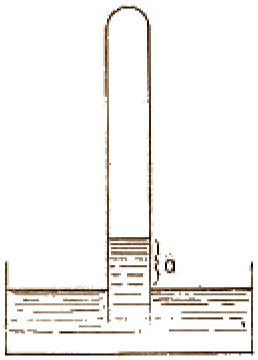


Fig. 62.

Se il liquido fosse invece acqua, bisognerebbe tener conto del fatto che la colonna *a* pesa quanto una colonna di mercurio avente l'altezza $\frac{a}{p}$ ove *p* indica il peso specifico del mercurio; e perciò dalla pressione atmosferica misurata in centimetri di mercurio, bisogna sottrarre, per avere la pressione del gas, non *a*, ma $\frac{a}{d}$.

Precisato il concetto di pressione di un gas possiamo definire la sua *densità relativa* che è il rapporto tra la massa di un certo volume di quel gas e la massa di un egual volume d'aria, alle stesse condizioni di temperatura e di pressione.

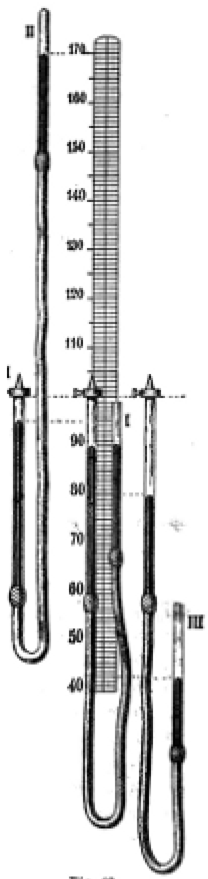


Fig. 63.

82. **Legge di Boyle**. — Abbiamo detto che i gas sono molto compressibili; si deve al fisico inglese Boyle una legge molto semplice che riguarda la relazione tra i volumi che uno

stesso gas assume sotto pressioni diverse. Questa legge porta anche il nome di Mariotte, un fisico francese che la ritrovò senza aver notizia delle ricerche di Boyle; essa si esprime dicendo che: *mantenendone costante la temperatura, i volumi acquistati da una determinata massa di gas sottoposta a diverse pressioni sono inversamente proporzionali alle pressioni medesime.*

Per verificare questa legge serve l'apparecchio della fig. 63. Esso risulta essenzialmente da due canne di vetro, comunicanti per mezzo di un tubo di caoutchouc, e delle quali l'una è chiusa all'estremo superiore per mezzo di un rubinetto. Le due canne sono spostabili lungo un'asta verticale graduata. Si rinchiude nella canna munita di rubinetto una certa massa di gas, per es. di aria, riempiendo il tubo di caoutchouc e parte delle canne con mercurio; e si spostano le canne in modo che il mercurio acquisti in entrambe lo stesso livello (posiz. I).

Se dopo aver misurato il volume occupato dal gas si spostano le canne determinando un dislivello del mercurio nei due rami, (posizioni II e III), si vedrà variare in corrispondenza il volume del gas, e si potrà verificare che i volumi sono inversamente proporzionali alle rispettive pressioni, valutate come si è detto al § 81.

Se in una prova il gas ha il volume v e la pressione p, e in un'altra il volume v' e la pressione p', si troverà così che

$$v : v' = p' : p$$

o, ciò che è lo stesso, che

$$vp = v'p'$$

In generale, cioè, per una data massa di gas, è costante il prodotto del volume per la pressione, finchè è costante la temperatura.

E siccome la densità assoluta (§ 42) di un corpo è inversamente proporzionale ai volumi occupati da una massa costante del corpo, si può anche dire che la densità assoluta di un gas è proporzionale alla pressione cui è sottoposto.

La legge di Boyle è solo approssimativa, e le divergenze sono specialmente sensibili quando i gas sono sperimentati a temperature molto basse, e a pressioni elevate. In generale le divergenze sono più grandi per i gas che col raffreddamento e la compressione possono facilmente trasformarsi in liquidi.

83. **Legge di Dalton sui miscugli gassosi**. — L'aria atmosferica è un miscuglio costituito essenzialmente da azoto e ossigeno nelle proporzioni volumetriche di $\frac{4}{5}$ e di $\frac{1}{5}$. Or se si riesce a separare da un litro d'aria alla pressione atmosferica l'azoto contenuto, l'ossigeno rimanente occupando, da solo l'intero volume, avrà una pressione di $\frac{1}{5}$ d'atmosfera, e così il solo azoto eserciterebbe, distribuito sempre nell'intero volume, la pressione di $\frac{4}{5}$ d'atmosfera. Adunque *il miscuglio dei due gas esercita una pressione che è la somma di quelle che eserciterebbero i singoli componenti, se ciascuno da solo occupasse l'intero volume della miscela.* Questa legge è generale per tutti i gas, finchè non intervengono azioni chimiche; ed è conosciuta col nome di legge di Dalton.

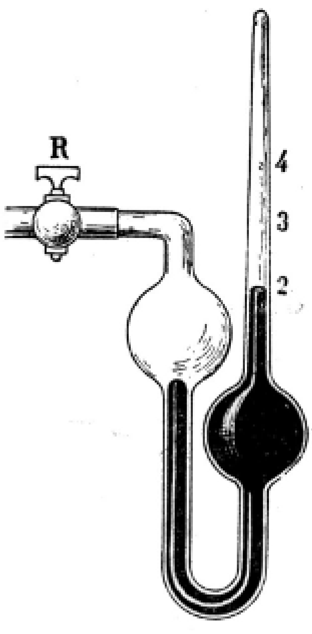


Fig. 64.

84. **Manometri.** — Abbiamo già descritto il manometro ad aria libera (§ 81). Quando però la pressione gassosa che si vuol misurare supera di molto l'atmosferica, occorrerebbe che il ramo aperto avesse una grande lunghezza; così se la pressione è di *10 atmosfere* (cioè è eguale a dieci volte la pressione atmosferica) il ramo aperto dovrebbe avere una lunghezza superiore a m. 7,60. Si ricorre in tali casi ai manometri ad aria compressa (fig. 64) e ai manometri metallici (fig. 65). Nel

manometro ad aria compressa, che è in fondo un tubo ad U nel quale il tubo di destra è chiuso e contiene alquanta aria, il moto del liquido è contrastato dalla tensione crescente che acquista l'aria schiacciata. Nel manometro metallico il gas è posto in comunicazione con un tubo ad anello, chiuso all'altro estremo, e che si distende più o meno in virtù della pressione interna; un indice mobile su un quadrante amplifica i piccoli spostamenti dell'estremo libero del tubo.

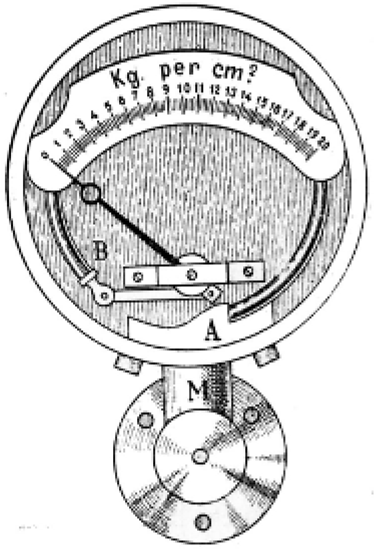


Fig. 65.

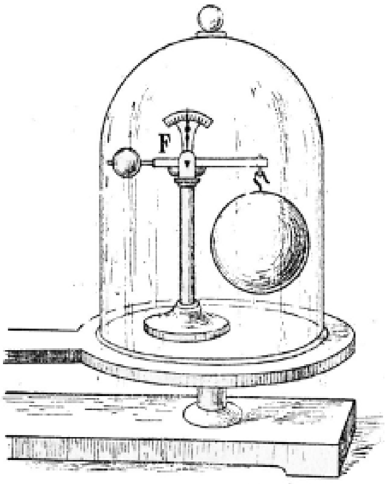


Fig. 66.

85. **Spinta dell'aria**. — **Baroscopio**. — **Aerostati**. — Come nei liquidi anche nei gas la pressione è maggiore nei punti più bassi che in quelli più alti: un corpo subirà perciò nei suoi punti pressioni disuguali, la cui risultante, come nei liquidi per il principio d'Archimede, è eguale al peso dell'aria spostata. Così un corpo avente il volume di 1 metro cubo subirà una spinta di 1293 grammi nell'aria a 0° e alla pressione di 76 cm.

Per dimostrare l'esistenza di questa spinta serve il *baroscopio* (fig. 66) costituito da una bilancina il cui giogo è in equilibrio sotto il peso di una piccola sfera massiccia e di una sfera; cava di volume molto più grande.

L'equilibrio è apparente, poichè in realtà la sfera cava, per il suo maggior volume, subisce una spinta maggiore dall'aria; e difatti portando l'apparecchio sotto la campana della macchina pneumatica, e facendo il vuoto, il baroscopio s'inclina nel senso previsto.

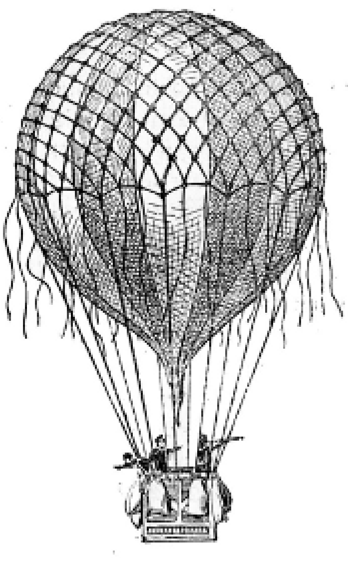


Fig. 67.

Di questa spinta dovuta all'aria bisogna tener conto nelle pesate di precisione, poichè la subiscono differentemente, quando, hanno volume diverso, i pesi graduati e il corpo da pesare.

Quando la spinta subita da un corpo immerso nell'atmosfera supera il peso, il corpo tende a salire, come un pezzo di legno sott'acqua. Così un involucro di taffetà, pieno di un gas più leggiero dell'aria, come il gas illuminante o meglio ancora l'idrogeno, salirà progressivamente fino a che la spinta subita, la quale diminuisce a misura che l'aria circostante si fa più rarefatta e quindi più leggiera, eguaglia il peso dell'involucro e del gas contenuto.

Su questo principio son fondati gli aerostati (fig. 67) o i semplici palloni di carta (mongolfiere) contenenti aria calda.

Gli aerostati son muniti di un'apertura in basso, che permette l'uscita del gas quando esso tende ad espandersi per la diminuita pressione esterna; invece un'apertura superiore, comandata da una valvola, permette di far uscire lentamente il gas, mentre l'aria ne prende il posto, con che il pallone ridiscende. La *forza ascensionale,* che spinge l'aerostato a salire, è la differenza tra la spinta e il peso *totale* dell'aerostato. Quest'ultimo può essere diminuito, quando occorra salire più alto, buttando dalla navicella dei sacchetti di sabbia che l'aeronauta porta con sè.

86. — Abbiamo stabilito che le differenze di pressione tra due punti di un liquido allo stesso livello determinano il moto del liquido dai posti ove la pressione è maggiore verso quelli ove è minore. — Lo stesso può dirsi di un gas. — Questi movimenti possono essere transitori, o permanenti, secondo, che la causa cui è dovuta la differenza di pressione è anch'essa transitoria o permanente. Così nel sistema dei due recipienti A e B (fig. 68) messi in comunicazione dal tubo C, e contenenti un liquido ad altezze diverse, la pressione all'estremo M del tubo è maggiore della pressione all'altro estremo N. Il liquido scorrerà nel tubo finchè perdura la differenza di pressione; e se con opportuni artifici si mantiene costante l'altezza attuale del liquido in A e B (per esempio facendo sopraggiungere in modo continuo nuova acqua in A e portando via da B quella che proviene da A) anche il flusso nel tubo C sarà permanente.

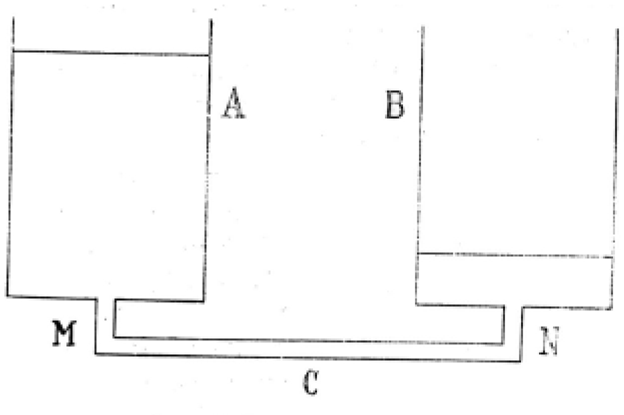


Fig. 68.

Chiamasi *portata* del flusso nel tubo la quantità di acqua che ne traversa una sezione nell'unità di tempo. — Essa dipende: dal dislivello tra A e B, cioè dalla differenza di pressione tra M ed N, dalle dimensioni del tubo, e dalla natura del liquido.

Si noti intanto che quando un liquido si sposta in contatto con una parete solida, si esercita tra i due corpi una specie d'attrito, che dipende, con leggi non semplici, dalla coesione del liquido e dalla sua adesione col solido. Così nel caso di un liquido che bagni perfettamente il tubo, una vera guaina esterna del liquido resta ad esso aderente, e il liquido scorre nell'interno del canale limitato da quella guaina. — Interviene allora, e in misura notevole, la viscosità del liquido: invero solo in un *liquido perfetto* le molecole possono scorrere le une sulle altre senza incontrare alcuna resistenza, mentre nei liquidi reali questo moto è ostacolato dal cosidetto *attrito interno.*

Queste influenze si fanno risentire in lieve misura quando il tubo è molto largo; ma con tubi molto stretti le leggi dell'efflusso divengono assai complicate, e la portata dipende enormemente dal diametro del tubo; a parità delle altre condizioni vi influisce la natura del liquido, secondo un coefficiente numerico che ne misura la viscosità.

87. **Macchina pneumatica a stantuffo.** — Descriveremo il tipo schematico di questa macchina, per intenderne il funzionamento, senza entrare nei complicati particolari di costruzione.

Nel cilindro C, *corpo di tromba* (fig. 69), è mobile uno stantuffo S a *perfetta tenuta,* tale cioè che l'aria non possa filtrare attraverso la superficie di contatto col cilindro. — Lo stantuffo è forato, e il foro è chiuso da una valvola v che si apre dal basso in alto, mettendo così in comunicazione la parte inferiore del corpo di tromba con l'aria libera.

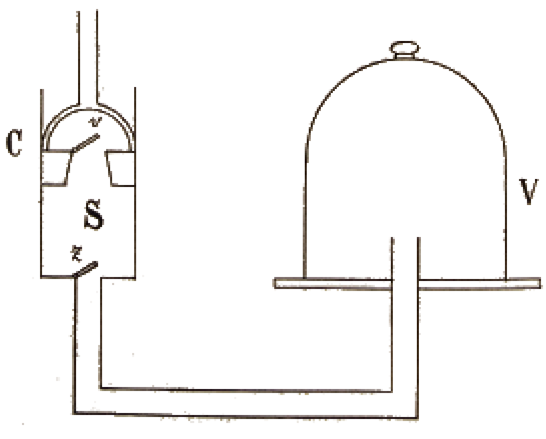


Fig. 69.

In basso il cilindro comunica con un tubo attraverso a una altra valvola z che si apre anch'essa dal basso verso l'alto; il tubo va al centro di una piattaforma sulla quale è poggiata la campana di vetro v, che aderisce a perfetta tenuta, col suo orlo inferiore ben lavorato, sulla piattaforma.

Supponiamo che lo stantuffo riposi sulla base del cilindro, e che venga sollevato. — Esso lascerà il vuoto dietro di sè e perciò l'aria della campana e del tubo solleverà la valvola z e penetrerà in parte nello spazio lasciato libero dallo stantuffo; occupando perciò un volume totale maggiore la sua pressione diminuirà, e la valvola z resterà ermeticamente chiusa dal suo peso e dalla pressione atmosferica esterna, maggiore della interna. — Quando lo stantuffo si fermerà a una certa altezza, la valvola *z* ricadrà pel suo peso.

Se adesso si porta in basso lo stantuffo, l'aria sottostante, costretta in un volume minore, aumenterà di pressione; e quando questa avrà superata la pressione atmosferica esterna, solleverà la valvola *v*, e l'aria del cilindro passerà interamente nell'ambiente, se lo stantuffo non lascia alcuno spazio libero (*spazio nocivo*) quando va a battere sulla base del cilindro.

Si intende subito che a ogni nuova salita e ridiscesa dello stantuffo nuova aria sarà estratta dalla campana, fino a che essa avrà la forza di sollevare la valvola *z*, e fino a che quella raccolta nel corpo di tromba, non annidandosi nello spazio nocivo, potrà acquistare la pressione necessaria per sollevare la valvola *v*.

88. — Come abbiamo premesso le macchine pneumatiche a stantuffo, funzionanti col principio dianzi spiegato, son dotate di perfezionamenti costruttivi destinati a migliorarne gli effetti. — Così

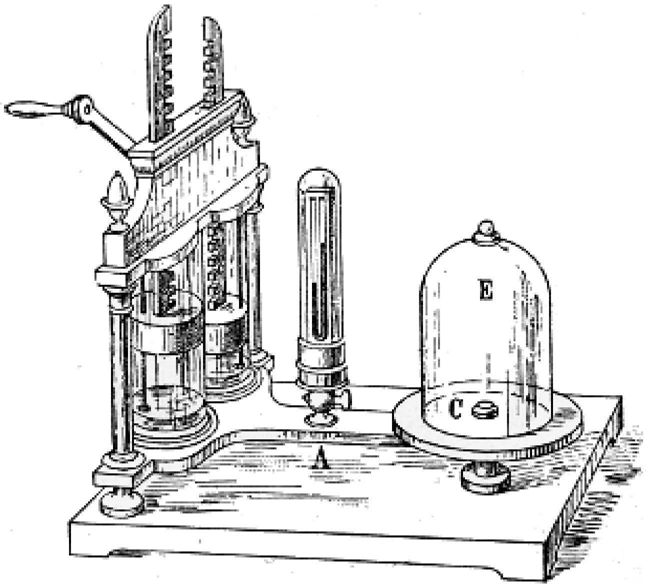


Fig. 70.

nel modello più comune (fig. 70) la valvola *z* è sostituita da un tappo conico che viene direttamente manovrato, nel senso opportuno, col moto alternativo dello stantuffo. E inoltre lavorano insieme due corpi di tromba, anzichè uno, in modo che l'uno discende quando l'altro sale. Questa disposizione, oltre al vantaggio della maggiore rapidità, permette di eliminare l'inconveniente grave del grande sforzo che occorre per sollevare lo stantuffo (contro la pressione atmosferica che gli grava sopra) appena comincia la rarefazione all'interno; a tal fine le aste reggenti gli stantuffi sono impegnate in un'unica ruota a denti, così da controbilanciare, per il loro moto contrapposto, gli effetti del peso esercitato dall'atmosfera.

