



Associazione per
l'Insegnamento
della Fisica
Sezione di Mantova

ITIS "E. FERMI"
MANTOVA

LABORATORIO DI FISICA - CHIMICA NEL BIENNIO

Seconda parte

Corso di aggiornamento
A.S. 1996/97

Indice

Solubilità dei solidi nei liquidi	pag. 1
<i>Effetto della temperatura sulla solubilità</i>	
Prof. Daniele Morandini ITIS "E. Fermi" Mantova	
La carica elementare	pag. 5
Prof. Giorgio De Vincenzi ITIS "E. Fermi" Mantova	
La legge di Proust	pag. 12
<i>Legge delle proporzioni definite e costanti</i>	
Prof. Chiara Ghisolfi ITIS "E. Fermi" Mantova	
Apparecchio di Dalla Valle	pag. 15
<i>Approccio al concetto di energia</i>	
Prof. Maurizio Francesio ITIS "E. Fermi" Mantova	
Elettrostatica e legge di Coulomb	pag. 25
<i>Introduzione ai fenomeni elettrici</i>	
Proff. Leo Vioni e Maurizio Francesio ITIS "E. Fermi" Mantova	
Premier mémoire sur l'électricité et le magnétisme	pag. 43
Par M. Coulomb 1785	

Dal corso "DALL'ELETTRONE A INTERNET"

Rapporto carica – massa dell'elettrone	pag. 53
Prof. Luigi Togliani Liceo Scientifico "Belfiore" Mantova	

EFFETTO DELLA TEMPERATURA SULLA SOLUBILITÀ

Costruzione della curva di solubilità di un solido

- L'esperimento si prefigge lo scopo di studiare il variare della solubilità di una sostanza solida (nitrato di potassio KNO_3), in acqua, al variare della temperatura, e di determinare graficamente la sua curva di solubilità.

- Gli strumenti utilizzati sono una bilancia a bracci uguali con relativa massiera, un cilindro graduato, un becher da 300 cm^3 , una provetta, un tappo di gomma, un pirottino, un termometro, un fornellino ad alcool, una capsula di porcellana, un sostegno con reticella, occhiali di protezione.

ESECUZIONE

1) Preparare la soluzione satura a freddo: unire 6 g della sostanza solida con 5 cm^3 di acqua nella provetta, tappare e agitare energicamente. [La quantità è calcolata per dare una soluzione satura a $60 \text{ }^\circ\text{C}$, per cui, dopo aver unito acqua e sale ed aver agitato alla temperatura ambiente, gran parte del sale sarà sotto forma di precipitato. Fare notare l'abbassamento di temperatura che subisce la soluzione.]

2) Mettere la provetta nel bagnomaria e riscaldare l'acqua sino a superare di $5-6 \text{ }^\circ\text{C}$ la temperatura assegnata (vedi tabella n° 1). Di tanto in tanto estrarre la provetta dal bagnomaria, agitare energicamente e riporla di nuovo nel bagnomaria. [Si deve tenere il tappo della provetta appoggiato e non chiuso ermeticamente perché, con il riscaldamento, la dilatazione dell'aria lo farebbe saltare. Durante il riscaldamento agitare energicamente, di tanto in tanto, la provetta per facilitare la dissoluzione.]

3) Nel frattempo determinare la massa della capsula di porcellana vuota e asciutta.

4) Arrivati alla temperatura indicata al punto 2, togliere la provetta dal bagnomaria e agitare energicamente; riporla di nuovo nel bagnomaria per qualche minuto e ripetere l'operazione diverse volte. [I punti 4 e 5 sono i più complessi e delicati in quanto è difficile stabilire visivamente quando la soluzione è satura; ci sono, inoltre, altri fattori che disturbano: a) a temperature non lontane da quella ambiente l'estrazione e l'agitazione della provetta non risentirà eccessivamente della temperatura esterna, mentre a temperature più elevate il fenomeno si fa sentire di più; b) la dissoluzione stessa di questo sale nell'acqua dà una reazione endotermica che influisce sulla temperatura della soluzione; c) alle temperature più elevate, $55-60 \text{ }^\circ\text{C}$, è un po' più "doloroso" prendere in mano la provetta ed agitarla; d) è necessario quindi ripetere l'operazione più volte; e) in ogni caso la temperatura a cui si fa riferimento sarà quella misurata con il termometro, all'interno della provetta, un momento prima di versare la soluzione.]

5) Quando si è sicuri che la soluzione è satura alla temperatura in cui si opera, si misura velocemente la temperatura all'interno della provetta con il termometro asciugato e si versa la soluzione nella capsula evitando di far scendere i cristallini del precipitato. [E' l'operazione più complessa di tutta la prova e va eseguita con l'aiuto dell'insegnante.]

6) Determinare la massa della capsula contenente la soluzione.

7) Fare essiccare la soluzione nella capsula con un fornellino ad alcool controllando continuamente l'evaporazione per evitare spruzzi di soluzione che, oltre ad essere molto pericolosi, provocano la perdita di sostanza. [Il componente del gruppo che controlla l'operazione deve indossare occhiali di protezione; deve utilizzare una fiamma non troppo alta ed essere sempre pronto a togliere il fornellino ad alcool da sotto la capsula non appena l'ebollizione fosse troppo forte.]

8) Quando il sale è completamente essiccato, determinare la massa della capsula più soluto. [Il metodo più sicuro per far evaporare tutta l'acqua è quello di massare alla fine, riscaldare ulteriormente, e di nuovo massare; il valore costante della massa confermerà che tutta l'acqua è evaporata.]

TABELLA n°1

Gruppo n.	MASSA SOLUTO (g)	VOLUME ACQUA (cm ³)	TEMPERATURA DI LAVORO (°C)
1	6	5	25
2	6	5	30
3	6	5	35
4	6	5	40
5	6	5	45
6	6	5	50
7	6	5	55
8	6	5	60

Con i dati ottenuti dalle misure dirette, accompagnate dalle relative incertezze, si calcolano gli altri valori in modo da compilare completamente la tabella n° 2.

Tutti i dati devono comparire con la loro incertezza.

TABELLA n° 2

m. cap (g)	m.cap+slz (g)	m slz (g)	m.cap+slt (g)	m slt (g)	m.acq (g)	V acq (cm ³)	m slt/V acq (g/cm ³)	m slt/100xV acq (g/100 cm ³)
25,40 ± 0,01	29,09 ± 0,01	3,69 ± 0,02	26,41 ± 0,01	1,01 ± 0,02	2,68 ± 0,02	2,68 ± 0,02	0,38 ± 0,01	38 ± 1

Legenda:

cap = capsula
slz = soluzione
slt = soluto
acq = acqua = solvente
V = volume
m = massa

Valori relativi ad un gruppo

Con i dati relativi alla solubilità, ricavati dai vari gruppi, alle diverse temperature, si compila una tabella riassuntiva di classe (Tab. n° 3) dalla quale è possibile trarre le opportune conclusioni teoriche e compilare un grafico della solubilità in funzione della temperatura.

TABELLA n° 3

Gruppo	Temperatura della soluzione satura (° C)	Concentrazione (g/100cm ³)
1	25 ± 1	38 ± 1
2	30 ± 1	47 ± 1
3	34 ± 1	52 ± 1
4	40 ± 1	60 ± 1
5	43 ± 1	65 ± 1
6	51 ± 1	82 ± 1
7	55 ± 1	94 ± 1
8	60 ± 1	106 ± 1

Con i dati ottenuti (sempre che lo permettano) si costruisce un grafico della solubilità in funzione della temperatura per evidenziare graficamente la relazione tra queste due grandezze.

CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI

La cosa che subito risulta evidente è l'aumento della solubilità in g/100cm³ all'aumentare della temperatura.

Questo fenomeno si può spiegare ai ragazzi con alcune osservazioni.