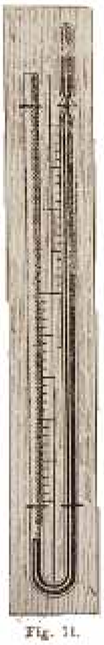


Fig. 71.

Un organo importante della macchina pneumatica è il *provino* (fig. 71) costituito da un tubo a U chiuso a un estremo e pieno (tranne che nella parte superiore del ramo aperto) di mercurio. Quando la pressione dell'aria che grava sul mercurio del ramo aperto comincia a diminuire, al di sotto di un certo limite, il mercurio discende dal ramo chiuso, ove si forma il vuoto torricelliano. E si porterebbe allo stesso livello nei due rami se l'aria della campana potesse estrarsi interamente. In realtà con le macchine pneumatiche descritte si riesce solo a rarefare l'aria fino a un certo limite, e il dislivello raramente è inferiore ad alquanti millimetri. Con altre macchine, di cui daremo ora un accenno, la pressione nel recipiente può essere ridotta a una frazione piccolissima di millimetro.

89. — **Macchina a mercurio di Geissler. —** Una camera di vetro A (fig. 72) comunica, per mezzo della canna di vetro C e del tubo di gomma D, con un pallone mobile B, pieno di mercurio. — Portando questo in alto per mezzo della manovella M, il mercurio invade il pallone A, il quale attraverso la serie di rubinetti L, I e l'imbuto N comunica con l'aria libera, mentre attraverso il rubinetto E comunica coll'essiccatore C e quindi con i tubi H ove son innestati i recipienti da vuotare.

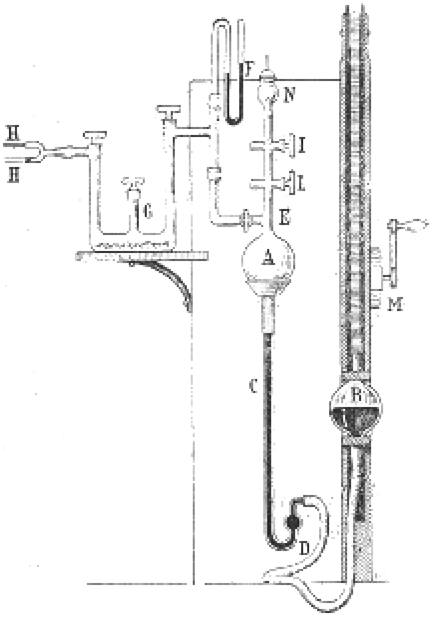


Fig. 72

Durante il sollevamento di B teniamo chiuso E e apriamo L ed I; il mercurio invaderà la camera A, scacciandone l'aria attraverso la via LIN. Quando il mercurio sarà giunto in I, chiudiamo i rubinetti I ed L e abbassiamo il pallone B. Il mercurio contentato in A tornerà indietro verso B, lasciando il vuoto dietro a sè, cosicchè aprendo E l'aria del recipiente da vuotare si precipiterà nella camera A. Torniamo a chiudere E, e solleviamo B in modo da espellere per L ed I l'aria di A; riabbassando B si riformerà il vuoto in A, e così di seguito, fino a raggiungere la rarefazione richiesta.

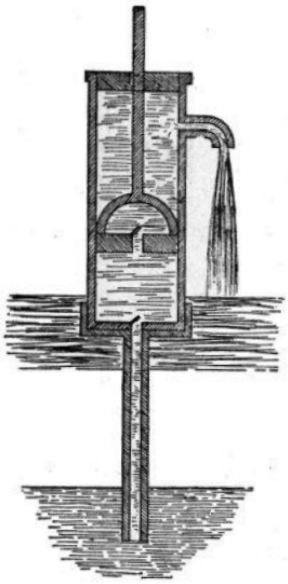


Fig. 73.

Nelle pompe più moderne, fondate sul principio di quella di Geissler, son soppresse le manovre dei rubinetti, mentre le comunicazioni tra le diverse parti della macchina sono affidate allo stesso mercurio, che le compie automaticamente nelle salite e discese di B. Si ha con ciò l'altro vantaggio di eliminare le chiusure dei rubinetti, che non possono essere ermetiche. È poi indispensabile, oltre che evitare le chiusure difettose, disseccare con la massima cura la pompa e il recipiente da vuotare.

90. — **Trombe ad acqua. —** Se si ripetesse l'esperienza di Torricelli con l'acqua anzichè col mercurio occorrerebbe un tubo alto più di 10 metri, poichè una colonna d'acqua equivalente in peso a una colonna di mercurio deve essere 13 volte e mezza circa più alta.

In conseguenza se noi facciamo pescare nell'acqua un tubo molto lungo, aperto alle due estremità, e dall'estremità libera facciamo il vuoto con una macchina pneumatica, l'acqua salirà lungo il tubo, fino al di sopra di dieci metri.

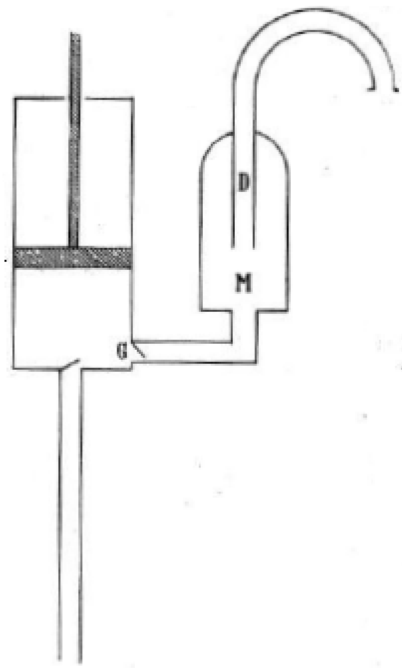


Fig. 74

E se noi innestiamo all'estremo superiore di un tubo, avente una lunghezza inferiore a 10 metri, un corpo di tromba munito di stantuffo come quello della macchina pneumatica, allora, quando l'acqua raggiungerà il corpo di tromba, continuerà egualmente il funzionamento della macchina, soltanto che circolerà nel sistema acqua anzichè aria; e l'acqua che vien fuori dalla valvola dello stantuffo potrà esser raccolta e utilizzata. Funzionano appunto così le pompe ad acqua, le quali però non essendo costruite in modo da garentire una chiusura ermetica non permettono di sollevare l'acqua al di sopra di 7 od 8 metri. Una di esse è rappresentata nella fig. 73, che non ha bisogno di altre spiegazioni.

Nelle *trombe aspiranti-prementi,* come quella della fig. 74 lo stantuffo non è forato. Durante la sua salita l'acqua proveniente dal tubo invade il corpo di tromba, sollevando la valvola; nella discesa questa si chiude, e l'acqua attraverso G viene iniettata nella *camera d’aria* M, dalla quale l’aria compressa sovrastante la spinge nel tubo D. — L’altezza del tubo d’aspirazione è limitata, per le ragioni indicate, a circa 7 metri; l’altezza a cui l’acqua si solleva nel tubo D può essere anche molto maggiore, e dipende solo dalla forza disponibile nel mandare in giù lo stantuffo. — La camera d’aria ha la funzione di rendere il getto in D continuo anzichè intermittente, qualora il tubo D sia piuttosto stretto.

91. — **Fontana di compressione**. — Un recipiente chiuso (fig. 75) contiene un liquido e un tubo che pesca nel fondo, provvisto di un rubinetto. La parte superiore del recipiente è occupata da un gas compresso, il quale, premendo sul liquido, lo spinge attraverso il tubo e lo fa zampillare al di fuori quando si apre la chiavetta superiore.

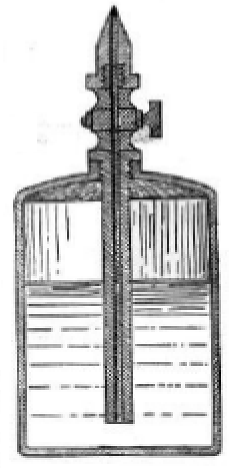


Fig. 75.

92. — **Sifone**. — È un apparecchio che serve a travasare i liquidi; esso è costituito da un tubo ricurvo di cui un estremo pesca nel liquido da travasare e l’altro si trova a un livello più basso. Supponiamo (fig. 76) che il tubo-sifone sia pieno di liquido, e consideriamo le pressioni esercitate dal liquido sulle due facce di uno straterello S. — La superficie libera del liquido in A sopporta la pressione atmosferica, che spinge il liquido a salire nel tubo, cosicchè se lo strato S fosse un piccolo stantuffo, esso subirebbe dalla sinistra una pressione eguale all’atmosferica, diminuita del peso della piccola colonna h sostenuta.

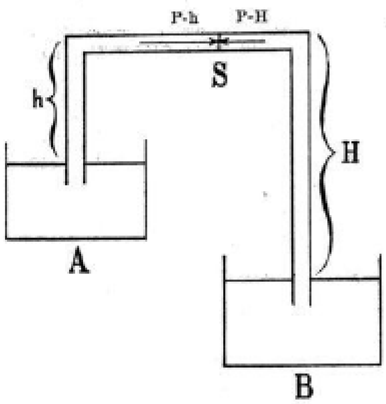


Fig. 76.

Se la pressione atmosferica è P lo strato S sarà quindi sollecitato verso destra, dalla pressione P-h.

Analogamente sul vaso B si esercita la pressione atmosferica che spinge pure l’acqua entro il tubo, ed esercita sullo strato S, verso sinistra, una pressione P diminuita del peso della colonna H, cioè una pressione P—H.

Le due pressioni P—h, P—H che lo strato subisce dalle due parti sono disuguali, e la prima è maggiore. Quindi lo strato tende a muoversi da sinistra verso destra, e così avverrà dei successivi strati che ne prendono il posto. Il liquido fluirà quindi dal vaso A al vaso B finchè questo si trovi, a un livello più basso.

Del sifone si fanno continue applicazioni nella vita pratica. Perchè esso funzioni occorre riempirlo prima di liquido, bisogna cioè *adescarlo.*

DIFFUSIONE E OSMOSI.

93. — **Diffusione dei liquidi**. — Al di sopra di una soluzione di un sale colorato, per esempio solfato di rame, giacente nel fondo di una provetta versiamo con cura dell’acqua. In principio la soluzione e l’acqua incolora saranno nettamente separati tra loro, e dovremmo aspettarci che tale separazione resti a lungo, poichè la soluzione è specificatamente più pesante dell’acqua che sta sopra. Invece potremo constatare dopo qualche tempo che la colorazione procede verso l’alto, dimostrando che i due liquidi si mescolano lentamente malgrado il diverso peso specifico. Si formeranno quindi a diverse altezze soluzioni di diversa concentrazione, cioè contenenti per ogni centimetro cubo pesi diversi di sale, e il sale progredirà dagli strati di maggiore a quelli di minore concentrazione.

La quantità di sale che passa da uno strato all’altro è proporzionale al tempo del passaggio, alla loro differenza di concentrazione e inversamente proporzionale alla loro distanza (*legge di Fick*). Dipende poi dalla natura della sostanza sciolta, come fu messo in evidenza specialmente dal Graham. Da questo punto di vista le sostanze solubili possono dividersi in due grandi categorie: cristalloidi e colloidi; le prime, che hanno anche la proprietà di precipitarsi dalle soluzioni allo stato cristallino, si diffondono rapidamente; le seconde, che precipitano allo stato amorfo, si diffondono invece molto lentamente. — Posson servire di esempio per le prime il sal comune, e per le seconde l'albumina, che richiede a pari condizioni un tempo 50 volte maggiore del sal comune per diffondersi in egual misura.

Secondo le vedute moderne le soluzioni dei colloidi non sarebbero vere soluzioni, ma sospensioni nel seno del liquido della massa solida in granuli straordinariamente fini, sebbene sempre molto più grandi delle molecole delle sostanze saline. Queste invece, nelle soluzioni, sarebbero completamente libere e in parte anche scomposte in due parti (*dissociate*).

La diffusione può aver luogo anche tra due liquidi di diversa natura, come l'acqua e l'alcool, capaci di mescolarsi in qualunque proporzione. In ogni caso essa può avvenire egualmente se i due liquidi, anzichè semplicemente sovrapposti, son separati da un setto come la pergamena vegetale; gli scambi avvengono negl'interstizi molecolari del setto. Se ne trae profitto nella *dialisi, per* la quale una miscela di un colloide e di un cristalloide, come una soluzione di gomma e di zucchero, abbandona, attraverso un setto di pergamena, all'acqua che si trova dall'altra parte le sostanze saline disciolte, che si diffondono più rapidamente.

94. — **Osmosi**. — Due liquidi possono anche mescolarsi attraverso i pori di un setto interposto, per esempio attraverso ai canalicoli di una lamina o di un vaso di porcellana non verniciata.

Si determinano allora due correnti lentissime che trasportano in senso inverso quantità in generale disuguali dei due liquidi. — A questi fenomeni si è dato il nome di *Osmosi.* — Essi dipendono notevolmente dalla natura del diaframma; ma una grande regolarità si manifesta ricorrendo a una qualità speciale di setti, denominati *semipermeabili*, e che hanno la notevole proprietà (quando sian disposti tra un solvente e la sua soluzione, per esempio la acqua e l'acqua zuccherata) di lasciarsi traversare dal solvente e non dalla sostanza sciolta. Predomina allora la corrente che va dal liquido puro alla soluzione, e trasporta in seno a questa altro solvente, capace perciò di *diluire* la soluzione preesistente. — L'ingresso del solvente nella soluzione può essere impedito esercitando su questa una certa pressione, cui si è dato il nome di *pressione osmotica*.

Una membrana semipermeabile molto adatta per lo studio dell'acqua zuccherata è quella di ferroccianuro di rame, che può essere deposta con processi speciali in un vaso di porcellana porosa. — Si ottiene così con una soluzione all'uno per cento di zucchero una pressione osmotica di 55 cm. di mercurio, con una soluzione al 4 % la pressione osmotica di 208 cm; e con una soluzione al 6 % una pressione di 307 cm. cioè superiore a 4 atmosfere. — Si può verificare sui numeri riferiti che la pressione osmotica è sensibilmente proporzionale alla concentrazione e quindi al numero di molecole della sostanza sciolta in un volume dato del solvente — Questa legge è generale e ha acquistato una importanza grandissima nella teoria moderna delle soluzioni.

Si è trovato inoltre che sciogliendo diverse sostanze in volumi eguali di uno stesso solvente, in tali proporzioni che i pesi sciolti siano proporzionali ai rispettivi pesi molecolari, le soluzioni ottenute hanno la stessa pressione osmotica. Or se di due sali A e B, aventi il primo un peso molecolare doppio di quello del secondo, si prendono 2 grammi di A e 1 grammo di B, è chiaro che le parti prese contengono egual numero di molecole, qualunque sia il valore assoluto di questo numero. E perciò scegliendo di diverse sostanze pesi proporzionali ai rispettivi pesi molecolari, si prenderà per tutte lo stesso numero di molecole. Quindi i risultati delle esperienze si potranno enunciare in queste due leggi:

1° — Soluzioni di sali diversi, contenenti per litro un ugual numero di molecole della sostanza sciolta, hanno eguali pressioni osmotiche.

2° — Per una data sostanza sciolta la pressione osmotica è proporzionale al numero di molecole presenti.

Un'altra legge che l'esperienza ha indicato è la seguente :

3° — La pressione osmotica aumenta con la temperatura di $\frac{1}{273}$ per ogni grado, così come aumenta la pressione di un gas riscaldato in un recipiente a volume costante.

Sotto questa forma le leggi enunciate son perfettamente analoghe a quelle esprimenti il comportamento dei gas, qualora si consideri la pressione osmotica come l'analoga della pressione del gas. Così la prima corrisponde alla legge d'Avogadro, per la quale volumi eguali di gas differenti alla stessa temperatura e *pressione* contengono egual numero di molecole, o, ciò che è lo stesso, due gas contenenti egual numero di molecole per litro esercitano eguali pressioni. La seconda corrisponde alla legge dì Boyle, come è facile riconoscere. E la terza, nel caso dei gas, è la legge di Gay Lussac, della quale noi dovremo occuparci in seguito. Quest'analogia coi gas è ancora molto più intima di quel che non apparisca dalla corrispondenza formale tra le leggi rispettive, e viene resa più suggestiva dalla eguaglianza di alcune costanti fisiche dei gas e delle soluzioni, e dalla interpretazione teorica delle loro proprietà; venne così fondata dal fisico Van t'Hoff la celebre teoria delle soluzioni, per la quale le proprietà delle soluzioni vengono ricondotte a quelle dei gas, così come questi son considerati nella *teoria cinetica* di cui daremo un cenno più in là.

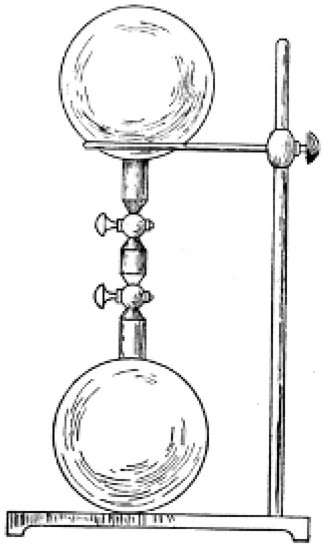


Fig. 77.

95. **Diffusione degli aeriformi.** — I due palloni della fig. 77 son pieni di due gas differenti; per esempio di aria quello inferiore e di idrogeno quello superiore. Malgrado l'idrogeno, per la sua leggerezza, debba continuare a occupare le parti più alte, dopo un certo tempo si constata che i gas si son mescolati, e che il miscuglio ha la stessa composizione sotto e sopra. Al fenomeno si dà il nome di diffusione. Esso può anche avvenire attraverso un setto poroso, e allora prende il nome di *diosmosi,* e obbedisce a una legge molto semplice dovuta al Graham. Secondo questa le quantità dei due gas che traversano il setto sono inversamente proporzionali alle radici quadrate delle rispettive densità. Così il cloro si diffonde in proporzioni circa sei volte minori dell'idrogeno.

In conseguenza della diversa velocità di diffusione un recipiente pieno di idrogeno e chiuso da un setto poroso, quando è immerso nell'aria, perde più idrogeno di quel che non entri aria, e perciò la pressione all'interno diviene presto minore che all'esterno. L'opposto avviene se il recipiente contiene aria ed è immerso in un ambiente costituito da un gas più leggiero; la pressione all'interno diviene allora maggiore, e può determinare il sollevamento di un liquido in un tubo manometrico.

96. **Solubilità dei gas nei liquidi**. — I gas sono, in proporzioni diverse secondo la loro natura, solubili nei liquidi.

Così 1 litro d'acqua, alla temperatura di 0°, scioglie 1050 litri di gas ammoniaco, 749 litri di acido cloridrico, 1,8 litri di anidride carbonica ecc. Una grande influenza è esercitata dalla pressione e dalla temperatura. Quanto alla prima la massa di gas sciolto è proporzionale alla pressione che esso esercita sul liquido dopo avvenuta la soluzione. Si noti che qui si ha da fare non con la pressione totale che un miscuglio di gas può esercitare sul liquido, ma della pressione parziale nel senso della legge di Dalton; e così i componenti dell'aria, alla pressione complessiva di 1 atmosfera, si scioglieranno come se fosse presente il solo ossigeno alla pressione di 1/5 di atmosfera, l'azoto alla pressione di 4/5 di atmosfera ecc. È perciò che, malgrado l'aria eserciti un'atmosfera di pressione sull'acqua, la quantità di anidride carbonica sciolta in un litro del solvente è molto minore di quella che vi si troverebbe se l'anidride carbonica da sola esercitasse la pressione di un'atmosfera.

Quanto alla temperatura essa influisce per tutti i gas diminuendone la solubilità.

97. **Dialisi degli aeriformi.** — Quando due gas sono separati da un setto non poroso, come una lamina liquida o di caoutchouc, possono sciogliersi in essa e sprigionarsi dalla parte opposta. Il risultato finale è la mescolanza dei due gas dalle due parti, prevalendo però la corrente del gas che si lascia più facilmente assorbire dal setto. Così tra aria e idrogeno separati da un setto di caoutchouc prevale la corrente d'idrogeno; il contrario avviene tra aria e anidride carbonica, separati da una lamina acquosa come una bolla di sapone.

Alcuni metalli, pur non essendo porosi, divengon permeabili (per certi gas) quando sian resi incandescenti. L'idrogeno, per esempio, passa facilmente attraverso il platino, e l'ossido di carbonio attraverso il ferro rovente. Le stufe di ghisa posson perciò esser pericolose, per la loro proprietà di versare nell'ambiente ossido di carbonio quando la combustione non è completa.

98. **Cenno sulla teoria cinetica dei gas.** — Le proprietà principali dei gas possono essere spiegate ammettendo che essi risultano da molecole liberamente muoventisi, con grande velocità, in tutte le direzioni, e dando luogo così a frequenti collisioni tra loro e urti contro le pareti.

Per un dato gas la pressione esercitata sulle pareti, che è appunto l'effetto immediato di quegli urti, sarebbe proporzionale al numero di urti in un dato tempo, e perciò al numero di molecole esistenti in un dato volume. Quindi se si riduce il volume di una data massa gassosa a metà, con che si raddoppia il numero di molecole per unità di volume, si raddoppierà pure la pressione, ciò che costituisce appunto la legge scoperta da Boyle sperimentalmente.

Riscaldando un gas se ne aumenta la velocità molecolare media, e quindi la forza viva e anche la pressione esercitata contro le pareti se il volume primitivo rimane invariato.

D'altra parte, con delle considerazioni che non possono essere qui esposte, si è venuti alla conclusione che se due gas diversi sono alla stessa temperatura, le loro molecole possiedono la medesima forza viva media; e che quando si prendono volumi eguali di gas differenti, alla stessa temperatura e pressione, essi contengono egual numero di molecole. In conseguenza il numero di molecole contenute in 1 cm^3 di un gas qualsiasi, alla temperatura di 0° e alla pressione di 76 cm., è indipendente dalla natura del gas; si è potuto stabilire che quel numero (detto numero di Loschmidt) è espresso all'incirca da 4×10^{19}. Quanto alla velocità molecolare media, essa dipende dalla natura del gas, e precisamente è inversamente proporzionale alla radice quadrata della sua densità; per l'idrogeno si è trovato che essa è di circa 1700 metri al secondo alla temperatura di 0°.

Un'altra grandezza frequentemente adoperata è la cosiddetta lunghezza media di libero percorso, che esprime lo spazio che percorre in media una molecola tra due urti consecutivi con altre molecole; questo cammino è maggiore, com'è naturale, quando la pressione del gas è minore, e le molecole son perciò più diradate. Alla pressione atmosferica essa è all'incirca 0,1 micron, e dipende alquanto dalla natura del gas.

Ma noi non possiamo diffonderci sui particolari e sulle argomentazioni di questa teoria che è una delle più brillanti e delle più sicure conquiste della Fisica.

ACUSTICA.

99. **Produzione del suono**. — Abbiamo visto, nello studio dei fenomeni elastici, che abbandonando a sè un corpo elastico deformato esso non torna subito alla sua configurazione

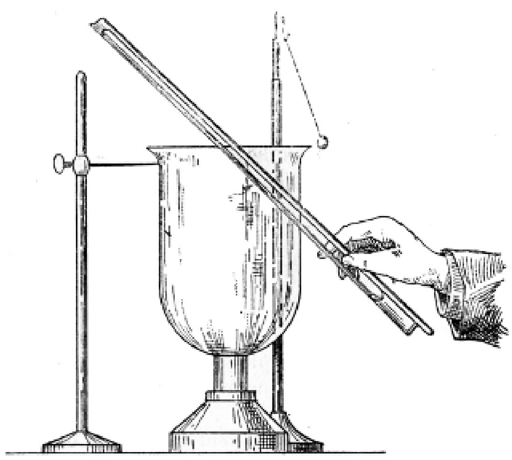


Fig. 78.

normale, ma esegue intorno ad essa delle oscillazioni isocrone più o meno rapide. Quando queste vibrazioni si susseguono in numero compreso tra 16 e 40000 per secondo il nostro orecchio percepisce un suono che dura finchè persistono le vibrazioni della sorgente.

Lo stato vibratorio della sorgente, che *accompagna sempre la sensazione del suono,* può essere reso evidente con l’esperienza rappresentata nella fig. 78. Strofinando la campana con un archetto il pendolino saltella vivamente, proiettato dal corpo vibrante, e insieme il nostro orecchio è colpito da un suono. E così una corda di violino manifesta evidentemente alla vista e al tatto il suo stato vibratorio, quando è eccitata dall’archetto e produce il suono.

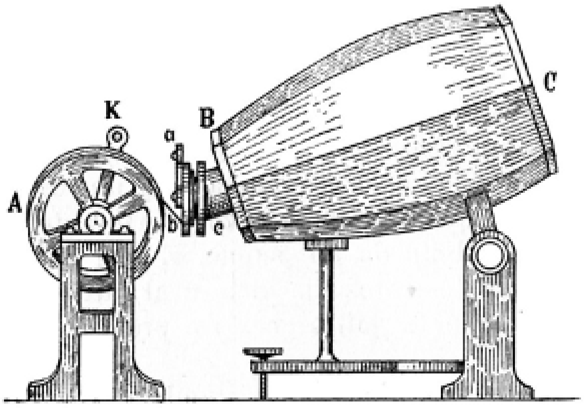


Fig. 79.

La vibrazione della sorgente determina nell’aria ambiente uno stato particolare, sul cui meccanismo torneremo a suo tempo, e che è capace di comunicare a una membrana tesa un moto vibratorio sincrono con quello della sorgente.

Così una membrana tesa nel fondo di una specie d’imbuto, come nella fig. 79, e alla quale è fissata una punta leggiera, entra in vibrazione in vicinanza di un corpo che emette un suono; appoggiando la punta su un cilindro affumicato A mobile elicoidalmente per la rotazione intorno a un asse a vite, le vibrazioni possono essere rilevate dal solco sinuoso che la punta traccia sul cilindro affumicato. Se un simile solco si fa tracciare su un altro cilindro da una punta attaccata al corpo sonoro, si può constatare che le due curve hanno, sensibilmente, la medesima forma.

La nostra sensazione deriva appunto da un movimento vibratorio analogo, sincrono con quello della sorgente, e che è comunicato dall’aria a una membrana disposta nel nostro orecchio (la membrana del timpano) e da questa trasmesso ai nervi sensori.

Ma perchè si abbia la percezione del suono occorre la successione di una serie non interrotta di corpi tra la sorgente e l’orecchio, come l’aria, l’acqua, ecc. Le vibrazioni di un corpo in una campana nella quale sia fatto il vuoto non giungono quasi affatto al nostro orecchio; e il silenzio sarebbe assoluto se non ci fosse affatto aria nella campana, e il corpo sonoro fosse nel suo interno completamente isolato, non esistessero cioè gli altri corpi che lo sostengono.

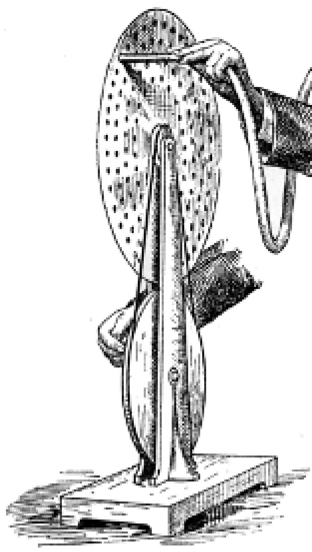


Fig. 80.

Quel particolare stato dell’aria capace di produrre in noi la sensazione del suono può anche essere determinato senza l’intervento di un corpo vibrante. Se, per es., facciamo venire (fig. 80) da un cannello un getto d’aria in presenza di un disco munito di una serie di fori e rotante con una certa velocità, il nostro orecchio avvertirà un suono, e la membrana registratrice, di cui sopra abbiamo parlato, entrerà in vibrazione, cosicchè la punta traccerà tante sinuosità sul cilindro affumicato quanti sono i fori passati nello stesso tempo avanti al cannello. Si intende subito, da questa esperienza, che il getto d’aria proveniente dal cannello, e che può espandersi liberamente in presenza di un foro, mentre è arrestato nelle posizioni intermedie del disco, determinerà una serie di sbuffi periodici, e quindi di compressioni nell’aria circostante, seguiti da altrettante pause; appunto queste compressioni, riproducentisi periodicamente, sono la causa del moto alternativo sincrono della membrana registratrice, e alla causa medesima si dovrà attribuire il suono da noi percepito.

E si intende subito, adesso, che la vibrazione di una ordinaria sorgente sonora determinerà nell’aria una serie di compressioni e rarefazioni, che trasmesse al nostro orecchio producono la sensazione.

100. Ma la propagazione del suono non è istantanea; trascorre invero un tempo apprezzabile perchè il suono giunga al nostro orecchio, dipendentemente dalla distanza che questo ha dalla sorgente.

La **velocità di propagazione del suono** è stata misurata determinando il tempo che passa tra l'istante in cui si vede il lampo prodotto dall'accensione d'un esplosivo, che è contemporaneo con la produzione del fenomeno acustico, e l'istante in cui si avverte lo scoppio; e conoscendo la distanza tra l'osservatore e la sorgente. Si è trovato con questo e con metodi analoghi che il suono si propaga con moto uniforme, che la velocità non dipende dalle *qualità* del suono, (si tratti cioè di uno scoppio o di un suono musicale grave o acuto) e che alla temperatura di 10°, nell'aria, è di circa 340 metri a secondo. Questa velocità, misurata con metodi opportuni, risultò quattro volte maggiore nell'acqua, e molto maggiore nei metalli.

101. Il fatto che il suono non si propaga istantaneamente ci pone in grado di precisare il suo **meccanismo di propagazione.**

Abbiamo visto invero che il suono risulta da una serie di compressioni e rarefazioni determinate dalla sorgente nell'aria, e da questa trasmesse al nostro orecchio.

Supponiamo di essere a 340 metri di distanza dalla sorgente, e che questa esegua 100 vibrazioni complete a ogni secondo. Se il suono si propagasse istantaneamente, l'aria interposta tra noi e la sorgente trasmetterebbe le vibrazioni di questa spostandosi tutta di un pezzo, come un bastone rigido, avanti e indietro. Ma poichè, da quando la sorgente comincia a vibrare, per un minuto secondo noi non sentiamo nulla, e la sorgente ha eseguito cento vibrazioni complete prima che gli effetti giungano a noi, ciò vorrà dire che mentre viaggiava la prima compressione le seguiva dietro una rarefazione, e poi un'altra compressione, e così via; e che perciò l'aria compresa tra noi e la sorgente è divisa come in duecento strati alternativamente compressi e rarefatti, e la centounesima compressione parte dalla sorgente quando la prima giunge a noi. Tutti gli strati d'aria interposti, sollecitati dalle compressioni e dalle rarefazioni che si succedono, vibreranno avanti e indietro come tante membrane, ma siccome son raggiunti in tempi diversi da quelle perturbazioni, perchè disposti a distanze diverse dalla sorgente, non passeranno nello stesso istante per la posizione di riposo, vibreranno cioè con diversa fase.

Saranno nella stessa fase gli strati *contemporaneamente* investiti dalle compressioni *successivamente* inviate dalla sorgente; e perciò la distanza tra due strati consecutivi aventi la medesima fase è percorsa dal suono nel tempo di una vibrazione completa della sorgente. Questa distanza si chiama *lunghezza d'onda*: e nel caso attuale essa è di m. 3,40 poichè in 1/100 di secondo (periodo di vibrazione della sorgente) il suono percorre appunto m. 3,40. Se il periodo fosse T secondo, e la velocità di propagazione V metri a secondo, la lunghezza d'onda λ sarebbe data da

$$\lambda = VT.$$

Tutti i punti disposti a ugual distanza dalla sorgente avranno la stessa fase di vibrazione: essi si trovano su una superficie sferica che ha per centro la sorgente e che è detta *superficie d'onda.*

Il fatto che i diversi strati vibrano con diversa fase può considerarsi, insieme, come effetto e causa del propagarsi delle compressioni e delle rarefazioni. Che sia effetto è evidente, poichè le successive compressioni raggiungono i diversi strati in tempi diversi, e perciò li sollecitano in istanti diversi. Che sia causa si può intendere facilmente osservando che tra due strati i quali si muovono nella stessa fase ce n'è uno che si muove in fase opposta, che perciò va verso la sorgente quando gli altri se ne allontanano e viceversa. Chiamiamo 1° e 3° gli strati in concordanza di fase, e 2° l'interposto. È chiaro che quando la distanza tra il 1° e il 2° diminuisce, quella tra il 2° e il 3° aumenta e viceversa; e che perciò se tra il 1° e il 2° l'aria contenuta va occupando in blocco un volume minore, e viene perciò compressa, quella contenuta tra il 2° e il 3° invece si rarefà.

Adunque tutti gli strati eseguono delle vibrazioni intorno a una posizione fissa, ma ogni strato esegue la sua vibrazione con un ritardo rispetto a quelli che lo precedono, con un anticipo rispetto a quelli che lo seguono — solo gli strati distanti di una lunghezza d'onda oscillano identicamente. — Queste vibrazioni comunicate a una membrana registratrice son la causa del solco sinuoso tracciato dalla punta, e comunicate al nostro timpano son la causa della sensazione sonora.

Resta adesso da spiegare il fatto che una compressione provocata nell’aria con una causa qualsiasi impiega un certo tempo per propagarsi fino agli strati d’aria lontani. Questo ritardo è da attribuire all’inerzia della materia interposta; per chiarire meglio la cosa ci serviremo di un’analogia.

S’immaginino due sfere metalliche allineate, separate da una molla elastica, come nella fig. 81 e si dia un urto brusco, nel senso della freccia, alla sfera A. Questa si metterà in moto comprimendo la molla con cui è in contatto; ma a misura che la molla si contrae essa esercita una forza ritardatrice crescente su A e spinge verso destra la sfera B. A un certo punto la velocità decrescente di A e la crescente di B diverranno uguali, e da allora la molla non si comprime più, e comincia a ridistendersi, diminuendo ancora la velocità di A e aumentando quella di B, fino a che la velocità di A sarà completamente annullata, e tutta la sua forza viva sarà trasmessa a B; cosicchè la prima si arresterà e la seconda si sposterà come se direttamente avesse subito l’urto. Se invece di due sfere se ne hanno una serie, allineate come nella fig. 82, e separate da molle elastiche, un urto impresso alla sfera A si trasmetterà alla B, questa si fermerà comunicando l’impulso alla C e così via di seguito. Si intende subito però che un certo tempo dovrà trascorrere perchè l’impulso pervenga per es. alla sfera L, poichè si deve ripetere il processo di sopra per ciascuna coppia di sfere adiacenti; e ogni sfera prima di mettersi in moto impiegherà un certo tempo dipendente dalla sua massa e dalla forza elastica delle molle; più precisamente si può prevedere che la velocità di propagazione dell’impulso lungo la serie di sfere sarà maggiore quando le molle son più robuste e le sfere più leggiere.

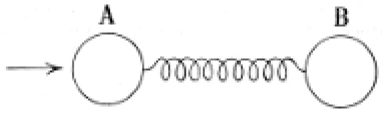


Fig. 81.

Se invece di un unico impulso comunichiamo alla sfera A un moto oscillatorio nella direzione della freccia, anche le altre eseguiranno un moto eguale, ma ciascuna con un certo ritardo rispetto alle sfere precedenti, da cui la perturbazione proviene, e con un anticipo rispetto alle sfere seguenti.

Fig. 82.

Non diverso da questo è il meccanismo per cui da uno strato all’altro dell’aria che circonda la sorgente sonora si propaga il moto vibratorio cui è il suono dovuto. Gli strati dell’aria compiono insieme, per la loro inerzia, e per la reazione elastica offerta alle compressioni, l’ufficio delle sfere e delle molle. E si dimostra anzi nella fisica matematica che la velocità di propagazione delle vibrazioni è data in tal caso dalla formola

$$v = \sqrt{\frac{e}{d}}$$

ove *e* indica il modulo d’elasticità del mezzo (§ 57) e *d* la sua densità. Per i diversi gas e ha lo stesso valore; e perciò la velocità del suono sarà in essi inversamente proporzionale alla radice quadrata della densità, ciò che l’esperienza conferma.

102. — Queste vibrazioni, che si compiono da tutte le parti del mezzo lungo la retta di propagazione si dicono **vibrazioni longitudinali.** Se invece, nella serie di sfere della fig. 82, si fanno eseguire alla sfera A delle oscillazioni in senso perpendicolare alla retta che congiunge i centri, oscillazioni simili, per quanto con fase diversa, saranno eseguite dalle diverse sfere; si hanno allora le **oscillazioni trasversali.** E poichè in tal caso le sfere oscillanti vibrano intorno alla retta che congiunge i centri, e si trovano in qualunque istante a distanze diverse da quella, l’insieme delle sfere non sarà più sopra una retta, come nel caso delle vibrazioni longitudinali, ma sopra una linea curva che si deforma in modo continuo, dando l’apparenza di *qualche cosa* che si propaghi lungo la serie di sfere, di *un’onda* che la percorre.