La dissoluzione del soluto nell'acqua è accompagnata da una diminuzione della temperatura (che si sente vistosamente tenendo in mano la provetta); questo "effetto termico" che accompagna il suo passaggio in soluzione è la risultante di due fattori:

- a) demolizione della struttura cristallina, che rende libere le particelle costitutive, processo che assorbe notevole quantità di energia (processo endotermico);
- b) interazione associativa, cioè formazione di legami tra le particelle del soluto e del solvente (solvatazione), fattore che in ogni caso libera energia (processo esotermico).

La somma di questi due effetti determina il "calore di soluzione".

Nella maggior parte dei casi, nelle soluzioni di solidi in liquidi l'effetto predominante è il primo e quindi noi noteremo un raffreddamento della soluzione.

Ci sono anche dei casi in cui si nota un innalzamento della temperatura (NaOH in H₂O per formazione di legami ad idrogeno).

Il fatto che la dissoluzione sia legata a fenomeni termici spiega perché la solubilità vari al variare della temperatura. Nel nostro caso e in molti altri aumenta ma con intensità diversa.

(L'aumento della temperatura fa aumentare la velocità media delle molecole d'acqua alle quali risulta quindi più facile strappare ione dopo ione le particelle del solido).

Uno sguardo al grafico costruito con l'esperimento e un confronto con quelli tabulati porta ad altre considerazioni.

Noi abbiamo costruito un tratto della curva; cosa si può presupporre quando la temperatura si abbassa ulteriormente arrivando allo 0 °C oppure si innalza intorno ai 100 °C?

L'osservazione delle curve rappresentate ci informa che anche a 0 °C l'acqua riesce a sciogliere dei sali: Effetto crioscopico - Effetto ebullioscopico.

La solubilità di una sostanza (soluto) in un determinato solvente è legata alla temperatura e quindi i dati relativi alla solubilità, esprimibili in vario modo, devono sempre essere accompagnati dalla temperatura.

La solubilità è una proprietà caratteristica delle sostanze pure.

La curva di solubilità è utile per essere confrontata con quella di solubilità di un gas in un liquido, esperienza successiva.

DETERMINAZIONE DELLA CARICA ELEMENTARE

1) INTRODUZIONE E CENNI STORICI

- Nel VI secolo a.c. i Greci (Talete) ebbero conoscenza della capacità di elettrizzarsi di alcune sostanze.

- Nel V secolo a.c. nacque la scuola atomistica (Democrito) secondo la quale la materia era costituita di atomi, particelle indivisibili, omogenee per qualità, differenti per forma e grandezza.

- Nel 1500 Gilbert chiamò effetti elettrici i fenomeni attrattivi determinati da alcune sostanze.

- Nel 1631 Gray mostrò che l'elettrizzazione poteva essere trasmessa da un corpo all'altro per contatto (anche interponendo corpi che verranno classificati in conduttori e isolanti). Si cominciò così ad associare allo stato elettrico un "quid" cioè una carica elettrica capace di trasferirsi da un corpo all'altro tramite i conduttori.

- Nel 1700 De Cisternay Du Fay riconobbe l'esistenza di 2 tipi diversi di carica elettrica, osservando le forze attrattive e repulsive di 2 corpi carichi (chiamate elettricità resinosa e vetrosa)

- Nel 1700 B. Franklin, indipendentemente dal Du Fay, poté stabilire che in un fenomeno di elettrizzazione compaiono ambedue le specie di elettricità in misura tale che l'una può neutralizzare esattamente l'altra. Esse furono chiamate e. positiva e e. negativa

- Nel 1808 Dalton presentò la sua "ipotesi atomica" e Gay-Lussac la legge dei volumi gassosi. Nello stesso periodo Faraday stabilì che in un sistema isolato elettricamente la carica elettrica totale rimaneva costante.

La conservazione della carica elettrica di un sistema e i processi di conduzione dell'elettricità, inducevano a pensare l'elettricità come un fluido indistruttibile con le seguenti condizioni:

1) esistono 2 fluidi, uno costituito da cariche positive e uno da cariche negative, perfettamente equivalenti in un corpo neutro ma separabili durante il processo di elettrizzazione e in questo caso la carica positiva o negativa che il corpo possiede è l'eccesso di fluido positivo o negativo presente.

2) esiste un solo fluido (positivo o negativo) libero di scorrere da un corpo all'altro e in tale caso le cariche positive o negative sono determinate dalla rarefazione o dall'addensamento di fluido (negativo o positivo).

I due meccanismi furono variamente sostenuti e combattuti, finché più recenti fatti sperimentali, quali l'elettrolisi, la scarica nei gas, l'effetto fotoelettrico, mostrarono fondata l'ipotesi di un unico fluido costituito da corpuscoli aventi ciascuno una carica elettrica negativa invariabile e uguale per tutti. Precisamente:

- Nel 1891 Stanley propose di chiamare elettrone l'unità elementare costitutiva della carica elettrica.

- Alla fine '800 Thomson riuscì a dimostrare che si trattava di particelle negative.

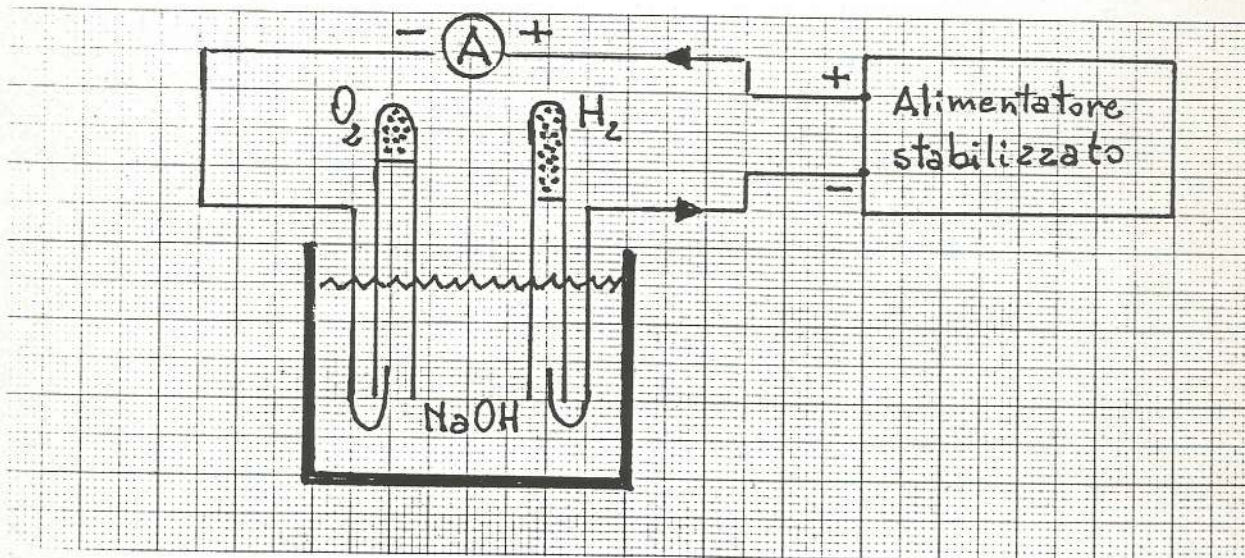
- Nel 1913 il fisico americano Millikan riuscì per primo a determinare la carica elementare che risultava:

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$$

Il metodo di seguito proposto per la determinazione di e è basato sulla elettrolisi dell'acqua (soluzione di NaOH). La misura di e è per via indiretta.

2) ESECUZIONE

Schema circuito:



Materiale:

- 1 alimentatore B.T.
- 1 Amperometro (Cl = 1)
- 2 cilindri graduati (Sl = 0,1 cm³)
- elettrodi di acciaio verniciati in verde
- 2 cavetti gialli piccoli
- 2 cavetti di media lunghezza con prese a coccodrillo
- 1 becher
- 2 pinze per trattenere i cilindri graduati
- 1 cronometro

AVVERTENZA: immergere capovolti i cilindri dopo averli riempiti completamente di soluzione senza bolle d'aria (usare i guanti!).

Nella seguente tabella, a titolo di esempio, sono riportati i dati raccolti in una prova.

t(s)	V _{H2} (cm ³)	V _{O2} (cm ³)	I (mA)	Q (A·s)
0	0	0	0	0
60,0 ± 0,1	/ ± 0,1	/ ± 0,1	140 ± 5	8,4 ± 0,3
120,0 ± 0,1	1,8 ± 0,1	1,1 ± 0,1	140 ± 5	16,8 ± 0,6
180,0 ± 0,1	3,0 ± 0,1	1,5 ± 0,1	140 ± 5	25,2 ± 0,9
240,0 ± 0,1	4,2 ± 0,1	2,1 ± 0,1	140 ± 5	33,6 ± 1,2
300,0 ± 0,1	5,4 ± 0,1	2,7 ± 0,1	140 ± 5	42,0 ± 1,5
360,0 ± 0,1	6,4 ± 0,1	3,3 ± 0,1	140 ± 5	50,4 ± 1,8
420,0 ± 0,1	7,7 ± 0,1	3,9 ± 0,1	140 ± 5	58,8 ± 2,1
480,0 ± 0,1	8,9 ± 0,1	4,4 ± 0,1	140 ± 5	67,2 ± 2,4
540,0 ± 0,1	10,0 ± 0,1	5,0 ± 0,1	140 ± 5	75,6 ± 2,7
600,0 ± 0,1		5,5 ± 0,1	140 ± 5	84,0 ± 3,0
660,0 ± 0,1		6,1 ± 0,1	140 ± 5	92,4 ± 3,3
720,0 ± 0,1		6,7 ± 0,1	140 ± 5	100,8 ± 3,6

dove:

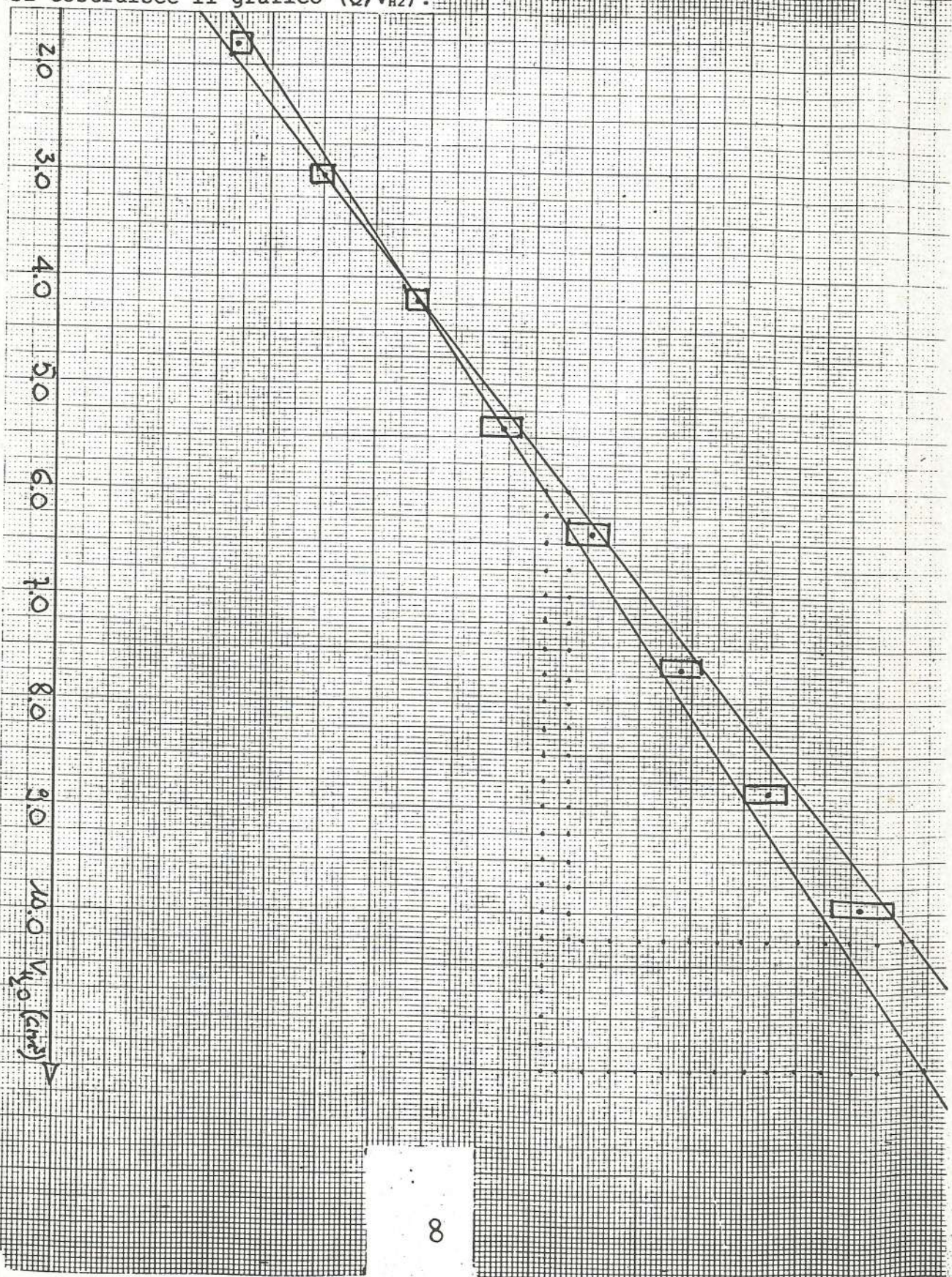
V_{H2} = volumi di H₂ svolto ai vari istanti

V_{O2} = volumi di O₂ " " "

I = intensità di corrente costante che passa nel circuito

Q = quantità di carica trasmessa ai vari istanti

Si costruisce il grafico (Q, V_{H2}) :



La pendenza del grafico risulta:

$$P = Q/V = (7,2 \pm 0,6) \text{ A}\cdot\text{s}/\text{cm}^3 = (7,2 \pm 0,6) \text{ C}/\text{cm}^3 ;$$

l'inverso K è più significativo:

$$K = 1/P = 0,139 \text{ cm}^3/\text{C} \cong 0,14 \text{ cm}^3/\text{C}$$

e rappresenta il volume di H_2 svolto al catodo per un passaggio di carica pari a 1C.

Conoscendo la densità dell'idrogeno possiamo trovare la massa di H_2 svolto per il passaggio di 1 C di carica. In condizioni normali (Pressione di 1 Atm, $T = 273 \text{ K}^\circ$) la densità dell'idrogeno vale: $d_{\text{H}_2} = 8,98 \cdot 10^{-5} \text{ g}/\text{cm}^3$ per cui:

$$m_{\text{H}_2} = d_{\text{H}_2} \cdot V_{\text{H}_2} = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ g}$$

Conoscendo la massa dell'atomo di idrogeno ($m_{\text{H}} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g}$) possiamo trovare il numero di atomi:

$$N^\circ \text{ atomi} = 1,25 \cdot 10^{-5} / 1,66 \cdot 10^{-24} = 0,753 \cdot 10^{19}$$

Per liberare un atomo di H_2 , nell'ipotesi che questi si depositino uno alla volta, servirà una carica:

$$1\text{C} / 0,753 \cdot 10^{19} = 1,33 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Un calcolo analogo si può fare considerando l' O_2 svolto. Il risultato è anche migliore considerando la densità dell'idrogeno alla effettiva temperatura di lavoro ($t = 24^\circ\text{C}$). Se le prove sono eseguite più volte (ad esempio da vari gruppi) si può costruire questa seconda tabella:

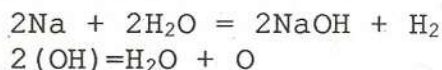
GRUPPO	I (mA)	K (cm ³ /A·s)
1	70	7,2 ± 0,3
2	80	8 ± 1
3	90	5,6 ± 0,6
4	100	7,3 ± 0,2
5	110	7,5 ± 0,5
6	120	7,5 ± 0,5
7	130	7,6 ± 0,4
8	140	7,2 ± 0,6

dove le I sono le intensità di lavoro dei singoli gruppi.
Calcolando K medio si procede come già visto.