Questi effetti si possono constatare in un *lungo* tubo di caoutchouc disteso, a un estremo del quale si imprima con la mano un moto oscillatorio, o anche un impulso isolato, nel qual caso un’onda unica percorre il tubo. E come in questa esperienza ogni tratto del tubo non fa che oscillare intorno alla sua posizione di riposo, ma in media rimane al suo posto, e ciò che si propaga da un estremo all'altro non è la materia, ma la forma del pezzo di tubo, così nell'aria, ov'hanno luogo vibrazioni longitudinali, non le sue particelle giungono dalla sorgente al nostro orecchio, ma si propaga da uno strato al successivo lo stato di compressione o di rarefazione.

La retta che unisce la sorgente con un punto colpito direttamente dal suono dicesi *raggio sonoro.* Questo è normale, in ogni punto, alla superficie d'onda, cioè alla superficie sferica che contiene punti nella medesima fase vibratoria.

103. **Riflessione del suono**. — Le onde che giungono sopra un ostacolo solido, come una parete, si *riflettono,* cioè tornano indietro in senso opposto a quello in cui provenivano. Noi non possiamo dare la ragione teorica di questo fatto; ci limitiamo a dimostrarlo sperimentalmente nel caso delle onde elastiche provocate all'estremo di un tubo di caoutchouc che sia tenuto fisso all'altro estremo. Vedremo cioè che ogni onda che parte dal primo estremo si propaga lungo il tubo e giunta all'altro estremo torna indietro come se questo avesse subito dal sostegno uno strappo inverso.

Nel caso del suono tutti i raggi sonori condotti dalla sorgente alla parete tornano adunque nel primo mezzo.

Sia n la parete ed A la sorgente (fig. 83). Un raggio come AO, il quale forma con la normale alla parete OC l'angolo *i* detto angolo d'incidenza, si riflette seguendo OD, formando cioè un angolo di riflessione COD eguale all'angolo di incidenza AOC. Inoltre le tre rette AO, OC, OD giacciono in un piano.

Queste leggi valgono per tutti i raggi incidenti e i corrispondenti raggi riflessi; e noi vedremo nell'Ottica che ciò conduce a una conseguenza importante, che cioè l'insieme dei raggi riflessi è un fascio di raggi divergenti, i quali prolungati passano tutti per il punto A', situato dietro alla parete, e

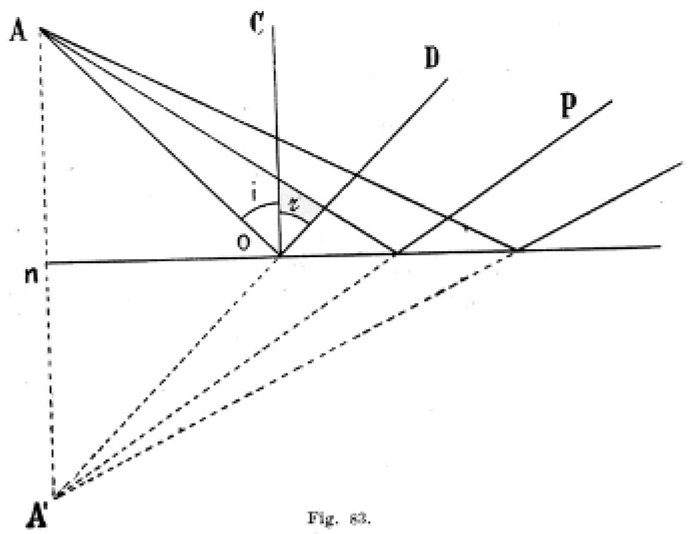


Fig. 83.

simmetricamente disposto con A rispetto alla parete medesima.

Ne risulta che un orecchio collocato in P riceve, oltre ai raggi direttamente provenienti da A, anche quelli che provengono dalla parete e che hanno percorso lo stesso cammino come se fossero partiti da A'. Se perciò si tratta di un suono di breve durata lo sentirà due volte, cioè, oltre all'impressione del suono direttamente percepito da A, avrà l'altra di una ripetizione del suono che giunge da A' in ritardo per la maggiore distanza. È questa la ragione del fenomeno comunemente chiamato *eco*.

Così stando a una certa distanza da una grande parete isolata (per evitare altre riflessioni che complicano gli effetti) e producendo un rumore, questo viene ripetuto dopo un tempo eguale a quello impiegato dal suono per andare e venire dalla parete. Il ritardo sarà, p. es., di 2 secondi se la distanza tra l'osservatore e la parete è di 340 metri.

104. **Caratteri distintivi delle vibrazioni**. — Abbiamo stabilito che il moto vibratorio d'ogni strato d'aria è, a parte il ritardo, la riproduzione fedele del moto della sorgente. Esso può eseguirsi con le più diverse leggi, ma è sempre un moto *periodico,* cioè un moto tale che dopo un certo tempo

costante il mobile ripassa per tutte le posizioni dianzi occupate nello stesso ordine e con la stessa velocità. Un simile moto, rappresentato graficamente coi criteri esposti al § 4, (valutando per esempio lungo l'asse delle ascisse i tempi e lungo l'asse delle ordinate le corrispondenti distanze della particella in. moto dalla sua posizione di riposo), darà luogo a una curva come quella della fig. 84, che potrà avere una forma qualsiasi nel tratto AB, ma si ripeterà identicamente nei tratti successivi BG, CD ecc.

Con le convenzioni fatte la lunghezza AB = BC = CD rappresenta il tempo impiegato dalla particella per compiere una vibrazione completa, e misura perciò il periodo, che è uno dei caratteri che distinguono la vibrazione.

Un altro elemento importante è l'*ampiezza* della vibrazione, rappresentata dall'escursione massima MN; a questa è proporzionale, finchè resta costante il periodo e la forma della vibrazione,

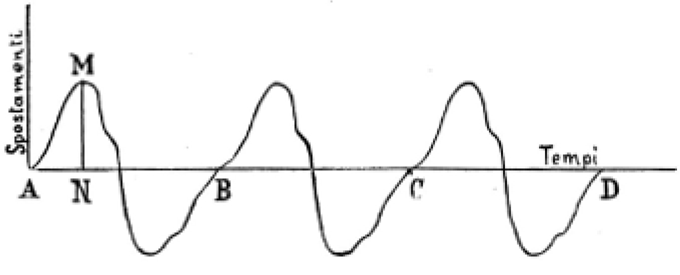


Fig. 84.

la velocità della particella in qualunque istante, poichè è chiaro che se della curva AB si raddoppiassero tutte le ordinate, il nuovo diagramma si riferirebbe a un altro moto vibratorio in cui in qualunque istante la particella percorrerebbe un cammino doppio di quello percorso nel moto rappresentato da AB. All'ampiezza MN è quindi proporzionale la velocità media della particella in un semiperiodo, e al suo quadrato è proporzionale la forza viva media.

Infine un ultimo carattere distintivo riguarda la forma del tratto AB, che può variare secondo le modalità più diverse. Nel caso di un moto oscillatorio *armonico* o *semplice,* qual'è quello del pendolo, la forma del tratto AB è quella detta *sinusoidale* e rappresentata nella fig. 85. Invece per le vibrazioni comunemente eseguite dai corpi sonori la forma è molto diversa. Essa può essere ottenuta registrando, mediante una punta fissata a una membrana e poggiato su un cilindro affumicato, i moti della membrana medesima quando è colpita dal suono, poichè sappiamo che la forma delle vibrazioni eseguite dai vari strati è eguale a quella propria della sorgente, e può essere raccolta con una membrana convenientemente disposta.

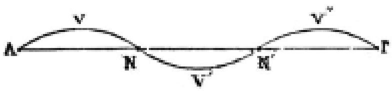


Fig. 85.

Or se noi rileviamo in questo modo i caratteri distintivi delle vibrazioni dovute a suoni diversi e definiti come sopra, cioè periodo, ampiezza e forma della vibrazione, constateremo subito che ai caratteri oggettivi medesimi corrispondono esattamente tre qualità soggettive o psicologiche della sensazione sonora. Al periodo corrisponde l'altezza del suono, cioè quel carattere per cui noi distinguiamo i suoni acuti dai suoni gravi; all'ampiezza corrisponde l'intensità per cui riconosciamo i suoni deboli dai suoni forti; e infine alle diversità di forma della vibrazione corrisponde ciò che si chiama differenza di *timbro* o di *tempera* di due suoni, e che ci fa distinguere, per esempio, una certa nota musicale emessa da una tromba, dalla stessa nota emessa da un violino.

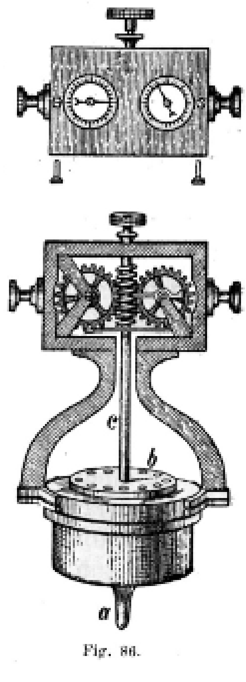


Fig. 86.

105. **Altezza dei suoni**. — Che le note musicali di diversa altezza corrispondano a differenti periodi della vibrazione, e precisamente che i suoni più acuti sian dovuti a vibrazioni più rapide o a periodi minori, può essere dimostrato oltre che con la membrana registratrice, con la sirena di Seebeck (fig. 80) e con quella di Cagniard-Latour.

Con la prima si constata che aumentando la velocità del disco, con che le compressioni nell'aria ambiente si fan più frequenti poichè passa nello stesso tempo avanti al cannello un maggior numero di fori, il suono si fa più acuto; e che a pari velocità, passando da una corona di fori a un'altra, la quale ne contenga un numero diverso, il suono passa bruscamente da un'altezza a un'altra.

Nella sirena di Cagniard-Latour (fig. 86) un disco b, provveduto di una serie circolare di fori e mobile intorno al suo asse geometrico, è disposto sopra una cassa metallica chiusa da un coperchio che ha una serie analoga di fori; le due serie di fori vengono a trovarsi più volte, durante la rotazione del disco, in corrispondenza; e allora l'aria lanciata per mezzo di una soffieria nella cassa si espande nell'ambiente, producendo in questa una compressione. Il getto viene così stabilito a ogni coincidenza dei fori, che ha luogo per esempio 20 volte a ogni giro, se la serie contiene 20 fori.

La rotazione del disco ha luogo automaticamente per un'opportuna inclinazione dei canali onde i fori son costituiti; e le periodiche interruzioni del getto determinano, come nella sirena di Seebeck, un suono ben più forte, la cui altezza è appunto maggiore quando è maggiore la velocità.

Un contagiri, costituito da una vite perpetua che mette in moto una ruota dentata permette di misurare i giri compiuti in un tempo qualsiasi. L'apparecchio si presta perciò alla determinazione del numero di vibrazioni di un suono qualsiasi, ammettendo che due suoni all'unisono corrispondano allo stesso numero di vibrazioni per secondo. Basta perciò regolare la quantità d'aria che viene dalla soffieria, e quindi la velocità del disco, in modo che il suono ottenuto sia all'unisono con quello di cui vuol misurarsi il numero di vibrazioni; poscia misurare il numero di giri che compie il disco in un tempo conosciuto, dividerlo per questo tempo, con che si ha il numero di giri per minuto secondo, e infine moltiplicare per il numero di fori, con che si ottiene il numero di compressioni a secondo prodotte dalla sirena. Esso sarà eguale al numero di vibrazioni complete del suono dato.

Principio di Döppler. — L'altezza apparente del suono emesso da una sorgente la cui distanza dall'osservatore cresce o diminuisce è alquanto diversa da quella propria del suono stesso, quale sarebbe percepita se la sorgente e l'osservatore rimanessero a distanza costante. Supponiamo, per es., che una sorgente in quiete esegua 340 vibrazioni complete al minuto secondo. A un osservatore pure in quiete giungeranno 340 compressioni al secondo, ed esse viaggieranno l'una dopo l'altra a distanza di 1 metro, che è la lunghezza d'onda nell'aria del suono medesimo.

Ma se l'osservatore si *avvicina* verso la sorgente con la velocità di venti metri al secondo, il suo orecchio raccoglierà in un secondo le 340 compressioni di prima, più le altre venti che erano distribuite lungo il cammino da lui percorso, cioè il suono gli apparirà come se fosse di 360 vibrazioni a secondo, ovvero *più acuto.*

L'opposto avverrà se l'osservatore si allontana dalla sorgente.

È questo il *principio di Döppler,* che vale anche se l'osservatore è fermo, e si muove rispetto a lui la sorgente con velocità piccola rispetto a quella del suono [1]. Noi ne possiamo constatare gli effetti; così quando una bicicletta ci passa molto rapidamente a lato e il ciclista fa suonare in modo continuo il campanello, il suono di questo cambia bruscamente d'altezza, divenendo poco più grave, all'istante in cui la macchina, giunta alla minima distanza da noi, comincia ad allontanarsi.

106. **Scala musicale**. — Che due suoni giudicati da un orecchio esercitato come aventi la stessa altezza, o all'unisono, corrispondano ad egual numero di vibrazioni per minuto secondo può essere dimostrato raccogliendo le loro vibrazioni su una membrana autoregistratrice. Stabilito ciò la sirena può servire più comodamente per misurare il numero di vibrazioni corrispondente a un suono qualsiasi. Si può così dimostrare che se tra i due suoni di diverse coppie, qualunque sia il primo, un musicista ritiene che esista lo stesso intervallo musicale, i numeri di vibrazioni hanno un rapporto

[1] Si dimostra che il numero n' di vibrazioni *ricevute* è legato al numero n di vibrazioni *emesse* dalle seguenti formole:

$$n' = n\left(1 + \frac{v}{V}\right); \qquad n' = n\frac{1}{1 - \frac{v}{V}}$$

ove v è la velocità di avvicinamento, e V quella del suono; la prima formola vale quando è in moto l'osservatore, la seconda quando è in moto la sorgente. A pari velocità gli effetti sono perciò, in generale, diversi.

costante per tutte le coppie. Così se due suoni hanno l'intervallo di *un'ottava,* il secondo ha sempre, qualunque sia il primo, il doppio del numero di vibrazioni di questo. All'intervallo di un'ottava corrisponde adunque il rapporto 2 tra i numeri di vibrazioni. In generale se un suono qualsiasi corrisponde al numero di vibrazioni n, la nota che ha con la prima l'intervallo di un'ottava corrisponderà a $2\,n$ vibrazioni; quella che ha l'intervallo di una *quinta,* corrisponde a $\frac{3}{2}\,n$ vibrazioni; la *quarta* a $\frac{4}{3}\,n$, la *terza* a $\frac{5}{4}\,n$, la *seconda* a $\frac{9}{8}\,n$, la *sesta* a $\frac{5}{3}$ n e la *settima* a $\frac{15}{8}\,n$. In generale sono *più consonanti* gli accordi che hanno il rapporto più semplice tra i numeri di vibrazione.

Esiste una branca di Scienza, la Fisica Musicale, che studia a fondo le relazioni fra i caratteri oggettivi delle vibrazioni sonore e le impressioni estetiche relative; ma noi non possiamo addentrarci in simili considerazioni, che richiedono per essere intese nel loro intimo spirito attitudini e conoscenze musicali non a tutti comuni.

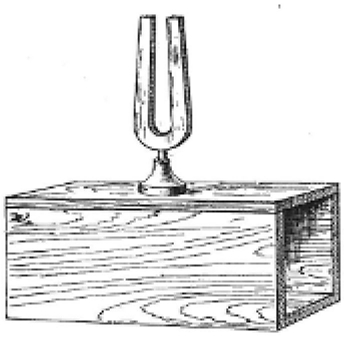


Fig. 87.

E così accenneremo di volo che per accordare tutti gli strumenti dei diversi paesi sulla medesima scala, il che risponde a una vera esigenza pratica e artistica, una Conferenza internazionale a Vienna stabilì che la nota detta *la* della 3ª ottava (corrispondente al suono della seconda corda del violino) debba essere identica a quella emessa dal *corista normale,* cioè da una forchetta di acciaio a due branche (fig. 87), che esegue esattamente 435 vibrazioni complete al secondo. — Il corista prototipo per l'Italia è conservato nell'Istituto Fisico dell'Università di Roma.

107. **Intensità del suono.** — Abbiamo già detto che i suoni più intensi son quelli la cui ampiezza di vibrazione è maggiore; ma tra l'ampiezza e la sensazione la legge di relazione (di natura psicologica) è tutt'altro che semplice.

Limitiamoci a definire, dal punto di vista oggettivo, l'intensità del moto vibratorio come proporzionale alla forza viva media di una determinata massa d'aria vibrante; si dimostra allora che essa è proporzionale anche alla media dei quadrati delle velocità e quindi al quadrato dell'ampiezza, a parità delle altre condizioni.

L'intensità così definita dipende evidentemente dalla distanza a cui si trova la sorgente; e si dimostra che essa è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dall'origine sonora. Una dimostrazione rigorosa ed elementare di questa legge non è facile a dare.

La legge è in difetto quando intervengono delle riflessioni, con che i fenomeni si complicano moltissimo. Se per esempio il suono si propaga entro un tubo metallico, esso si attenua molto lentamente aumentando la lunghezza del tubo. Si spiega così il modo di funzionare dei *tubi-parlanti* che facilitano tanto, nei limiti di un edificio, la trasmissione della voce.

108. **Composizione delle vibrazioni**. — È frequentissimo il caso che in un punto dell'aria giungano insieme diversi moti vibratori provenienti da due o più sorgenti sonore diverse. Il principio della composizione dei movimenti permette di risolvere i casi più complicati, poichè la posizione assunta da ciascuna particella, soggetta a diversi spostamenti che tendono a prodursi contemporaneamente, sarà in ogni istante quella che le spetterebbe se i diversi spostamenti si effettuassero l'uno dopo l'altro. La regola grafica da applicare è perciò la stessa di quella che ci servì per la composizione delle forze.

Sono particolarmente interessanti alcuni casi.

Supponiamo che i moti vibratori componenti provengano nel punto C dai punti A e B, situati su un'unica retta con C, e dalla stessa parte del punto di arrivo (fig. 88).

Fig. 88.

Siano inoltre eguali i periodi dei due suoni, e abbiano questi la stessa fase all'origine, cioè le sorgenti A e B vibrino identicamente. Sappiamo che per effetto di ciascuno dei moti vibratori il punto C entrerà in oscillazione, con un certo ritardo rispetto alla sorgente; e questo ritardo sarà diverso per i suoni provenienti da A e B, poichè è diversa la distanza da C; precisamente il suono proveniente da A dovrà percorrere in più il cammino AB. Se lo spazio AB comprende un numero intero di lunghezze d'onda, sappiamo che una compressione partente da A giunge in B quando da A parte un'altra compressione, e perciò quando una compressione parte pure da B, che vibra sincronicamente con A. A destra di B si propagheranno, coincidenti, le compressioni proprie di B e quelle provenienti da A, senza differenza di fase; e lo stesso può dirsi delle rarefazioni che le seguono a mezza lunghezza d'onda di distanza. Gli effetti si sommeranno, e il punto C sarà animato da un moto vibratorio di ampiezza eguale alla somma di quelle che sarebbero prodotte separatamente dai suoni componenti.