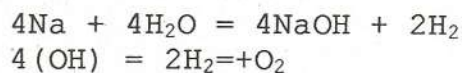
3) CONCLUSIONI E OSSERVAZIONI

a) Se invece di prendere in considerazione l'idrogeno esaminiamo l'ossigeno, si trova che ogni atomo di O per essere liberato ha bisogno di una carica doppia di quella necessaria per liberare un atomo di H. Inoltre se usiamo soluzioni contenenti altri elementi come Zn, Pb, Al, ..., si osserva che la carica richiesta per liberare e far depositare un atomo di un qualunque elemento è uguale alla carica per atomo di H o ad un multiplo di questa carica espresso da un numero intero piccolo. Ciò significa che nessun elemento richiederà, ad esempio 1,5 volte la carica di H per essere liberato. Per questa ragione la carica necessaria a liberare un atomo di H è stata detta carica elementare ed è la più piccola carica esistente in natura.

b) Soluzione di NaOH (Na⁺, OH⁻)



oppure:

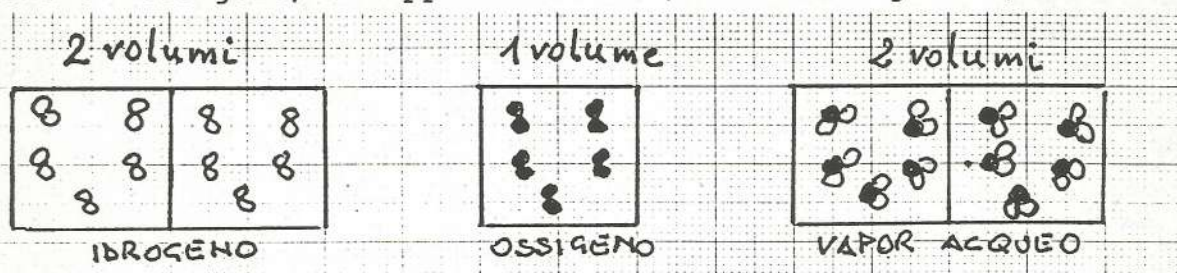


Per produrre idrogeno e ossigeno serve il doppio di acqua di quanto ne venga prodotta. Lentamente tutta l'acqua verrà dissociata. Rimane il sale.

c) Perché H₂ ha volume doppio di O₂?

Ciò si verifica sia nella decomposizione che nella sintesi di H₂O. La risposta sta nella legge dei volumi gassosi di Gay-Lussac "Quando due gas si combinano fra loro, il rapporto fra i volumi di essi che insieme reagiscono è espresso da numeri interi assai semplici e se il prodotto della reazione è pure esso gassoso, è dato da numeri interi assai semplici anche il rapporto fra il suo volume e quello di ciascuna specie gassosa reagente" e nella legge di Avogadro "volumi uguali di gas, nelle identiche condizioni di temperatura e pressione contengono lo stesso numero di molecole". Allora la legge dei volumi trova spiegazione. Se supponiamo infatti che le molecole di idrogeno e ossigeno siano biatomiche, la formazione di due volumi di vapor acqueo da due volumi di idrogeno

ed uno di ossigeno, ci appare chiara (v. schema seguente):



d) Gli elettrodi preferibili sono di platino o acciaio inox (altri metalli possono subire reazioni o, se di carbone, assorbire parte del gas che si sviluppa)

e) Se si considera il rapporto fra la quantità (massa) dell'idrogeno e dell'ossigeno ottenute decomponendo l'acqua, di qualunque provenienza essa sia, per via elettrolitica o in qualunque altro modo, si osserva che si ottengono sempre ossigeno ed idrogeno nel rapporto (arrotondato) 8:1, indipendentemente dalle condizioni di esperienza (nell'elettrolisi indipendentemente dalla quantità di acqua usata, dalla pressione, dalla temperatura, dalla intensità di corrente (Legge di Proust).

4) ERRORI

$$\Delta I = Cl \cdot f.s. / 100 \quad (Cl = 1; \quad f.s. = 0,5 \text{ A})$$

$$\Delta V = 0,1 \text{ cm}^3$$

$$\Delta t = 0,1 \text{ s}$$

$$\Delta(I \cdot t) = \Delta Q = I \cdot t (\Delta I / I + \Delta t / t) \text{ ai fini del grafico } (Q, V).$$

Per trovare l'errore sulla determinazione di Q si applica la propagazione degli errori

BIBLIOGRAFIA:

- V. CARASSITI - P. CHIORBOLI (Chimica generale ed Inorganica)
- TRECCANI (Dizionario Enciclopedico Italiano)

LA LEGGE DI PROUST

Legge delle proporzioni definite e costanti

Questa legge della natura, scoperta da Proust con intuizione geniale nel 1799, afferma che quando due sostanze si combinano per formare un composto, esse reagiscono secondo proporzioni definite e costanti. Il rapporto di combinazione è dunque un numero caratteristico di ogni composto. Ciò significa che il rapporto delle masse delle sostanze che reagiscono resta costante in qualunque proporzione esse siano mescolate; se c'è troppo di una delle sostanze nella miscela quella che c'è in più non reagisce.

Lo scopo dell'esperimento è verificare questa legge mediante la reazione di sintesi del cloruro di zinco a partire da Zn metallico e acido cloridrico.

L'esperimento si conduce dando ai vari gruppi diverse quantità di Zn (variabili da 0,50 a 5,00 g) da far reagire con la stessa quantità di HCl (10 cm³, 6N) in modo tale che in alcuni casi sia in eccesso l'HCl, in altri sia in eccesso lo Zn. Ogni gruppo deve determinare la massa del composto ottenuto e calcolare il rapporto tra la massa dello zinco che ha reagito e quella del composto finale. I risultati ottenuti dai singoli gruppi verranno poi confrontati tra loro ed interpretati.

L'esperimento richiede due lezioni in quanto la reazione tra Zn e HCl necessita di parecchio tempo per completarsi.

Strumenti e materiale utilizzato: bilancia, provetta grande, cilindro graduato da 10 cm³, becker da 250 cm³, capsula di porcellana, fornellino ad alcool, sostegno con reticella, bacchetta di vetro, pastiglie di Zn (circa 0,5 g l'una), HCl 6N (diluire 1:1 l'HCl concentrato, versando l'acido nell'acqua e non viceversa). Occhiali di sicurezza. Cappa aspirante.

Procedimento

- 1) Determinare la massa dello Zn a disposizione ed introdurlo in una provetta.
- 2) Misurare 10 cm³ di HCl 6N e versarli nella provetta che contiene lo Zn.
Attenzione:
 - a) l'HCl è piuttosto concentrato: usare gli occhiali di sicurezza;
 - b) la reazione è piuttosto esotermica e per mantenere fredda la miscela conviene mettere la provetta a bagnomaria in un becker di acqua fredda;
 - c) operare sotto cappa aspirante.
- 3) Attendere che la reazione si completi (meglio fino alla lezione successiva).
- 4) Nel frattempo determinare la massa della capsula di porcellana.
- 5) Versare il liquido, contenuto nella provetta, nella capsula precedentemente massata.
Se è rimasto dello Zn in eccesso, fare in modo che resti nella provetta trattenendolo con una bacchetta di vetro. Lavare le pareti della provetta e lo Zn rimasto con 5 cm³ di acqua distillata e unire il liquido di lavaggio alla soluzione versata nella capsula.
- 6) Portare a secco la soluzione nella capsula, riscaldando fino a che il solido comincia a fondere.
Attenzione: usare gli occhiali di sicurezza e operare sotto cappa aspirante.
- 7) Nel frattempo asciugare lo Zn eventualmente avanzato e determinarne la massa.
- 8) Lasciare raffreddare la capsula contenente il prodotto fino a poterla maneggiare, quindi determinarne la massa.

Tabella raccolta dati di gruppo

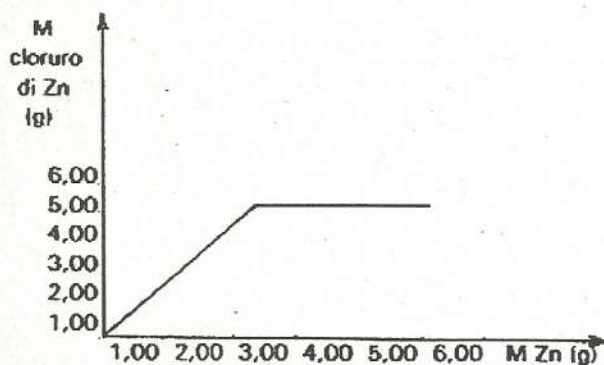
V_{acido} (cm³) $M_{\text{Zn iniz}}$ (g) $M_{\text{Zn rim}}$ (g) $M_{\text{Zn reag}}$ (g) $M_{\text{cloruro di Zn}}$ (g) $M_{\text{Zn}}/M_{\text{cloruro di Zn}}$

Dati campione

Gruppo	V_{acido} (cm ³)	$M_{\text{Zn iniz}}$ (g)	$M_{\text{Zn rim}}$ (g)	$M_{\text{Zn reag}}$ (g)	$M_{\text{cloruro di Zn}}$ (g)	$M_{\text{Zn}}/M_{\text{cloruro di Zn}}$
1	10,0±0,1	0,48±0,01	/	0,48±0,01	0,98±0,01	0,49±0,02
2	10,0±0,1	0,98±0,01	/	0,98±0,01	2,02±0,01	0,48±0,01
3	10,0±0,1	1,40±0,01	/	1,40±0,01	2,88±0,01	0,49±0,01
4	10,0±0,1	1,88±0,01	/	1,88±0,01	3,92±0,01	0,48±0,01
5	10,0±0,1	2,38±0,01	0,07±0,01	2,31±0,02	4,95±0,01	0,47±0,01
6	10,0±0,1	2,82±0,01	0,48±0,01	2,34±0,02	4,92±0,01	0,48±0,01
7	10,0±0,1	3,76±0,01	1,39±0,01	2,37±0,02	4,93±0,01	0,48±0,01
8	10,0±0,1	4,29±0,01	1,90±0,01	2,37±0,02	4,92±0,01	0,48±0,01

Analizzando i risultati ottenuti si può stabilire che il rapporto di combinazione tra la massa di Zn che ha reagito e la massa di cloruro di zinco che si è formato è: $0,48 \pm 0,01$.

La costanza dei rapporti di combinazione può essere messa in risalto costruendo un grafico che riporti in ascissa le masse di Zn utilizzate e in ordinata le masse di prodotto ottenuto.



Il grafico mostra chiaramente che l'eventuale eccesso di reattivo non partecipa alla reazione.

I risultati ottenuti consentono anche di stabilire la formula molecolare minima del composto sintetizzato. Raccogliendo in una tabella i dati relativi alle diverse possibili formule molecolari, si può trovare a quale rapporto di combinazione teorico si avvicina maggiormente il rapporto di combinazione determinato sperimentalmente.

Formula ipotetica	N° atomi Zn	N° atomi Cl	M _{Zn} (uma)	M _{Cl} (uma)	M _{cloruro di Zn} (uma)	M _{Zn} /M _{cloruro di Zn}
ZnCl	1	1	65,4	35,5	100,9	0,65
Zn ₂ Cl	2	1	130,8	35,5	166,3	0,19
ZnCl ₂	1	2	65,4	71,0	136,4	0,48

La formula che rispecchia meglio il rapporto di combinazione determinato sperimentalmente, è quella che contiene Zn e Cl nel rapporto 1:2.

L'equazione chimica bilanciata che rappresenta la reazione in esame è la seguente:



UN PO' DI STORIA

1. L'attività di oggi riguarda alcuni esperimenti che verranno eseguiti con un apparecchio che porta il nome di Dalla Valle, un collega che molti di noi conoscono.

2. Il dispositivo è stato progettato per una innovazione didattica di grande rilievo: l'introduzione del concetto di energia e della sua conservazione a livello elementare, evitando il percorso tradizionale svolto nell'ambito della meccanica:

- cinematica
- dinamica
- lavoro di una forza
- energia cinetica, potenziale, ecc.

3. L'idea di una tale innovazione parte da lontano, ma è collegata all'insegnamento di questi anni di molti di noi. Ne racconto brevemente la storia, perché ci riguarda da vicino.

4. La storia inizia negli USA, dove si avverte la necessità di un corso propedeutico alle discipline scientifiche (Biologia, Chimica, Fisica) che gli studenti possono scegliere o meno, in quell'ordine, negli ultimi tre anni della scuola secondaria superiore. Tale corso andrebbe inserito all'inizio della secondaria, per ragazzi di 14-15 anni.

Alla fine degli anni '50 era stato messo a punto il corso PSSC, un corso di Fisica che conteneva, all'inizio, alcuni capitoli sulla struttura della materia.

Nei primi anni '60 viene fatta una revisione generale di quei capitoli, viene ampliato il discorso e nasce la prima versione del corso IPS, mentre dalle successive edizioni del PSSC scompare l'introduzione alla struttura della materia.

Nel corso IPS l'ultimo capitolo è dedicato al calore e ai fenomeni termici.

Alla fine degli anni '60 tale capitolo scompare dalla nuova versione del corso, l'argomento viene sviluppato in un percorso didattico dedicato all'energia e inserito nel corso PS2, che diventa la seconda parte del corso IPS.

IPS e PS2, oggi organicamente unificati, costituiscono quel corso propedeutico di cui era stata avvertita la necessità.

5. Nel PS2 l'energia viene presentata in modo operativo attraverso una serie di attività sperimentali che seguono una linea abbastanza semplice.

- Si parte dalla calorimetria, con riscaldatori elettrici e scambi termici tra due corpi a temperatura diversa messi in contatto fra loro;

- si introduce la nozione di quantità di calore e si trova la sua relazione con la variazione di temperatura e le proprietà fisiche degli oggetti;

- si prende in considerazione l'attrito, determinato dallo strofinamento di due corpi uno contro l'altro, come sorgente di calore di natura meccanica.

Per misurare il calore sviluppato per attrito si utilizza un cilindretto di alluminio, di capacità termica molto piccola (intorno a $3 \text{ cal/}^\circ\text{C}$), del quale si rileva l'aumento di temperatura.

- Si determina sperimentalmente come la quantità di calore sviluppato dipenda dalle condizioni (di tipo meccanico) che hanno prodotto l'attrito e si introducono le nozioni di energia potenziale, cinetica, ecc.

6. In Italia il PSSC arriva negli anni '60, l'IPS e il PS2 arrivano negli anni '70.

Le innovazioni didattiche e l'approccio metodologico di questi corsi vengono adottati in molte sperimentazioni in atto nelle scuole italiane.

Le nuove idee sono presentate e discusse nei corsi di aggiornamento, nei convegni, nei congressi dell'AIF.

7. Il Liceo Scientifico di Lugo di Romagna, dove insegna Francesco Dalla Valle, è uno dei tre centri nazionali del MPI, dotato di laboratori scientifici molto forniti e di una officina attrezzatissima dove lavora Enzo Cortesi.