Che se, invece, la distanza AB comprendesse un numero intero di lunghezze d'onda più una metà di quella lunghezza, allora una compressione giungerebbe in B da A, quando da A prende origine una rarefazione, e perciò quando anche da B parte una rarefazione. Viaggieranno così lungo BG, in coincidenza, una compressione proveniente da A e una rarefazione proveniente da B; esse si attenueranno a vicenda, e se l'ampiezza delle due vibrazioni componenti è la stessa in G, questo punto resterà in riposo in tutti i momenti. A questo fenomeno per cui la sovrapposizione di due suoni genera il silenzio si dà il nome *d'interferenza*: esso ha luogo quando i due suoni, della stessa fase e ampiezza all'origine, hanno percorso un diverso cammino, cosicchè la differenza comprenda un numero intero più mezza lunghezza d'onda.

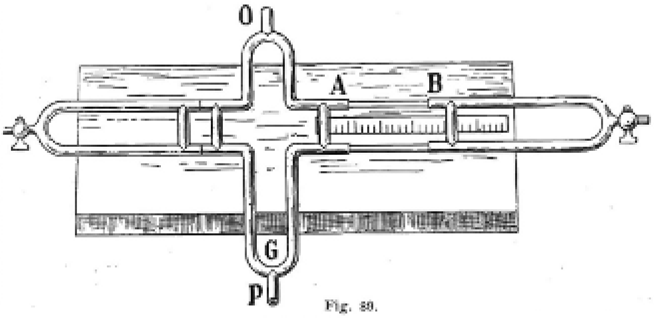


Fig. 89.

Se ne può dare una dimostrazione sperimentale con l'apparecchio della fig. 89, nel quale la sorgente sonora, unica, è disposta avanti a P e il suono da quel punto segue due vie diverse, rappresentate dai due tubi che si biforcano da P e si ricongiungono in O. La propagazione lungo i tubi, malgrado le innumerevoli riflessioni sulle pareti, ha luogo con lo stesso meccanismo che all'aria libera; si susseguono cioè delle compressioni e rarefazioni con l'intervallo di mezza lunghezza d'onda. Or finchè i due cammini sono eguali, o differiscono di un numero intero di lunghezze d'onda, i suoni provenienti dai due rami si rinforzano in 0; se invece i due cammini differiscono di

$$\frac{1}{2}, \text{ o di } \frac{3}{2} = 1 + \frac{1}{2}, \text{ o di } \frac{5}{2} = 2 + \frac{1}{2}$$

ecc. lunghezze d'onda, in O i due suoni si annullano e si ottiene quasi il silenzio. Se la sorgente è costituita dal corista normale di 435 vibrazioni al secondo la sua lunghezza d'onda sarà, nell'aria a 10°,

$$\lambda = V \times T = 34000 \text{ cm.} \times \frac{1}{435} = 78{,}2\,cm.$$

109. **Onde stazionarie**. — Supponiamo ora che i due suoni provenienti da A e B si sovrappongano in un punto C compreso tra loro (fig. 90), provenendo così da bande opposte (*composizione di moti vibratori che si propagano in senso opposto*), ed essi abbiano sempre fase coincidente all'origine [2]. Allora la differenza dei cammini percorsi sarà AC — BC, e se questa differenza è di un

Fig. 90.

[2] Si suppone inoltre che le vibrazioni si propaghino lungo la retta AB senza indebolimento notevole con la distanza, come avverrebbe entro un tubo metallico.

numero intero di lunghezze d'onda, in C si avrà movimento rinforzato. Ma se invece di C consideriamo il punto C', distante da C di 1/4 di lunghezza d'onda, la differenza sarà

$$AC' - BC' = \left(AC - \frac{1}{4}\lambda - \left(BC + \frac{1}{4}\lambda \right) = AC - BC - \frac{1}{2}\lambda\right.$$

cioè sarà quella di prima alterata di $\frac{1}{2}$ lunghezza d'onda, cosicchè se in C c'era movimento d'ampiezza doppia, in C' si avrà quiete; e si avrà moto come in C nel punto C'' che dista da C' di 1/4 di lunghezza d'onda e da C di ½ lunghezza d'onda.

Adunque nello spazio interposto tra A e B si produrrà un fenomeno singolare: alcuni punti come C, C'' ecc. oscilleranno con ampiezza doppia, altri come C' resteranno continuamente in riposo. Si dà a queste onde che esistono tra A e B il nome di *onde stazionarie;* e si chiamano *ventri* i punti ove le oscillazioni sono esaltate, e *nodi* quelli ove le oscillazioni si annullano ottenendosi il riposo.

Com'è facile riconoscere tra due nodi o tra due ventri consecutivi c'è la distanza di mezza lunghezza d'onda; tra un nodo e un ventre consecutivi un quarto di lunghezza d'onda.

Si dimostra inoltre che l'ampiezza di vibrazione varia lentamente da punto a punto, diventando massima ai ventri, minima ai nodi; ma per tutti i punti compresi tra due nodi la fase è la stessa, cioè le particelle passano tutte insieme per la posizione di riposo.

Fig. 91.

Fig. 92.

Fig. 93.

Si noti che nelle onde *progressive* la vibrazione ha in tutti i punti la stessa ampiezza, e da punto a punto cambia la fase; invece nelle onde *stazionarie* la fase è identica tra due nodi, per tutti i punti, e da punto a punto cambia l'ampiezza. Al di là e al di qua di un nodo la fase è opposta.

Queste proprietà, che valgono tanto per le onde longitudinali che per le trasversali, si posson dimostrare con un tubo di caoutchouc tenuto in mano a un estremo e fissato al muro all'altro estremo. Producendo con la mano una serie di oscillazioni periodici le, queste si propagano fino all'estremo fisso, tornano indietro da questo e si compongono con quelle che continuano a provenire dalla mano. Si vede allora che il tubo oscilla, a seconda della rapidità delle vibrazioni della mano, assumendo la forma delle fig. 91, 92, 93, dividendosi cioè in uno, due, tre fusi o più, limitati dai nodi; e che inoltre due volte a ogni periodo *tutte* le sezioni del tubo passano *insieme* per la posizione di riposo, ed esso assume perciò la forma diritta.

110. **Vibrazioni delle corde**. — Una corda tesa fissata rigidamente agli estremi, e pizzicata in un punto, diviene la sede di ondulazioni che partono dal punto eccitato, si riflettono agli estremi e viaggiano così nei due sensi. Si dimostra che in tal caso devon prodursi onde stazionarie, e precisamente quelle che consentono la formazione di due nodi agli estremi, cioè la cui lunghezza di onda, divisa a metà, è contenuta un numero esatto di volte nell'intera lunghezza della corda. Corrisponde ad esse, come nel caso del tubo di caoutchouc, la suddivisione dell'intera corda in uno, due, tre o più fusi; e così se la corda è lunga 50 cm., si potranno avere le vibrazioni corrispondenti alle lunghezze d'onda:

$$50 = \frac{1}{2}\lambda, \text{ cioè } \lambda = 100$$
$$50 = \frac{2}{2}\lambda', \text{ cioè } \lambda' = 50 = \frac{\lambda}{2}$$
$$50 = \frac{3}{2}\lambda'', \text{ cioè } \lambda'' = 33{,}3 = \frac{\lambda}{3}$$
ecc.

I suoni relativi hanno numeri di vibrazioni inversamente proporzionali alle lunghezze d’onda, poichè

$$\lambda = VT = \frac{V}{n}$$

ovvero

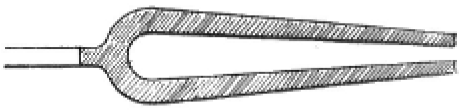
$$n = \frac{V}{\lambda}$$

e perciò i diversi numeri di vibrazione staranno tra loro come la serie dei numeri 1, 2, 3, 4 ecc. Questa serie di suoni è detta serie degli *armonici* del suono fondamentale, che corrisponde alla prima lunghezza d’onda (100 nel caso presente).

II suono fondamentale dipende dalla natura della corda, dalle sue dimensioni e dalla tensione cui è sottoposta; e così diviene più acuto a misura che la lunghezza della corda si fa più piccola, avvicinando gli estremi cui è fissata. È per questo che negli strumenti a corda, come nel violino, accorciando più o meno col dito una corda, se ne possono cavare suoni di altezza diversa.

In realtà il suono fondamentale, reso da una corda pizzicandola o eccitandola in un punto qualsiasi, è il predominante, ma non è il solo: lo accompagnano, come si è visto, tutti i suoni della serie armonica, con intensità alquanto più piccole. Vedremo che dalla fusione del suono fondamentale coi suoi armonici ha origine una forma non semplice della legge di vibrazione (§ 104) e quindi il timbro del suono ottenuto.

111. **Risonanza.** — Qualunque corpo capace di vibrare, messo in presenza di un corpo vibrante, subisce la sua azione, cioè l’effetto delle successive compressioni e rarefazioni, ed esegue delle oscillazioni, dette *forzate*; è questo il caso delle membrane autoregistratrici di cui abbiamo più volte fatto parola. Ma quando il corpo influenzato è capace di emettere, se direttamente eccitato, un suono proprio di altezza determinata, allora le vibrazioni forzate cui esso può dar luogo per virtù di un altro suono riescono in generale insensibili, e diventano invece molto energiche qualora il periodo del suono influenzante è molto prossimo, o coincidente col periodo *proprio* del corpo. A questa sovreccitazione delle vibrazioni del secondo corpo si dà il nome di *risonanza.*



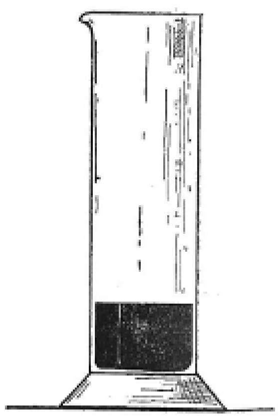


Fig. 94.

Noi ce ne possiamo rendere ragione nel modo che segue.

Sia A il corpo vibrante, e B un corpo in quiete capace di vibrare all’unisono. La prima compressione che giunge in B lo sposta alquanto dalla configurazione di riposo, e quando esso per la propria elasticità tende a tornarvi interviene, al tempo giusto, la rarefazione partita subito dopo da A e ne esalta il moto in senso inverso. Similmente agiscono le successive compressioni e rarefazioni partenti da A, poichè incontrano il corpo B nel momento più adatto per ampliarne il movimento, dato il sincronismo delle oscillazioni proprie di B e delle vibrazioni che riceve da A. A un certo punto l’ampiezza di B diviene costante; ciò ha luogo, come è evidente, quando l’energia che B riceve da A è uguale alla somma delle energie che B diffonde nell’intorno, e che dissipa dentro di sè per le sue imperfezioni elastiche.

Sperimentalmente il fenomeno della risonanza può essere dimostrato mettendo in presenza due corde tese, e accordandole all'unisono. Sull'una si disporranno dei pezzettini di carta a cavalcioni, e si pizzicherà l'altra col dito. La prima entrerà tosto in vibrazione, come è provato dal fatto che i cavalletti di carta saltellano vivamente; invece essi restano sensibilmente in quiete se si altera l'altezza del suono di una delle corde, col modificarne per esempio la tensione, e si disturba quindi il sincronismo.

Un'altra esperienza molto istruttiva è la seguente. Avvicinando un diapason a una provetta piuttosto lunga (fig. 94) il suono del primo sarà, in generale, rinforzato in modo appena sensibile. Ma se si versa dell'acqua nella provetta in modo da ridurre la lunghezza della colonna d'aria in essa contenuto, a un certo punto il suono viene fortemente rinforzato. Accorciando ancora la colonna l'effetto torna a sparire.

Or nelle condizioni per cui il suono è rinforzato è facile dimostrare che la colonna d'aria ha un suono proprio identico a quello del corista, come si può provare, in certa guisa, soffiando contro l'orlo del tubo, ma come è più esattamente dimostrato dalle seguenti considerazioni.

Una colonna d'aria, come quella contenuta in una provetta, può esser sede di *onde stazionarie,* come una corda, per la composizione delle onde che scendono con quelle che risalgono dopo la riflessione sul fondo. Ma mentre nel caso della corda potevan formarsi solo quelle onde stazionarie che consentivano la produzione di due *nodi* agli estremi, nel caso del tubo possono stabilirsi solo quelle cui spetta un nodo nel fondo, ove l'ultimo strato di aria non può vibrare, e un ventre all'estremo aperto, ove l'aria può oscillare liberamente.

E poichè tra un nodo e un ventre consecutivi la distanza è di un quarto di lunghezza d'onda, la lunghezza della colonna d'aria deve essere o $\frac{1}{4}\lambda$, o $\frac{3}{4}\lambda$, o $\frac{5}{4}\lambda$, in generale un numero dispari di quarti d'onda; poichè, se fosse pari, si ridurrebbe a mi numero intero di mezze lunghezze d'onda, e agli estremi si avrebbero *insieme* o due ventri o due nodi, e non un ventre e un nodo.

Si potranno quindi anche nel tubo determinare onde stazionarie corrispondenti a numeri *diversi* di vibrazioni, ma non a numeri *qualsiasi*; e precisamente, stabilito il suono fondamentale, si potranno ottenere il 3°, il 5°, il 7° armonico e così di seguito per tutti quelli di posto dispari.

Quanto al fondamentale, esso deve avere tale lunghezza di onda che un quarto di questa sia eguale alla lunghezza della colonna d'aria. Or appunto, nell'esperienza della fig. 94, si può constatare che quando il corista vibrante messo avanti alla bocca della provetta è il corista normale, e prova il massimo rinforzo, la colonna d'aria è alta poco meno di 20 centimetri, cioè è precisamente 1/4 della lunghezza d'onda nell'aria del suono del corista (§ 108).

Quest'esperienza adunque prova che la colonna d'aria, capace di produrre un suono di egual periodo, entra in vibrazione per risonanza col diapason, e nell'aria ambiente i due suoni si sommano causando il rinforzo. La cassetta di legno su cui si suole fissare il diapason (fig. 87) ha appunto la funzione di rinforzarne il suono, per risonanza dell'aria contenuta; e una funzione analoga hanno le casse in legno degli strumenti musicali a corda, le quali, per la forma complicata, son capaci di rinforzare, più o meno, tutti i suoni dallo strumento prodotti.

In verità qualche altra osservazione è necessaria, poichè potrebbe sembrare strano che mentre il solo corista si sente appena o non si sente affatto, l'intervento della provetta il cui suono è *effetto* del primo lo renda tanto più intenso da esser percepito facilmente anche in una grande sala; l'effetto apparisce troppo sproporzionato alla causa. Si noti però che il principio della conservazione dell'energia non è per nulla compromesso, poichè mentre il solo corista, una volta eccitato, è capace di conservare a lungo le sue vibrazioni e comunica all'aria una lieve energia vibratoria, ma per un tempo rilevante, la presenza della provetta aumenta moltissimo l'energia vibratoria dell'aria, ma il suono è di assai più breve durata; il che ha poi l'altro effetto che dell'energia impressa al corista nell'eccitarlo una parte minore si dissipa in esso per isteresi elastica.

In realtà bisogna tener presente che il lavoro eseguito per deformare un corpo elastico, se questo fosse privo d'isteresi e fuori della presenza dell'aria, si localizzerebbe eternamente nel corpo assumendo alternativamente la forma di forza viva, quando le particelle vibranti hanno la massima velocità, e di energia potenziale elastica, quando le particelle hanno per un istante la velocità zero e il corpo la massima deformazione. A causa dell'isteresi, e in presenza dell'aria, una frazione molto piccola di quella energia viene a ogni oscillazione trasformata in calore nel corpo e irradiata come energia vibratoria nell'aria ambiente. La presenza della provetta, capace di vibrare per risonanza, ha per effetto di aumentare l'energia che il corista cede all'aria a ogni oscillazione, e perciò di esaurire più rapidamente l'energia primitiva ad esso comunicata nell'eccitazione.

Si intravede da questo che poichè con una lievissima spesa d'energia noi possiamo ottenere da un corpo sonoro, per un tempo notevole, l'emissione di un suono sensibile, l'orecchio ha la virtù di rivelare l'arrivo di minime quantità di energia vibratoria per minuto secondo, cioè di minime *potenze.*

112. **Tubi sonori**. — Come abbiamo veduto una colonna d'aria, chiusa a un estremo, è capace di rinforzare la serie degli armonici dispari di un certo suono fondamentale, la cui lunghezza di onda è quadrupla di quella della colonna.

Si vedrebbe similmente che una colonna d'aria libera di vibrare alle sue estremità, come quella di un tubo aperto ai due estremi, risuonerà per tutti i suoni che consentono la formazione di due ventri agli estremi, e quindi avrà per fondamentale, come una corda, il suono la cui lunghezza d'onda è doppia della lunghezza del tubo.

Questo suono, a pari lunghezza di tubo, è perciò l'ottava alta di quello che spetta alla canna chiusa a un estremo; quanto agli altri che la canna aperta può rinforzare, essi costituiscono, come per le corde, l'intera serie armonica del fondamentale.

Se adunque in presenza della canna, aperta o chiusa, si produce un *rumore continuo*, cioè un miscuglio di moltissimi suoni tra cui si trovino quelli che la canna potrà rinforzare, essi, ed essi soltanto, saranno vivamente rinforzati, e più di tutti il fondamentale. La canna emetterà un suono, accompagnato dalla serie dei suoni armonici, più o meno sensibili, e l'insieme avrà per altezza quella del fondamentale. È così che funzionano, per esempio, le canne d'organo, il flauto ecc.

In questi strumenti una lamina d'aria, lanciata da un mantice o dalle labbra, si infrange contro un orlo tagliente, producendo un miscuglio di suoni svariati debolissimi, che l'orecchio percepirebbe come un rumore. Una canna aperta, connessa con l'orlo tagliente, rinforza i suoni che le sono propri.

Nel flauto una serie di buchi opportunamente disposti, e che possono aprirsi o chiudersi con le dita o con le chiavette, permettono di variare la lunghezza della colonna d'aria risonante, e quindi l'altezza del suono prodotto.

Si può inoltre, regolando la intensità del soffio, ottenere che la canna non rinforzi il fondamentale, ma il secondo armonico, o il terzo e così via; cosicchè diversi suoni possono essere ottenuti con la stessa lunghezza della colonna d'aria. Questo avviene più facilmente nelle canne sottili, e poichè allora la canna si divide in più fusi, e contiene perciò diversi nodi e ventri di vibrazione, il suono non è alterato aprendo un buco che corrisponda a un ventre.