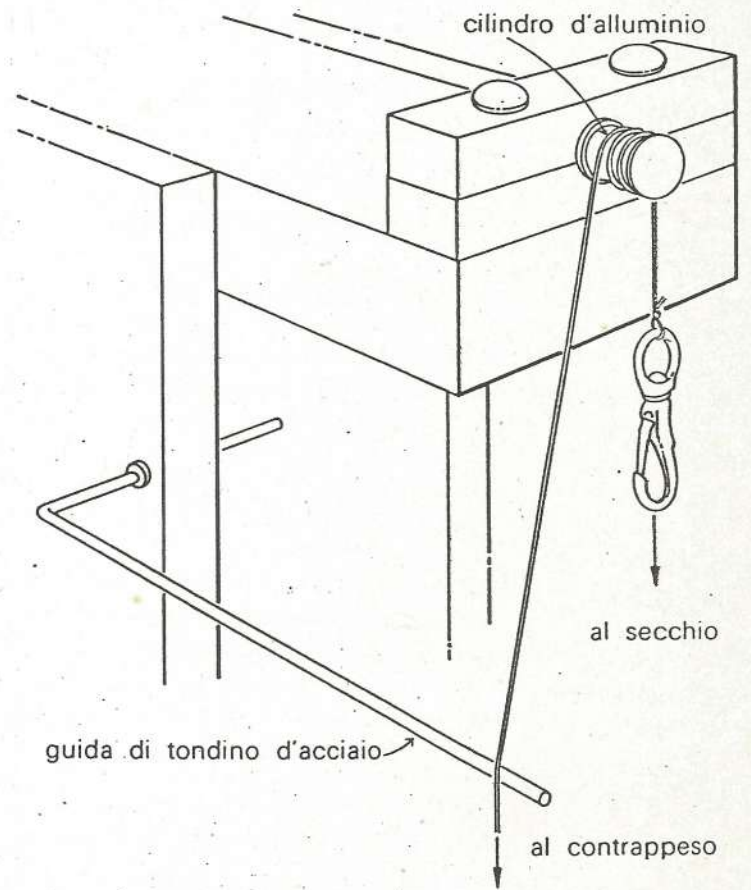
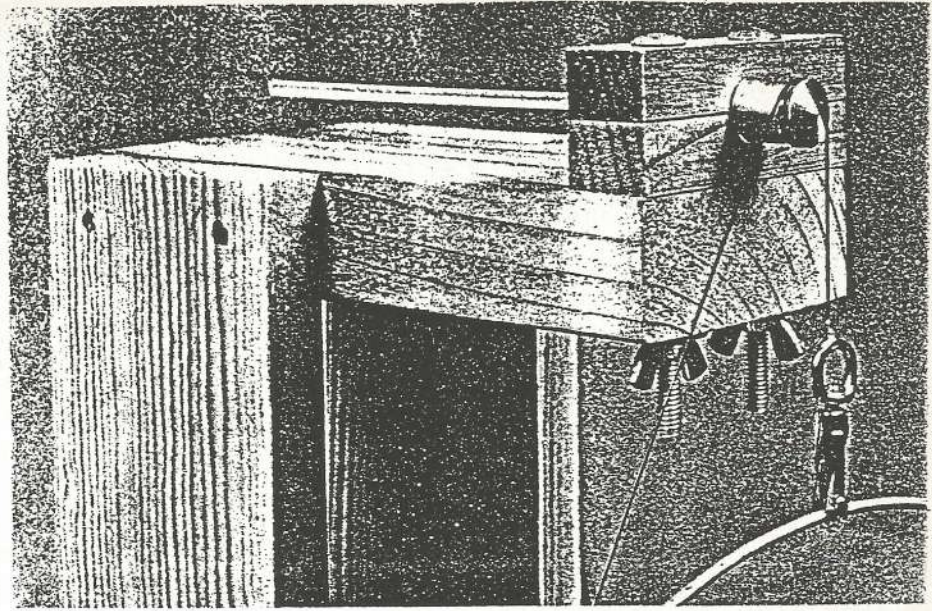
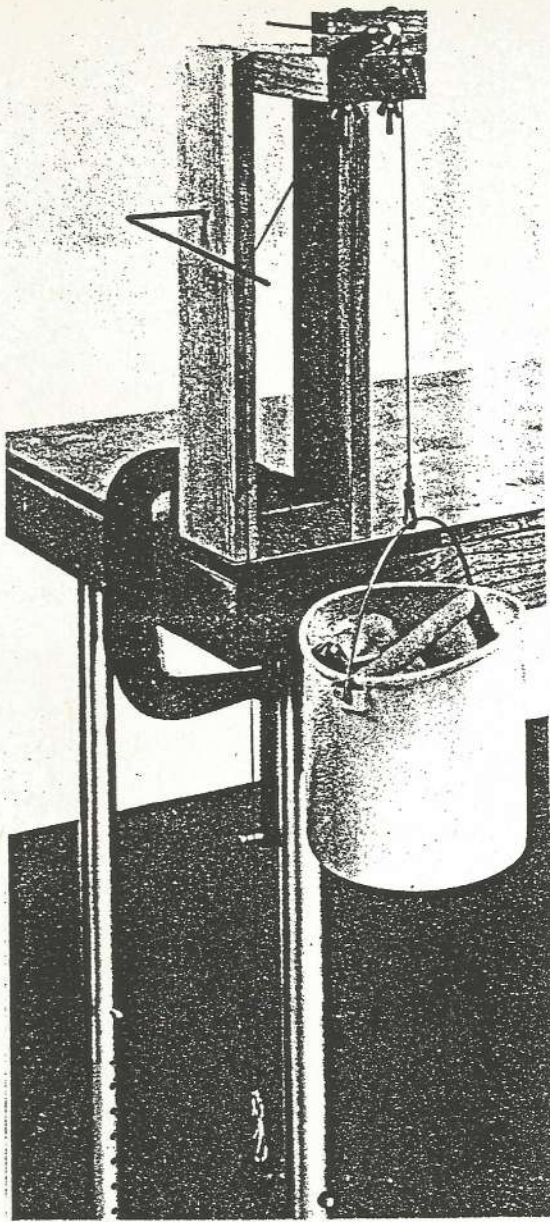
Nelle sperimentazioni del biennio dell'istituto si seguono i corsi IPS e PS2.

8. In un esperimento del PS2, per introdurre la nozione di energia potenziale associata alla posizione di un grave nel campo gravitazionale terrestre, il cilindretto di alluminio è fissato a una tavola e attorno ad esso è avvolto strettamente un cordino di nylon che a una estremità regge un secchio pesante mentre all'altra estremità è tenuto in tensione da un contrappeso. Quando il secchio scende lentamente, frenato dall'attrito del cordino che strofina contro l'alluminio, il cilindretto si riscalda. Nota la capacità termica, dalla misura dell'aumento di temperatura si ricava la quantità di calore sviluppato Q . Facendo ripetute prove è possibile stabilire la dipendenza di Q dal peso netto del grave disceso e dall'altezza di caduta. Q è di fatto una misura della perdita di energia potenziale gravitazionale.

Nei loro esperimenti con i ragazzi, Dalla Valle e Cortesi riscontrarono una scarsa regolarità nei risultati delle misurazioni, che non erano ugualmente buoni in tutte le situazioni in cui si doveva operare.

Provarono allora a utilizzare cilindretti metallici di tipo diverso, ma con poca fortuna.

Rendendosi conto che una parte del calore veniva sempre portato via dal cordino di nylon, modificarono l'intero dispositivo. Ora il grave si trascina dietro una cinghia di plastica per imballaggi, tenuta



schacciata, con pressione regolabile, tra due ganasce costituite da due dischetti metallici.

L'apparecchio funzionava meglio del dispositivo del PS2, ma anche la cinghia sottraeva calore al sistema. Allora apportarono una modifica sostanziale ricorrendo a un moto rotatorio anziché lineare per produrre l'attrito. Questa volta un corpo conico veniva spinto dentro alla cavità conica, con lo stesso profilo, di un altro corpo sul quale era avvolto il filo che reggeva il grave. Scendendo, quest'ultimo faceva svolgere il filo e ruotare il corpo conico cavo con sviluppo di calore a causa dell'attrito.

Il dispositivo funzionava meglio del precedente, ma i corpi metallici avevano la tendenza a grippare e il metallo a fondere, per cui si resero necessarie alcune modifiche che portarono, finalmente, alla soluzione definitiva del problema, rappresentata dall'apparecchio che useremo oggi.

DESCRIZIONE DELL'APPARECCHIO E MODALITA' D'USO

1. La struttura in cui viene sviluppato il calore mediante l'attrito è sostanzialmente costituita da:

a) un elemento circolare metallico di rame, opportunamente sagomato in modo da presentare, al suo centro e coassiale con esso, una cavità cilindrica adatta a ospitare il bulbo di un termometro al decimo di grado, e in modo da possedere all'esterno, tutt'intorno, una scanalatura simile alla gola di una carrucola. Entro la gola, con un estremo fissato a uno dei suoi bordi, viene avvolto un filo di acciaio, ricoperto di nylon, del tipo usato per la pesca in alto mare; all'altra estremità del filo viene appeso il grave da far discendere.

b) Due blocchetti cilindrici di legno, con le basi ricoperte di sughero, opportunamente sagomati per corrispondere alla forma dell'elemento circolare metallico e premere in modo uniforme contro di esso. I blocchetti vengono stretti mediante un'apposita vite che permette di regolare l'attrito e di far scendere il grave con la velocità desiderata.