Si noti infatti che al di qua e al di là di un nodo (§ 109) la fase del moto vibratorio è opposta, e perciò gli strati si muovono in senso inverso, avvicinandosi o allontanandosi insieme dallo strato nodale. Avremo così delle compressioni e delle rarefazioni stazionarie, e la pressione varierà periodicamente intorno al nodo, resterà costante intorno a un ventre, ove gli strati si muovono con la stessa fase. L'apertura della canna in un ventre di vibrazione non apporterà perciò nessuna perturbazione, poichè ivi l'aria ha costantemente la pressione atmosferica.

Su principi alquanto più complicati si fonda il funzionamento degli strumenti *ad ancia,* nei quali una laminetta, disposta avanti una fessura, apre e chiude periodicamente, con le sue vibrazioni elastiche, la fessura medesima, determinando, come nella sirena, dei getti d'aria periodicamente interrotti.

113. **Battimenti**. — Quando interferiscono due suoni la cui differenza tra i numeri di vibrazione è di poche unità per secondo, ha luogo un periodico rinforzo e indebolimento dell'intensità del suono risultante; a questi rinforzi intermittenti di suono, che hanno per periodo la differenza tra i due numeri di vibrazione, si dà il nome di battimenti. Si possono constatare facilmente con due canne d'organo che non siano perfettamente all'unisono.

Per intenderne la ragione si pensi a due sorgenti sonore capaci di produrre l'una 100 e l'altra 101 vibrazioni a secondo. Se a un certo istante le due vibrazioni hanno la medesima fase, dopo mezzo secondo esse saranno in opposizione, poichè in questo tempo la prima avrà compiute 50 oscillazioni intere e l'altra 50 e mezza. I due suoni perciò si rinforzeranno nel primo istante, si attenueranno dopo mezzo secondo, si torneranno a rinforzare dopo un secondo e così via; ed è chiaro che si avrà un rinforzo a ogni minuto secondo.

Se la differenza tra i numeri di vibrazione diviene un po' troppo grande, l'orecchio non distingue più i battimenti in modo distinto, per la loro rapidità, e si ha una specie di rullo. La sensazione è piuttosto spiacevole quando la differenza aumenta ancora, fino a che, raggiungendosi l'intervallo di terza, di quarta, di quinta, di sesta e d'ottava, l'insieme dei due suoni costituisce l'*accordo consonante,* dal quale l'orecchio ricava un'impressione gradevole, più che da una nota sola.

114**. Composizione di diversi suoni armonici del fondamentale. Suoni semplici e composti**. — Se si compongono diverse vibrazioni semplici, aventi i numeri di vibrazioni *n, 2n, 3n, 4n* ecc., si ottiene un moto vibratorio di forma complessa, ma anch'esso periodico; poichè dopo una vibrazione completa del primo se ne saranno compiute un numero intero per gli altri, e precisamente nel tempo di una vibrazione del primo se ne avranno esattamente 2, 3, 4 ecc., per i successivi. Si riprodurrà quindi, dopo una vibrazione del primo, la stessa legge di vibrazione, e anche questa sarà perciò periodica, col periodo del suono fondamentale. La forma del moto risultante, quale può essere ricavata con l'esperienza per mezzo della membrana autoregistratrice, dipende dal numero, dall'intensità e dalla fase rispettiva dei suoni armonici presenti.

Di questa proprietà è vera la reciproca, come fu dimostrato matematicamente da Fourier. Ciò significa che qualunque vibrazione periodica di forma qualsiasi può essere decomposta, e in un modo solo, in una serie di vibrazioni semplici corrispondenti alla serie armonica di un fondamentale, che ha per periodo quello della vibrazione data.

Dire perciò che due suoni non hanno la stessa legge di vibrazione (come può risultare dalle curve ricavate con la membrana autoregistratrice) equivale a dire che essi non sono semplici, e che risultano dalla sovrapposizione delle corrispondenti serie di armonici ma in proporzioni diverse. A questo carattere della vibrazione corrisponde, come noi abbiamo già enunciato, la differenza di *tempera,* o *timbro,* o *metallo* dei due suoni. In realtà, tolto il diapason, che vibra con *legge sinusoidale* e che emette perciò un suono semplice, gli altri strumenti eseguono oscillazioni periodiche, ma di forma complicata, il che corrisponde al fatto che i suoni emessi devono adattarsi alla condizione di produrre dei nodi e dei ventri in regioni stabilite del corpo vibrante, e che questa condizione è soddisfatta, in generale, dalla serie dei suoni armonici.

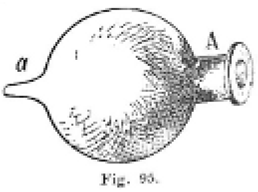


Fig. 95.

La presenza di questi suoni armonici, che l'orecchio non arriva a separare, ma che percepisce nella sensazione d'insieme, (il timbro), può essere dimostrata coi risonatori di Helmholtz (fig. 95) i quali, come il tubo della fig. 95, son capaci di rinforzare un suono determinato, a seconda delle dimensioni; e perciò, impegnati nell'orecchio, rinforzano il suono proprio fino a coprire gli altri.

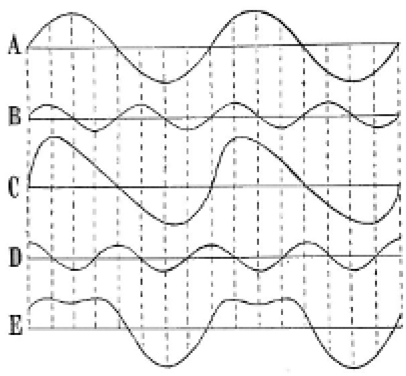


Fig. 96.

Si può con una collezione di questi apparecchi far l'*analisi* di un suono qualsiasi, riconoscendo le intensità degli armonici presenti. Riuscì a Helmholtz anche l'esperienza inversa, poichè fondendo insieme, in opportune proporzioni, diversi suoni semplici emessi da una serie armonica di diapason, potè riprodurre il timbro del suono precedentemente analizzato. Questa analisi può eseguirsi col calcolo, rilevando nei modi indicati la curva che rappresenta la legge vibratoria del suono in esame, e calcolando le proporzioni degli armonici con le regole deducibili dalla legge di Fourier. Il problema è reso più facile dal fatto, rivelato dalla esperienza, che mentre la fase dei suoni componenti influisce sulla forma della vibrazione risultante, non ha invece alcun effetto sull'impressione che riceve il nostro orecchio, e quindi sul timbro del suono. Così la vibrazione C (fig. 96) risulta dalia composizione di A e di B, di cui la seconda è l'ottava della prima con differenza di fase zero all'origine; mentre la vibrazione E risulta dalle componenti A e D, di cui la D è dello stesso periodo di B, ma con la fase spostata (all'origine) di ¼. Orbene: le vibrazioni C e E sono di forma ben diversa, ma non vi corrisponde, secondo Helmholtz, alcuna differenza di timbro.

L'orecchio non ha la semplice funzione di decomporre le onde sonore incidenti nelle rispettive onde sinusoidali o nei corrispondenti suoni semplici. Se così fosse al suono di una corda di violino corrisponderebbe la sua decomposizione negli armonici, e non l'impressione *sintetica* che ci fa riconoscere quel suono da quello di eguale altezza emesso, per esempio, da un flauto. Ma l'orecchio è purtuttavia dotato di *potere risolutivo,* poichè nella farragine di suoni che vi arrivano da ogni parte, fondendosi in un complesso sistema di onde sonore, noi sappiamo distinguere a occhi chiusi i suoni provenienti da diverse sorgenti. La spiegazione di questa meravigliosa proprietà dell'orecchio, che è insieme analitica e sintetica, entra nel campo della psicologia; ma è necessario avvertire che le spiegazioni più comuni non sono del tutto soddisfacenti.

115. **Fonografo**. — Abbiamo stabilito che una membrana distesa nell'aria partecipa fedelmente al moto vibratorio di questa, provocato dalla sorgente sonora, e può registrare mediante una punta mobile su un cilindro affumicato la forma della vibrazione.

Si ha con ciò il *fonautografo* di Scott (fig. 79).

Edison ebbe la felice idea di far scorrere avanti alla punta scrivente, connessa alla membrana, un cilindro di una sostanza plastica, nella quale la punta per le sue vibrazioni si affonda più o meno, tracciandovi così un solco più o meno profondo, che ha per *profilo* la curva rappresentante il moto vibratorio della lamina.

Se adesso si riporta la membrana e la punta all'origine del solco, si imprime al cilindro il medesimo moto, e si esercita una lieve pressione sulla punta, per mezzo della membrana, in modo da costringere quella ad affondarsi nel solco già tracciato, allora durante il moto del cilindro la punta rifarà tutti i movimenti di prima, li comunicherà alla membrana, e questa determinerà nella aria, ambiente la stessa serie di compressioni e di rarefazioni che si seguirono durante la registrazione del suono. Il suono sarà così riprodotto nei suoi più minuti particolari, tanto più fedelmente quanto più esattamente le nuove vibrazioni della membrana saranno eguali alle primitive.

Se il cilindro si muove, nella riproduzione, più lentamente, lo stesso numero di vibrazioni si svilupperà in un tempo più lungo, e il numero di vibrazioni per secondo di tutti i suoni sarà abbassato nello stesso rapporto, conservandosi il loro intervallo *musicale* relativo; e quindi si risentirà la stessa melodia in una tonalità più grave. Quest'esperienza può essere fatta molto facilmente ed è assai istruttiva.

Quanto ai particolari di costruzione dello strumento, e specialmente a quelli che lo hanno reso così diffuso e perfezionato negli ultimi tempi, è meglio rimettersi alla conoscenza comune che ormai tutti ne abbiamo.

116. **L'organo vocale e l'orecchio** sono descritti, in sede più propria, nel Corso di Scienze naturali. Noi ci limiteremo a dire, quanto al primo, che esso agisce come un tubo ad ancia; questa è costituita dalle corde vocali, tese più o meno entro la laringe da muscoli opportuni, che lasciano tra loro una stretta fenditura, la glottide, da cui passa l'aria spinta dai polmoni.

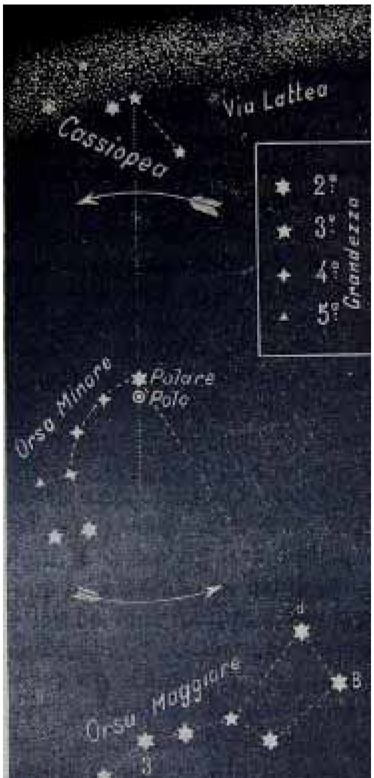
I limiti della voce umana si estendono da 82 vibrazioni (il *mi* della voce di basso) a 1044 vibrazioni (il *do* del soprano).

Per l'orecchio diremo che le onde sonore, raccolte dal padiglione e incanalate nel condotto auditivo, mettono in vibrazione la membrana del timpano, e questa le trasmette, attraverso la catena degli ossicini, alla finestra ovale, e quindi al liquido del labirinto, ove son percepite dalle estremità natanti del nervo acustico.

I particolari psicologici del meccanismo dell'audizione, malgrado gli studi potenti del celebre Helmholtz, non sono ancora conosciuti in modo soddisfacente.

COSMOGRAFIA.

117. **Sfera celeste. Stelle**. — L’aspetto del cielo in una notte stellata è quello di un’immensa superficie sferica, della quale vediamo solo una parte, e su cui son disseminati gli astri. Il limite della parte osservabile è dato da una linea accidentata, la quale segue il contorno della Terra che ci circonda, coi suoi edifici e con le sue montagne; la si chiama *orizzonte sensibile.* Portandoci sempre più in alto, in modo che quella linea si allontani a grandissima distanza, essa diviene all’incirca una circonferenza ove pare che si tocchino la superficie celeste e gli estremi della Terra visibile. Questa circonferenza può considerarsi come l’intersezione della sfera celeste con il piano orizzontale condotto per il luogo d’osservazione; prende il nome di *orizzonte vero.* Se poi dal luogo medesimo si guida una retta verticale indefinita, essa incontrerà la sfera celeste in due punti: quello situato sopra di noi è il *zenit;* l’opposto, a noi invisibile, è il *nadir.* La sfera celeste sembra abbia per centro il luogo d’osservazione, cosicchè l’orizzonte vero è un suo cerchio massimo e i due punti zenit e nadir sono diametralmente opposti.



Gli astri sono di due specie. La quasi totalità di essi partecipano a un movimento complessivo per cui tutta la sfera celeste ruota lentamente intorno a noi; ma in questo movimento le stelle conservano la loro mutua posizione, come se fossero rigidamente infisse sulla sfera muoventesi. Sono queste le *stelle fisse.*

Altre invece, in numero molto limitato, mutano di posizione rispetto alle stelle fisse, cosicchè, considerato il moto di queste come dovuto a quello dell’intera sfera, si deve ritenere che le stelle erranti si muovono sopra la sfera. Appartengono a questa categoria il *sole,* la *luna,* i *pianeti* e le *comete.* Altre differenze sono facilmente constatabili tra questi astri e le stelle fisse. Così i pianeti sono simili nell’aspetto alle stelle fisse, ma la loro luce è più tranquilla (meno scintillante) e si dimostra che proviene dal sole. Inoltre, osservati al cannocchiale, essi appariscono come un disco di grandezza dipendente dall’ingrandimento, mentre le stelle si comportano come veri punti luminosi, più o meno intensamente luminosi, ma non aventi dimensioni percettibili. A seconda del loro splendore sono classificate in stelle di 1ª 2ª, 3ª… grandezza, sin oltre la sedicesima: ma sono visibili solo quelle delle prime sei grandezze. Queste ultime direttamente visibili sono appena nel numero di 6000, il che sembrerebbe a prima vista incredibile.

La invariabilità di posizione mutua delle stelle fisse le ha fatto distribuire, sin dall’antichità, in gruppi a cui fu dato un nome che ne richiama in certa guisa la configurazione. È famosa la costellazione dell’Orsa Maggiore (fig. 97), e quella dell’Orsa Minore di cui fa parte la Stella polare, trovantesi sulla congiungente α β delle *ruote posteriori* dell’Orsa Maggiore, detta anche Gran Carro. Noteremo ancora la costellazione Orione, con la stella Sirio, una delle più brillanti del cielo, e le dodici costellazioni formanti la fascia dello Zodiaco, con le quali il sole appare coincidente nelle varie epoche dell’anno. Citeremo infine la Via Lattea, una grande fascia luminosa che solca il Cielo e che è ben visibile nelle notti senza luna; essa è costituita da stelle e da nebulose *risolubili* o *irrisolubili* secondo che i più potenti telescopi permettono di stabilirne o no la costituzione granulare, come agglomerati di vicinissime stelle.

118. **Moto della sfera celeste**. — Come abbiamo detto l’intera sfera celeste sembra animata da un moto rotatorio d’insieme intorno a un asse che contiene l’osservatore, e passa per due punti della sfera celeste che si dicono i suoi *poli.* Uno di questi è a noi visibile, il polo Nord, ed è molto prossimo alla Stella polare. L’asse di rotazione, detto asse del mondo, fa un angolo con la verticale

del luogo d’osservazione, diverso da paese a paese. Quindi anche l’aspetto di questa rotazione cambia da un punto all’altro della Terra.

Per rendersene conto bisogna pensare che le diverse stelle tracciano nella rotazione dei cerchi tra loro paralleli, e perpendicolari all’asse di rotazione. Or l’orientazione dell’orizzonte, rispetto alla sfera celeste, cambia nei diversi paesi per la forma sferica della Terra. Così per i nostri paesi vale la fig. 98, nella quale PP' indica l’asse del mondo, AB l’orizzonte, e ZN la verticale; è visibile tutto ciò che è situato al disopra del piano AB; e perciò sono sempre visibili, la rotazione, malgrado le stelle comprese nella calotta PAA'. Si osservi però che la visione diretta è occultata durante il giorno dalla intensa luce del Sole, ma le stelle più vive sono ancora visibili per mezzo dei cannocchiali potenti. Le stelle di questa calotta son sempre sull’orizzonte e perciò non tramontano mai. Quelle invece del cerchio EQ', normale all’asse PP', e detto equatore celeste, stanno per mezzo giro al di sopra e per l’altro mezzo al di sotto dell’orizzonte. Quanto a quelle della calotta P'BB' che circonda il polo sud P', a noi invisibile, esse stan sempre al di sotto dell’orizzonte e ci restano perciò sempre nascoste.

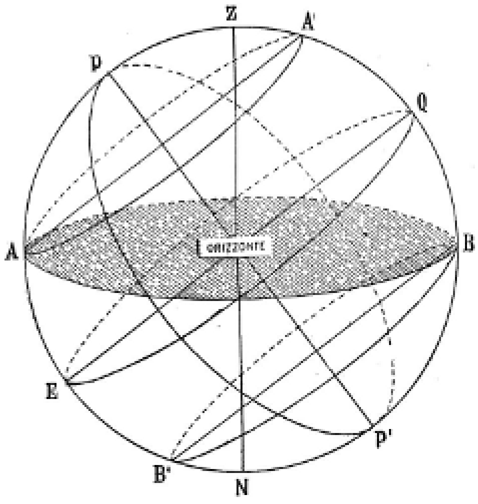


Fig. 98.

Se noi ci trovassimo all’equatore terrestre, cambierebbe la posizione della sfera rispetto al nostro orizzonte. I due poli P'P si porterebbero nei punti A, B; e il moto avvenendo intorno a un asse orizzontale, tutte le stelle ci sarebbero visibili durante mezzo giro, invisibili nell’altra metà.

Se poi ci trovassimo al polo della Terra, l’asse del mondo si confonderebbe con la verticale ZN, e tutte le stelle descriverebbero dei cerchi paralleli all’orizzonte; quelle di un emisfero resterebbero sempre al di sopra, e sarebbero perciò sempre visibili, l’opposto avverrebbe per le altre.

Il tempo impiegato dalla sfera celeste per compire un intero giro dicesi *giorno siderale*; esso è più corto del giorno solare, 24 ore dei comuni orologi, per un intervallo di 3 minuti, 56 secondi e 55 centesimi di secondo.