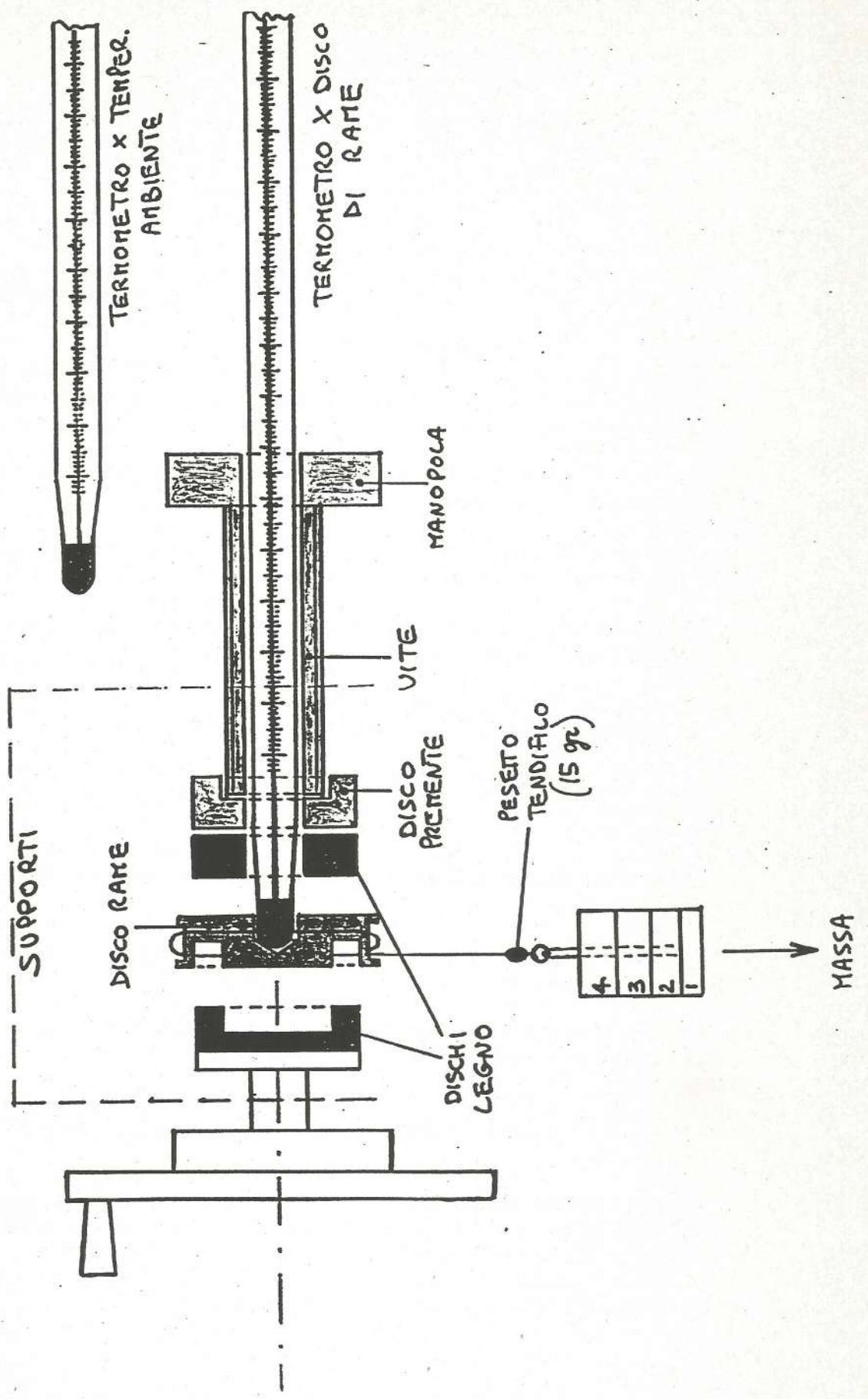
2. Accompagna la struttura un secondo termometro, sempre al decimo di grado, per misurare la temperatura dell'ambiente esterno in prossimità dell'elemento sensibile.

La conoscenza di tale temperatura si rende necessaria per potere adottare un accorgimento che consenta di compensare gli inevitabili scambi termici, che avvengono sempre, tra l'apparecchio e l'ambiente durante gli esperimenti.

Conviene, infatti, iniziare sempre l'esperimento con una temperatura del sistema che sia al di sotto della temperatura ambiente, ma tale da raggiungere, al termine dell'esperimento, una temperatura che risulti al di sopra di quella ambiente. La scelta migliore è quella di fare in modo che le temperature, iniziale e finale, risultino il più possibile simmetriche rispetto alla temperatura ambiente. Operando in questo modo, la quantità di calore che l'ambiente cede al sistema nella prima parte dell'esperimento

APPARECCHIO DALLA VALLE - CORTESI

- APPARATO DI AVVOLGIMENTO CAVETTO D'ACCIAIO
- ▣ APPARATO DI REGOLAZIONE FORZA D'ATTRITO



uguaglia quella che l'ambiente riceve dal sistema nella seconda parte, e l'apparecchio può essere considerato come se fosse termicamente isolato.

IL PERCORSO DIDATTICO ADOTTATO NEL BIENNIO

Per l'introduzione operativa del concetto di energia nel biennio LST, e in parte anche nel biennio ITIS, seguiamo sostanzialmente la seguente linea didattica.

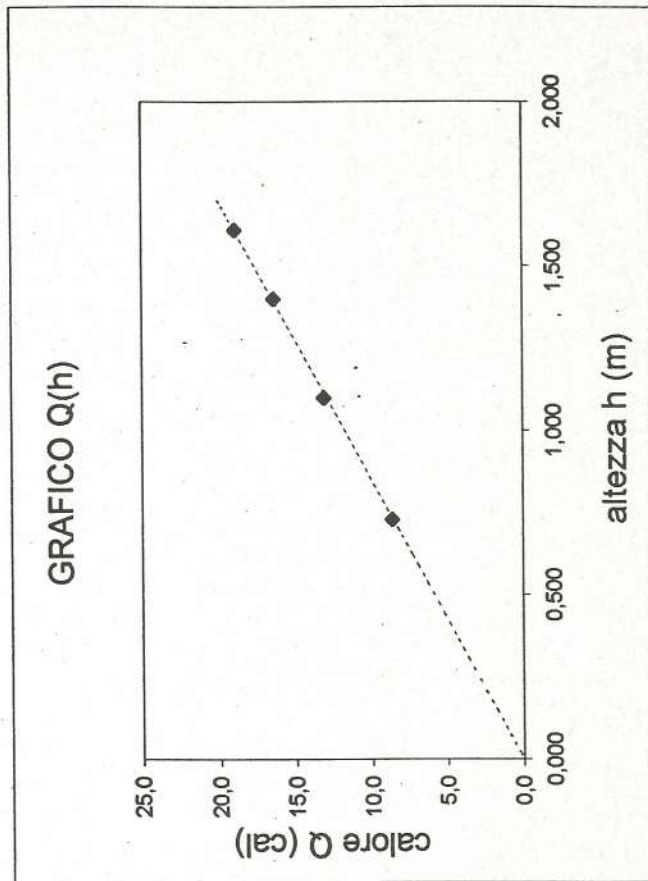
- 1) Scambi di calore tra due quantità d'acqua a temperatura diversa e raggiungimento dell'equilibrio termico usando recipienti di polistirolo espanso (ambiente termicamente isolato).
- 2) Nozione di quantità di calore, la caloria come unità di misura, relazione fondamentale della calorimetria ($Q = c_s m \Delta T$).
- 3) Produzione di calore con un dispositivo elettrico (il riscaldatore e la sua taratura in cal/s).
- 4) Proprietà termiche dei corpi e delle sostanze (capacità termica, calore specifico, calore di fusione, calore di vaporizzazione).
- 5) Produzione di calore con un dispositivo meccanico che sfrutta l'attrito (apparecchio di Dalla Valle).
- 6) Quantità di calore prodotta da gravi in caduta frenata ($L = Ph$, joule = newton·m, $Q = kL$, $Q = L$, energia potenziale gravitazionale ed energia termica).
- 7) Quantità di calore prodotta da gravi in caduta frenata lungo un piano inclinato.
- 8) Quantità di calore prodotta da gravi in caduta solo parzialmente frenata ($Q < L$, $L - Q \propto v^2$, energia cinetica).
- 9) Quantità di calore prodotta dalla caduta parzialmente frenata di un grave appeso a una molla ($Q < L$, $L - Q \propto x^2$, energia potenziale elastica).
- 10) Quantità di calore prodotta dal rilascio di una molla in tensione ($Q = -\Delta EP_{el}$).
- 11) Gli esperimenti mostrano che, nei limiti delle incertezze di misura, l'energia si trasferisce da un corpo a un altro, ma si conserva nel sistema complessivo, quando lo si può considerare isolato. Ciò risulta per tutte le forme di energia, compresa quella termica (primo principio della termodinamica).