119. **Moto diurno della Terra**. — Gli aspetti della sfera celeste nel suo moto apparente possono essere interpretati ammettendo che la sfera sia ferma e che invece ruoti in senso inverso la Terra intorno al medesimo asse. Nè deve recar sorpresa che noi non *sentiamo* questo movimento nel quale la Terra ci trascina, poichè l’assoluta uniformità del moto deve appunto renderlo insensibile; noi riconosciamo invero di muoverci qualora siamo trascinati da un carro mal fatto in un terreno accidentato; ma avvertiamo meno il movimento in una carrozza dalle ruote di gomma che si muova su una strada ben tenuta, e ancora meno su un piroscafo che ci trasporti in un lago tranquillo. E come in quest’ultimo caso solo il moto apparente degli edifici lungo la riva ci rende avvertiti del movimento, così il moto della Terra ci viene appunto rilevato dal moto degli astri, assolutamente fissi.

Molte ragioni rendono più probabile che, anzichè alla sfera celeste, il moto degli astri sia dovuto a una rotazione inversa della Terra. Ma ormai possediamo di queste verità delle vere prove dirette di natura meccanica.

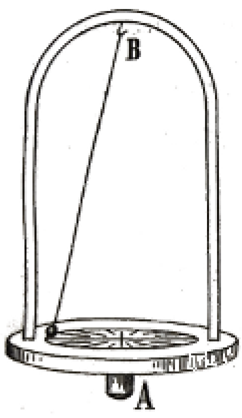


Fig. 99.

Anzitutto se si lascia cadere un grave dalla cima di un’alta torre, esso tocca il suolo un po’ più a levante del piede della verticale guidata staticamente, col filo a piombo, dal punto di partenza. Or siccome gli astri si muovono apparentemente da levante a ponente, la Terra deve muoversi invece da ponente a levante per dar luogo a quell’effetto apparente; ma in questo movimento di rotazione i punti più alti, come la cima di una torre, descrivendo nello stesso tempo cerchi maggiori, hanno una velocità maggiore dei punti del suolo alla base della torre medesima: la pietra, cadendo, conserva, per inerzia, l’eccesso di velocità, e dovrà quindi battere sul suolo non sul piede del filo a piombo, ma alquanto più in là, verso levante.

Un’esperienza che suscito la più viva ammirazione anche nel campo profano, e che dà una dimostrazione evidentissima della rotazione della Terra, è quella del pendolo di Foucault. Se in una stanza mobile, intorno ad un asse verticale, disponiamo un pendolo oscillante, osserveremo che il pendolo conserva invariato nello spazio il suo piano di oscillazione, comunque si muova la stanza. In piccolo la cosa può essere dimostrata con l'apparecchio della fig. 99. Facendo ruotare intorno ad AB tutto l'apparecchio il pendolo oscillante, conserverà invariato il suo piano d'oscillazione.

Posto ciò, immaginiamo di aver disposto un lungo pendolo al polo della Terra. Se questa gira veramente intorno all'asse dei poli, e perciò intorno alla linea verticale che rappresenta la posizione di riposo del pendolo, e se questo conserva invece invariato il suo piano d'oscillazione, si dovrà constatare un'apparente rotazione inversa del piano del pendolo, che avrà per durata di un giro appunto un giorno sidereo. In altri posti, che non siano il polo, si dimostra che deve avvenire un fenomeno analogo; soltanto la durata di un giro apparente del piano d'oscillazione deve esser maggiore, in misura calcolabile.

L'esperienza eseguita appunto dal Foucault, con un pendolo lunghissimo, nella Chiesa di Nôtre Dame a Parigi, e che può essere ripetuta grossolanamente anche in una scuola, confermò qualitativamente e numericamente il risultato previsto, dimostrando che il piano d'oscillazione del pendolo ruota lentamente, in misura tale che al polo seguirebbe le stelle [3].

120. **Forma della Terra**. — Sono note le prove che si adducono comunemente per provare la sfericità della Terra. Si è potuto però stabilire che essa non è una sfera perfetta, ma una sferoide alquanto schiacciata ai poli, cioè agli estremi dell'asse intorno a cui essa compie il moto di rotazione diurno.

Tutti i cerchi massimi passanti per i poli si dicono *meridiani*; l'equatore è la circonferenza tagliata sulla superficie terrestre da un piano perpendicolare all'asse e passante pel centro. I *paralleli* sono poi le circonferenze d'intersezione con tanti piani paralleli all'equatore.

Data la forma *vera* della Terra i diversi meridiani non sono esattamente della stessa lunghezza: essi però differiscono poco dal valore che corrisponde alla definizione del metro, cioè da 40 milioni di metri. Il raggio della Terra, per lo schiacciamento, è minore al polo che all'equatore; la differenza è circa 78 chilometri, e perciò essendo il raggio all'equatore circa 6378 chilometri, la differenza eguaglia $\frac{1}{292}$ del raggio equatoriale.

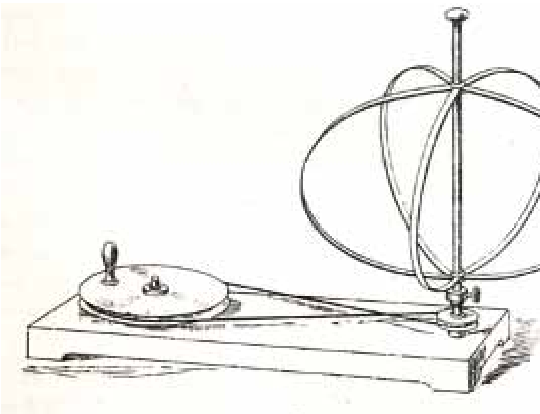


Fig. 100.

Quanto alle cause dello schiacciamento, esso si suole attribuire alla rotazione della Terra e alla conseguente reazione centrifuga, come è mostrato sperimentalmente dall'apparecchio della fig. 100.

Si noti che, come fu mostrato da Lord Kelvin, il valore dello schiacciamento è dell'ordine di grandezza che spetterebbe a una massa interamente solida, e che se la Terra fosse fluida e avesse all'esterno una crosta solida (come vorrebbe la teoria del fuoco centrale), lo schiacciamento dovrebbe essere molto maggiore di quello osservato.

[3] In realtà è stato osservato che questa esperienza, diretta a provare il moto effettivo della Terra, è fondata su un'ipotesi: quella dell'invariabilità del piano d'oscillazione, ipotesi deducibile dalla ordinaria legge d'inerzia, ma non verificabile direttamente, poichè l'esperienza della fig. 99 dice non che il piano d'oscillazione sia *assolutamente* invariabile ma che segue le stelle; nè è lecito dedurne che le stelle e il piano medesimo restan fermi e la Terra si muove. Simile questione si connette con l'impossibilità di rivelare i movimenti assoluti uniformi, cosicchè, stabilito il moto *relativo* uniforme della Terra e degli astri, non avrebbe neanche senso dire che l'una è in moto e gli altri son fermi, potendo ben avvenire che si muovano entrambi con diversa velocità. In quest'ordine d'idee la direzione del moto di un corpo, la quale tende a restare costante per l'inerzia, non è una direzione fissa nello spazio, ma è fissa rispetto alle stelle. Questo sarebbe l'enunciato più rigoroso della legge d'inerzia. Ma noi non possiamo insistere in simili considerazioni, per quanto esse siano emigrate dal campo della Metafisica, e appartengano ormai alla Fisica propriamente detta.

121. **Latitudine e longitudine terrestri**. — Scegliamo alla superficie terrestre un meridiano come fondamentale, e sia il meridiano PEP' (fig. 101). Dato un punto A della superficie terrestre si consideri il semimeridiano PAP' che passa per A. I due semicerchi PEP', PAP', che si tagliano sull'asse PP', formano un angolo diedro che ha per misura la sua *sezione normale* EOB, o anche, l'arco EB di equatore su cui insiste l'angolo EOB. Al valore di questo angolo, o di quest'arco, misurato in gradi, si dà il nome di *longitudine* del punto A. È chiaro che tutti i punti del semimeridiano PAP' hanno la stessa longitudine di A.

Mentre il semicerchio PAP' ruota nel senso inverso a quello degli indici d'un orologio, partendo dalla posizione PEP', l'arco EB aumenta in modo continuo, fino a che assume il valore di 180° quando si raggiunge il semi-meridiano PE'P'.

I paesi situati al dì là, e quindi nell'emisfero posteriore invisibile della figura, avrebbero delle longitudini maggiori di 180°. Si preferisce contare perciò le longitudini come orientali o occidentali rispetto a PEP'. È chiaro allora che la massima longitudine nei due sensi sarà 180°.

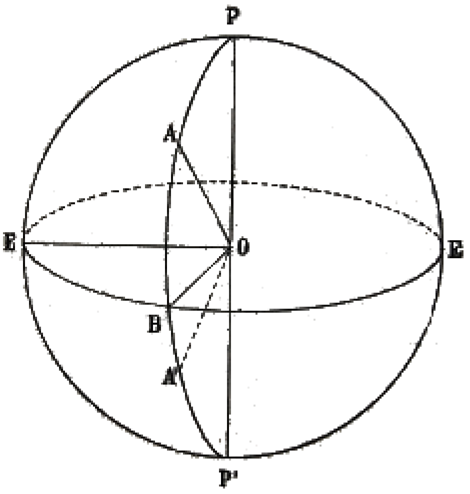


Fig. 101.

Il valore della longitudine non basta per definire la posizione del punto A, poichè, come si è detto, tutti i punti del semimeridiano PAP' hanno la stessa longitudine. Ma se noi consideriamo insieme l'angolo AOB, o l'arco di meridiano AB che indica sul meridiano, la distanza angolare di A dall'equatore EBE', la posizione di A sarà interamente definita. L'angolo AOB, o l'arco AB che è misurato dallo stesso numero di gradi, dicesi *latitudine* del punto A.

Per un punto come A' la latitudine è *australe,* per A è *boreale.* È evidente che tutti i punti di un *parallelo* hanno la stessa latitudine, e che questa può variare tra 0° (all'equatore) e 90° (ai poli). La longitudine e la latitudine di un paese formano insieme le sue *coordinate geografiche.*

La rappresentazione fedele di una parte della superficie terrestre in una carta geografica piana è un problema impossibile poichè non si può riportare su un piano un pezzo di superficie sferica senza lacerazioni o ripiegamenti. Esistono però diversi metodi di proiezione che riducono al minimo certe speciali deformazioni.

122. **Moto apparente del Sole**. — Il Sole nel suo movimento diurno apparente, comune con gli altri astri e con la sfera celeste, non si comporta come una stella fissa: cambia cioè lentamente di posizione rispetto alle altre stelle.

Se noi riportiamo sopra un *globo stellare,* ove siano riprodotte le stelle dell'intera sfera celeste, le posizioni occupate dal Sole nei giorni successivi alla stessa ora, deducendole dall'esame delle stelle con cui è in apparente contatto, otterremo una linea coincidente con un circolo massimo della sfera medesima e che si chiude esattamente in un anno solare, dopo di che si riprende il medesimo percorso. Questa linea SLIA, detta *ecclittica* (fig. 102), taglia l'Equatore celeste in due punti L e A chiamati *equinozi.* In essi si trova il Sole al 21 marzo e al 23 settembre. Invece i punti S, I corrispondono ai *solstizi* di estate e d'inverno, e sono occupati dal Sole al 21 giugno e al 22 dicembre.

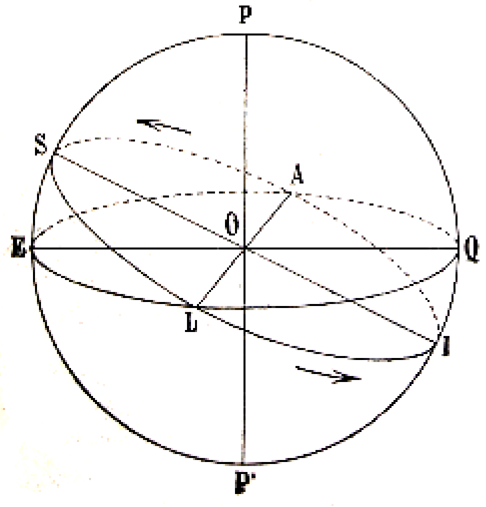


Fig. 102.

Ne risulta che agli equinozi il Sole si comporta come una stella equatoriale (fig. 98) e perciò per tutti i paesi resta un tempo eguale sopra e sotto l'orizzonte: il *giorno* è eguale alla *notte*. Dal 21 marzo al 21 giugno il Sole percorre l'arco AS (fig. 102) dell'emisfero celeste boreale e quindi esso va sorgendo sempre più a nord, e resta sempre più a lungo sull'orizzonte per i nostri paesi: il giorno è più lungo della notte e resta tale lungo l'arco SL percorso dal 21 giugno al 23 settembre. L'opposto avviene nel tratto LIA, cui corrisponde l'autunno e l'inverno.

Ma questo moto del Sole ha ancora un effetto più importante; esso si compie, lentamente, da ponente verso levante, cosicchè il Sole ritarda ogni giorno, nel passare al meridiano, di un certo tempo rispetto alle altre stelle. Questo tempo costituisce la differenza tra il giorno *sidereo* e il giorno *solare* che come noi abbiamo visto è di circa 4 minuti, appunto perchè compiendo il Sole il suo giro intero in un anno tarderà ogni giorno di $\frac{1}{365}$ di giro, cioè di poco meno di 1 grado.

Anche questo moto apparente del Sole è una illusione dei nostri sensi, ma in realtà è dovuto a un moto di rivoluzione della Terra intorno al Sole. Alcuni dispositivi meccanici, che talune Scuole posseggono, permettono di render conto immediatamente del come il moto della Terra possa produrre gli effetti osservati. Che poi la nuova spiegazione sia proprio la vera, abbiamo ormai diverse prove, delle quali le più importanti son fondate sull'osservazione di alcuni fenomeni luminosi celesti.

123. **Moto dei pianeti**. — Se, come per il Sole, si tracciano su un globo celeste le posizioni occupate dai pianeti in epoche consecutive, si ottengono delle curve molto complicate che misero a duro cimento le sviluppatissime attitudini speculative degli antichi astronomi. Si riconobbe però da Tolomeo che i moti dei pianeti si potevano facilmente spiegare ammettendo che essi girano intorno al Sole, e che questo alla sua volta, col corteo dei pianeti gira intorno alla Terra.

Copernico ideò più tardi il sistema che ora è da tutti accettato, e per il quale la Terra gira come gli altri pianeti intorno al Sole.

I pianeti sono sette, disposti nel seguente ordine di distanza crescente dal Sole: *Mercurio, Venere*, *Terra, Marte, Giove, Saturno, Urano* e *Nettuno*. Molti di questi sono provvisti di satelliti che girano loro intorno; così è un nostro satellite la Luna. Tutti i pianeti, tranne gli ultimi due, sono (in condizioni opportune) visibili a occhio nudo.

Esistono poi tra Marte e Giove dei pianeti molto piccoli, detti *asteroidi;* se ne contano più di 570, di cui il primo, *Cerere,* fu scoperto a Palermo dall'astronomo Piazzi. Fanno parte, infine, del sistema solare le *comete,* composte di un nucleo nebuloso e molto spesso di una coda. Esse, provenendo dai più reconditi spazi stellari, divengono talvolta ospiti temporanei o permanenti del nostro
sistema.

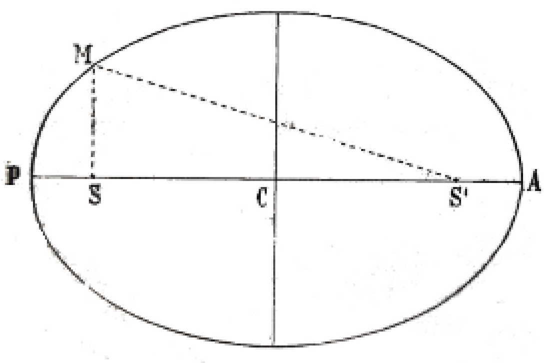


Fig. 103.

124. **Leggi di Keplero**. Fino ai tempi di Copernico si riteneva che le traiettorie dei pianeti, la Terra compresa, intorno al Sole fossero circolari. Si deve a Keplero la scoperta delle leggi cinematiche del moto dei pianeti; egli le dedusse discutendo le osservazioni astronomiche di Ticone-Brahe.

Le leggi sono le seguenti :

1. *Le orbite dei pianeti sono ellissi, e il Sole si trova in uno dei fuochi.*

Si chiama ellissi una curva chiusa ottenibile proiettando una circonferenza su un piano non parallelo al suo. Essa gode la proprietà (fig. 103) che la somma delle distanze come MS, MS' di un punto qualunque M della curva da due punti fissi S e S', detti fuochi, è eguale costantemente all'asse maggiore AP. Le vere orbite dei pianeti sono però molto meno schiacciate dell'ellissi della figura.

Sia O (fig. 104) la posizione del Sole, mentre la Terra percorre nel senso della freccia la curva. Il punto P dicesi *perielio,* e il punto A, più lontano dal Sole, *afelio;* la Terra si trova in P il primo gennaio e in A il primo luglio. Ma la velocità della Terra lungo la sua orbita non è costante: essa è regolata dalla seconda legge di Keplero:

2. *Le aree descritte dal raggio vettore che va dal Sole al pianeta sono proporzionali ai tempi impiegati a descriverle.* Sono quindi eguali le aree *Oqq', Obb'*, se son descritte in tempi eguali; se ne deduce che la velocità del pianeta è maggiore nel tratto *qq'* che nel tratto *bb'*; e in generale la velocità è maggiore quanto il pianeta è più vicino al Sole.

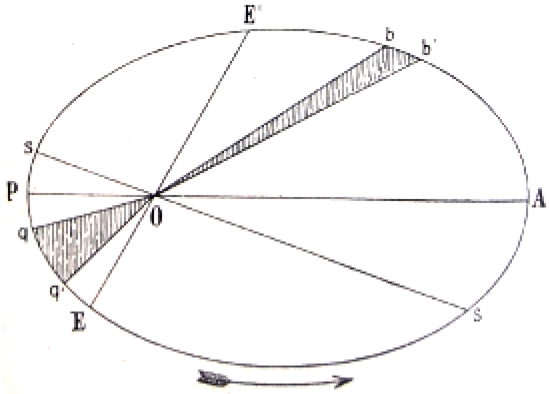


Fig. 104.

3. *I quadrati dei tempi periodici di rivoluzione dei diversi pianeti sono proporzionali ai cubi dei grandi assi.* Così se il grand'asse di un pianeta A è quadruplo di quello di un altro pianeta B, la durata di rivoluzione di A sarà otto volte maggiore di quella di B.

125. **Tempo vero e tempo medio**. — Alle diverse velocità del moto della Terra intorno al Sole corrisponde un moto apparente *vario* del Sole sulla volta celeste. E quindi il giorno solare *vero,* cioè il tempo impiegato dal Sole per ripassare due volte consecutive per lo stesso meridiano, sarà differente nelle diverse epoche dell'anno, per quanto queste differenze siano molto piccole. Muovendosi il Sole verso levante, e più rapidamente in inverno, ci vorrà d'inverno un tempo più lungo perchè esso ripassi da levante a ponente sul meridiano da un giorno al consecutivo; cioè il giorno solare vero sarà alquanto più lungo in inverno, e più breve in està.

Per gli usi civili occorreva però che il giorno avesse una durata rigorosamente costante. Si è introdotto perciò il giorno medio, che è dato dal valore medio, entro l'anno, del giorno vero; esso corrisponde al giorno vero di un Sole fittizio che si muova lungo l'Equatore con moto uniforme, impiegando per un intero giro il tempo impiegato dal Sole vero a percorrere l'ecclittica.

I nostri orologi, regolati comunemente con un segnale fornito dagli osservatori astronomici, danno appunto il tempo medio: le differenze tra il mezzogiorno vero e il medio nello stesso luogo sommandosi di giorno in giorno per un quarto d'anno, possono raggiungere circa un quarto d'ora.

126. **Unificazione dell'ora**. – Il Sole, partecipando al moto apparente della sfera celeste, si muove da levante a ponente, passando al mezzogiorno vero per il meridiano del luogo, e compiendo un giro intero in un giorno; ovvero 15° d'arco all'ora. Ne risulta che se un paese è a 15° di longitudine verso ponente, a partire da noi, se cioè il suo semimeridiano fa col nostro un angolo di 15° verso ponente, il mezzogiorno sarà ivi in ritardo di un'ora sul nostro, e un ritardo minore si avrà per i paesi meno distanti in longitudine. Perciò il mezzogiorno vero è diverso per paesi che si trovano su meridiani diversi. Ne nacque pel passato una grande confusione, per i rapporti che si andavan facendo sempre più rapidi tra paesi lontani.

Si cominciò con l'assegnare a ciascuna nazione il mezzogiorno che compete alla capitale. Ma fu molto più razionale la soluzione detta dei *fusi orari.* Venne, per essa, divisa la superficie terrestre in 24 fusi, separati da semimeridiani aventi la distanza angolare di 15°. E a tutti i paesi di un fuso si assegnò come tempo civile il tempo medio del meridiano centrale contenuto nel fuso. L'Europa abbraccia tre di questi fusi; dall'uno all'altro il tempo segnato dagli orologi subisce il salto di un'ora; noi apparteniamo al fuso dell'Europa centrale, il cui meridiano regolatore passa sensibilmente per l'Etna; così il nuovo tempo medio, comune a tutta l'Italia, la Svezia, la Norvegia, la Danimarca, la Germania, la Svizzera, l'Austria-Ungheria ecc., è in anticipo di 10' sul tempo medio di Roma, ed è in anticipo sul tempo locale per tutti i paesi situati a ponente dell'Etna. Naturalmente i fusi, all'atto pratico, non son separati dai meridiani geometrici; ma si adattano alla necessità di dare un'unica ora alle diverse città di una stessa nazione, o a simili ragioni di convenienza. La Francia, invece, si attiene ancora al meridiano di Parigi, con un anticipo di 9' 21" sul tempo del fuso che la contiene.

127. **Inclinazione dell'asse terrestre. Stagioni**. — Durante il moto della Terra intorno al Sole l'asse terrestre conserva una direzione invariata nello spazio, si mantiene, cioè, parallelo a sè stesso. Esso è però inclinato sul piano dell'orbita, formando con questa un angolo di 66° 33'. Anche il

piano dell’equatore terrestre resta perciò invariato, e fa col piano della traiettoria un angolo di 90° — 66°. 33' = 23°. 27'.

Ne risulta che al solstizio d’inverno, in cui la posizione mutua della Terra e del Sole è quella della fig.. 105, il Sole è allo zenit per i paesi che nella rotazione diurna passano per il punto D, e che si trovano perciò nel parallelo DD' dell’emisfero sud, detto *tropico del Capricorno.* Inoltre nella rotazione diurna i punti della calotta BPB' intorno al polo nord restano sempre in ombra, quelli della calotta AP'A' restano sempre in luce; nei primi si avrà notte continua, negli ultimi giorno continuo. I paesi come i nostri che hanno una latitudine compresa tra quelle di B e Q avranno un giorno meno lungo della notte; l’opposto avverrà per i paesi dell’emisfero sud; noi avremo l’*inverno,* gli altri l’*estate*.

Al solstizio d’estate la posizione sarà invertita, come nella fig. 106. Per la calotta intorno al polo

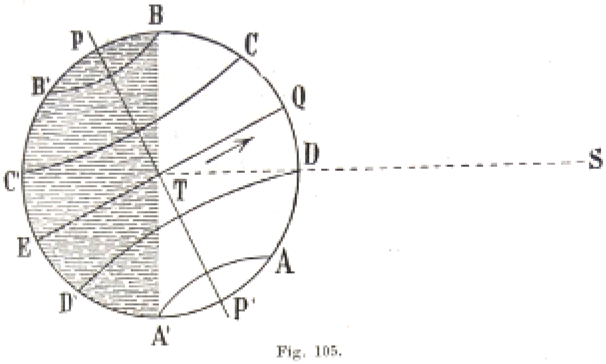


Fig. 105.

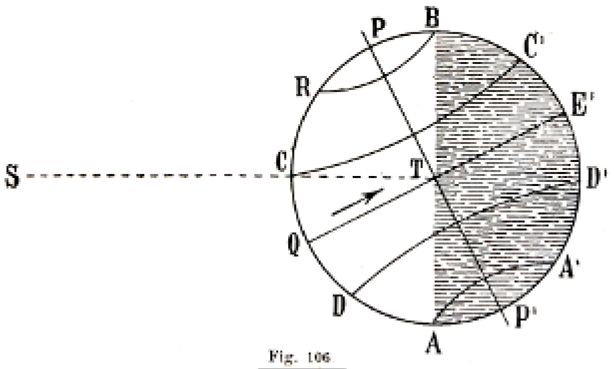


Fig. 106

nord BPP', detta *zona glaciale artica* sarà sempre giorno; mentre sarà sempre notte per i paesi della *zona glaciale antartica* AP'A'. Il sole passerà allo zenit per i paesi del *tropico del Cancro* CC'; e infine nel nostro emisfero il giorno sarà più lungo delle notti e l’opposto avverrà nei paesi dell’altro emisfero. Per il fatto che il Sole resta sull’orizzonte per un tempo maggiore, e che i suoi raggi cadono sul suolo in direzione meno obliqua (più prossima alla verticale), corrispondono per noi in questo periodo i calori estivi.

Si passa dall’una all’altra di queste posizioni estreme attraverso a delle posizioni intermedie in cui quelle differenze sono attenuate; e così negli equinozi il Sole va pensato, rispetto alle figure 105, 106, non come esistente a destra o a sinistra, ma avanti il foglio o dietro di esso. — Ed è chiaro che allora tutti i punti della Terra avranno il giorno eguale alla notte. — Tutte queste apparenze risultano ben chiarite da un apparecchio di dimostrazione che molte scuole possiedono.

128. **Luna e sue fasi**. — La Luna è un satellite della Terra, illuminato dal Sole, e che gira intorno a noi con un’orbita circolare avente per raggio circa 60 volte il raggio terrestre. Il volume totale della Luna è circa $\frac{1}{50}$ di quello della Terra. Essa sembra del tutto sprovvista d’acqua e d’aria.

Il moto della Luna si compie, come quello dei pianeti intorno al Sole, da ponente a levante, nel tempo di 27 giorni, 7 ore e 43 minuti. Dopo un giorno essa perciò si trova spostata verso levante di un certo angolo rilevante, e occorre un tempo più lungo di un giorno sidereo perchè ripassi per il meridiano. Anche il Sole ritarda, per il suo moto verso levante, a passare per il meridiano rispetto alle stelle, ma mentre per il Sole questo ritardo è di circa 4 minuti, per la Luna è di circa 50 minuti al giorno; il ritardo della Luna sul Sole sarà perciò di quattro minuti più piccolo, cioè di circa 46 minuti. Ne risulta che, mentre la Luna impiega 27 giorni, 7 ore, 43 minuti per ripassare al meridiano con la stessa stella, ne impiega 29 giorni, 12 ore e 44 minuti per ripassarvi insieme col Sole.

Il notevole spostamento continuo della Luna, rispetto al Sole, sulla volta celeste determina dei notevoli cambiamenti nel suo aspetto, detti *fasi lunari.* Nella fig. 107 è rappresentata in T la Terra e in L la Luna che le compie intorno un giro. Il Sole è supposto a grande distanza verso sinistra. Quando la Luna è in L_1, dicesi in *congiunzione* col Sole; allora i due astri passano al meridiano insieme, e la Luna volge a noi il suo emisfero non illuminato; si ha il *novilunio.*

A poco a poco la Luna si porta in L_2 e poi in L_3; essa è allora a 90° di distanza dal Sole, cioè sorge quando il Sole è a mezzogiorno, e presenta a noi metà dell'emisfero illuminato — si ha il *primo quarto.* — Dopo altri 7 giorni, circa, la Luna è venuta in L_5 cioè in *opposizione* col Sole. Essa sorge quando il Sole tramonta, e offre a noi l'intero emisfero in piena luce; siamo allora al *plenilunio.* Finalmente in L_7 si riproduce la posizione di quadratura; la Luna è al meridiano quando sorge il Sole, e si vede illuminato un quarto della sua superficie (*ultimo quarto*). La durata delle fasi, dipendendo dalle posizioni mutue col Sole, sarà di 29 giorni, 12 ore e 44 minuti, quanti ne occorrono perchè la Luna ripassi al meridiano col Sole.

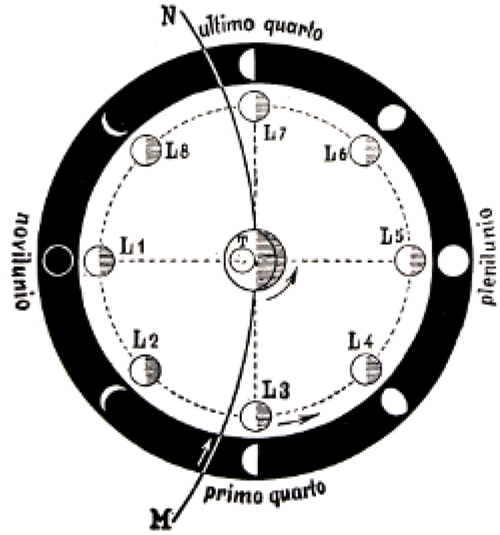


Fig. 107.

Se nelle congiunzioni e nelle opposizioni il Sole, la Luna e la Terra fossero esattamente su una retta, invece del novilunio e del plenilunio si avrebbe un *ecclissi di Sole* e un *ecclissi di Luna,* poichè nel primo caso la Luna si interporrebbe tra noi e il Sole, occultandolo; e nel secondo, stando noi in mezzo, intercetteremmo alla Luna la luce del Sole.

In realtà nelle congiunzioni la Luna e il Sole passano insieme al meridiano, ma raramente sono sulla stessa visuale: la Luna è alquanto più bassa o più alta secondo i casi; e così nelle opposizioni quasi sempre i due astri non sono in linea retta con la Terra.

Ciò è dovuto al fatto che l'orbita lunare e l'orbita apparente del Sole non sono in unico piano, ma fanno un certo angolo, di circa 5°, tagliandosi secondo una linea detta *linea dei nodi.* È solo quando le congiunzioni o le opposizioni hanno luogo sulla linea dei nodi si verificano gli ecclissi. Si è trovato che dopo 18 anni e 10 giorni circa i tre astri riprendono esattamente la stessa posizione, cosicchè gli ecclissi si ripeteranno con lo stesso ordine dopo questo periodo di tempo.

129. **Gravitazione universale**. — Se la Luna e i pianeti obbediscono alle leggi meccaniche da noi studiate, debbono subire una forza attrattiva da parte del centro intorno a cui girano, eguale alla forza centripeta necessaria per mantenerli su un'orbita circolare malgrado l'inerzia.

Consideriamo, in particolare, il caso della Luna girante attorno alla Terra. La forza che deve agire su ciascun grammo-massa della Luna per obbligarla a compiere un giro in 27 giorni, 7 ore e 43 minuti, sarà per la (7) del § 44,

$$F = \frac{4\pi^2 R}{T^2} = 0{,}27 \ dine$$

nella quale si è posto per R la distanza tra la Terra e la Luna eguale a 60 raggi terrestri.

Questa forza ha qualcosa di comune con il peso dei corpi alla superficie terrestre? Numericamente essa è molto minore, poichè alla superficie terrestre un grammo-massa è attirato con la forza di 980 dine, cioè con una forza circa 3600 volte più intensa.

Il celebre Newton, che fece per primo queste considerazioni, non si sorprese molto di questa differenza, poichè pensò che l'attrazione terrestre potrebbe diminuire con la distanza dal centro del corpo attraente; e se essa diminuisse in ragione del quadrato della distanza, alla distanza della Luna dal centro della Terra, che è circa 60 volte maggiore di quella dei corpi della superficie, la forza attrattiva dovrebbe appunto divenire 3600 volte più piccola, poichè 3600 è il quadrato di 60.

Newton ne dedusse che la forza centripeta esercitata sulla Luna è un caso particolare della forza di gravità, o meglio che questa è alla sua volta un caso particolare di un fenomeno generale cui sarebbe sottoposta la materia, e che due parti qualsiasi di questa si attirano con una forza proporzionale alle masse in presenza e inversamente proporzionale al quadrato della distanza. A questa causa sarebbe dovuto il moto dei pianeti intorno al Sole che li attirerebbe con una forza dipendente dalla loro distanza. Sottoponendo al calcolo questa ipotesi, egli potè così giustificare le tre leggi cinematiche di Keplero, cosicchè la ipotesi stessa ne ebbe una conferma importante.

Ma v'ha di più. — La massa del Sole è enorme di fronte a quella dei pianeti, e perciò la sua forza attrattiva è preponderante nell'insieme delle forze reciproche che i pianeti esercitano tra loro. Ciò non toglie però che queste forze reciproche esistano; esse avranno per effetto di *perturbare* il moto dei pianeti, cosicchè le loro orbite a rigore non dovrebbero essere ellittiche.

E le cose van proprio così, e perciò la legge di Newton è esatta, e non le leggi di Keplero che aiutarono a scoprire la prima. Dalle mutue influenze dei pianeti si può dedurre la loro massa, e le perturbazioni delle orbite ne riescono completamente spiegate. Solo per Urano, quando ancora Nettuno non era stato scoperto, si notavano delle lievi perturbazioni nel moto, che la presenza degli altri cinque pianeti più interni non bastava a spiegare. Si ammise allora da Le Verrier l'esistenza di un pianeta ignoto, calcolandone la massa e la traiettoria, sulla base delle perturbazioni di Urano e della legge di Newton. Il pianeta ipotetico fu in realtà ritrovato da Galle, nel posto assegnatogli da Le Verrier. Tale scoperta è una delle più brillanti che possa vantare l'ingegno umano.

Ma anche alla superficie terrestre l'esistenza di forze attrattive tra i corpi, richiesta dalla legge di Newton, potè essere constatata con un procedimento delicatissimo messo in opera per primo da Cavendish, e poi perfezionato da altri. Si potè così stabilire, da Boys e Poynting, che tra due corpi di un grammo-massa, alla distanza di 1 cm., si esercita la forza di 69 milionesimi di dine. E poichè la Terra, col suo centro a 6370 chilometri, attira un grammo alla sua superficie con la forza di 980 dine, si deduce che la massa della Terra dev'essere di 5963×10^{24} grammi.

La legge di Newton può esprimersi analiticamente per mezzo della seguente formola, ove F è la forza attrattiva, M e M' sono le masse in presenza, r la loro distanza e K una costante

$$F = K \frac{M\,M'}{r^2}$$

La costante K esprime la forza con cui un grammo attira un altro grammo alla distanza di 1 cm; si ha perciò

$$K = 69 \times 10^{-6}\ dine$$

Nota la massa della Terra, e conoscendosene il volume, se ne deduce la densità media. — Essa risulta espressa dal numero 5,5 all'incirca, cioè una densità maggiore di quella degli strati superficiali, che è di circa 2,5.

130. **Maree**. — Descriveremo brevemente il fenomeno, dichiarando che esso è stato pienamente spiegato con l'attrazione esercitata dalla Luna, ma che non se ne può dare facilmente ragione in modo elementare. Consiste in un periodico sollevamento e abbassamento delle acque del mare (alta e bassa marea) che ha per periodo intero la metà della durata del giorno lunare (24 ore e 46 minuti) cosicchè tra due passaggi successivi della Luna pel meridiano, l'alta marea si è prodotta due volte. Nel fenomeno interviene, ma in debole misura, la posizione del Sole all'istante in cui la Luna passa pel meridiano. D'altra parte si nota spesso un ritardo tra l'alta marea e il passaggio della Luna al meridiano, dipendentemente dalla conformazione delle coste e da altre cause.

Anche l'entità del fenomeno cambia nei vari luoghi; così mentre è appena di 30 centimetri a Livorno, raggiunge 14 metri nella Baia del Monte S. Michele in Francia.

FINE DEL I° VOLUME

INDICE

Principio di Pascal, Pressione in un liquido
Superficie libera di un liquido
Liquidi pesanti, pressione sul fondo
Pressione sulle pareti
Vasi comunicanti
Spinta dal basso in alto
Principio d'Archimede
Galleggianti
Misura dei pesi specifici

Fenomeni capillari

Spiegazione dei fenomeni capillari

Statica degli aeriformi

Peso degli aeriformi
Pressione atmosferica
Esperienza di Torricelli
Barometri a mercurio
Barometri metallici
Altimetria
Pressione di un gas. Densità relativa
Legge di Boyle
Legge di Dalton sui miscugli gassosi
Manometri
Spinte dell'aria. Baroscopio. Aerostati

Dinamica dei fluidi. Applicazioni

Macchina pneumatica a stantuffo
Macchina a mercurio di Geissler
Trombe ad acqua
Fontana di compressione
Sifone

Diffusione e osmosi

Diffusione dei liquidi
Osmosi
Diffusione degli aeriformi
Solubilità dei gas nei liquidi
Dialisi degli aeriformi
Cenno sulla teoria cinetica dei gas

Acustica

Produzione del suono
Riflessione del suono
Caratteri distintivi delle vibrazioni
Altezza dei suoni
Principio di Döppler
Scala musicale
Intensità del suono
Composizione delle vibrazioni
Onde stazionarie
Vibrazioni delle corde
Risonanza
Tubi sonori
Battimenti
Composizione di diversi suoni armonici del fondamentale. Suoni semplici e composti
Fonografo
L'organo vocale e l'orecchio

Cosmografia

Sfera celeste. Stelle
Moto della sfera celeste
Moto diurno della Terra
Forma della Terra
Latitudine e longitudine terrestri
Moto apparente del Sole
Moto dei pianeti
Leggi di Keplero

Tempo vero e tempo medio
Unificazione dell’ora
Inclinazione dell’asse terrestre. Stagioni
Luna e sue fasi
Gravitazione universale
Maree