CALORE PRODOTTO PER ATTRITO DALLA CADUTA FRENATA DI UN GRAVE (punto 6 del percorso didattico)

$g = 9,806 \text{ N/kg}$

A. Dipendenza dall'altezza di caduta

Tamb (°C)	Tini (°C)	Tfin (°C)	ΔT (°C)	%	C_T (cal/°C)	%	Q (cal)	%	m (kg)	%	P (N)	%	h (m)	%
24,50 ± 0,02	22,00 ± 0,02	27,35 ± 0,02	5,35 ± 0,04	0,8	3,54 ± 0,07	2,0	18,9 ± 0,5	2,8	4,909 ± 0,005	0,1	48,14 ± 0,05	0,1	1,610 ± 0,005	0,3
24,40 ± 0,02	22,50 ± 0,02	27,14 ± 0,02	4,64 ± 0,04	0,9			16,4 ± 0,5	2,9					1,400 ± 0,005	0,4
24,40 ± 0,02	22,80 ± 0,02	26,52 ± 0,02	3,72 ± 0,04	1,0			13,2 ± 0,4	3,0					1,100 ± 0,005	0,5
24,40 ± 0,02	23,20 ± 0,02	25,65 ± 0,02	2,45 ± 0,04	1,6			8,7 ± 0,3	3,6					0,730 ± 0,005	0,7



Il grafico suggerisce una relazione di proporzionalità diretta tra Q e h.

CALORE PRODOTTO PER ATTRITO DALLA CADUTA FRENATA DI UN GRAVE (punto 6 del percorso didattico)

$g = 9,806 \text{ N/kg}$

B. Dipendenza dal peso del grave

Tamb (°C)	Tini (°C)	Tfin (°C)	ΔT (°C)	C_T (cal/°C)	%	Q (cal)	%	m (kg)	%	P (N)	%	h (m)	%
$24,50 \pm 0,02$	$22,00 \pm 0,02$	$27,35 \pm 0,02$	$5,35 \pm 0,04$	$3,54 \pm 0,07$	2,0	$18,9 \pm 0,5$	2,7	$4,909 \pm 0,005$	0,1	$48,14 \pm 0,05$	0,1	$1,610 \pm 0,005$	0,3
$24,40 \pm 0,02$	$22,50 \pm 0,02$	$26,32 \pm 0,02$	$3,82 \pm 0,04$	1,0		$13,5 \pm 0,4$	3,0	$3,468 \pm 0,004$	0,1	$34,01 \pm 0,05$	0,1		
$24,40 \pm 0,02$	$23,30 \pm 0,02$	$25,50 \pm 0,02$	$2,20 \pm 0,04$	1,8		$7,8 \pm 0,3$	3,8	$2,011 \pm 0,003$	0,1	$19,72 \pm 0,05$	0,1		

Il grafico suggerisce una relazione di

proporzionalità diretta tra Q e P.

Ne deriva che Q dovrebbe essere

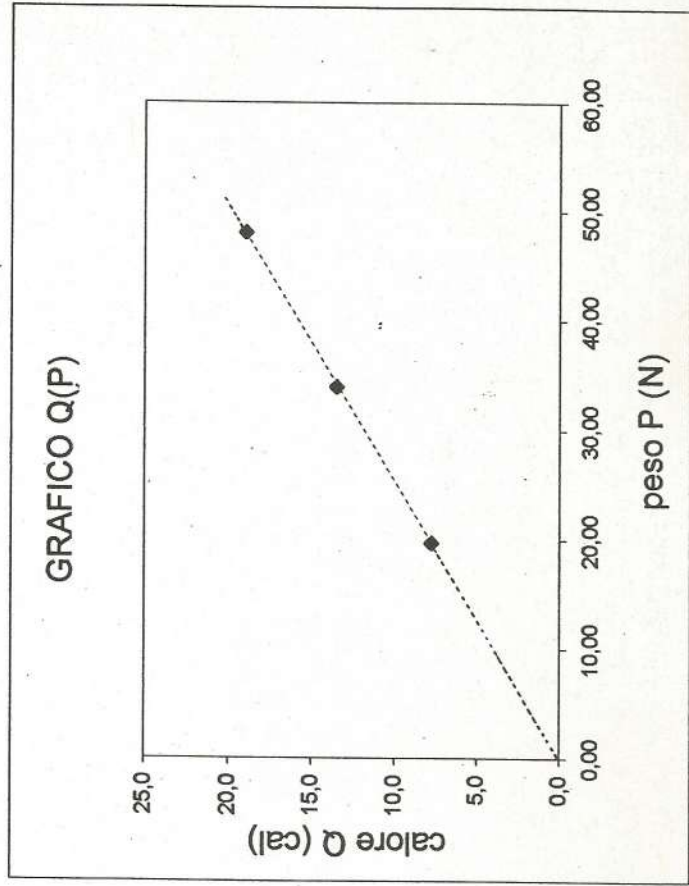
proporzionale al prodotto Ph, per cui

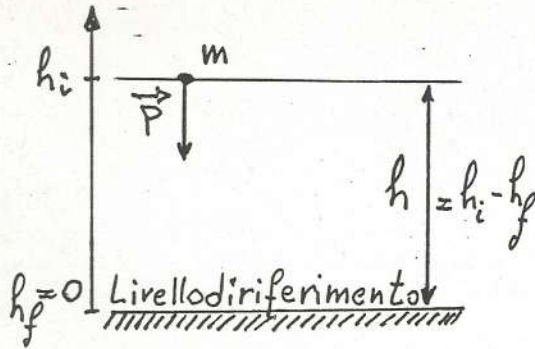
$Q/Ph = k$, con k costante.

Il calcolo di k con i dati delle due tabelle

confirma l'assunto e risulta:

$k = (0,24 \pm 0,01) \text{ cal/Nm}$





Ipotesi: il grave scende con velocità trascurabile ($v \approx 0$ m/s)

$$Q = kPh, \quad \text{con } k = (0,24 \pm 0,01) \text{ cal/Nm}$$

1. k non dipende né dal peso né dall'altezza di caduta: ciò significa che, dati P ed h , è determinato Q .

Un oggetto di peso P , posto all'altezza h sopra un determinato livello di riferimento, se fatto scendere a quota zero con le modalità indicate nell'ipotesi, produce una quantità di calore Q ben determinata, prevedibile e calcolabile.

2. Ogni volta che l'oggetto viene riportato alla stessa quota, viene rimesso nelle condizioni di potere produrre quella data quantità di calore Q .

3. Possiamo pensare di sfruttare la caduta dei gravi per produrre calore e riscaldare, per esempio, dell'acqua invece di utilizzare il riscaldatore elettrico. Ciò è stato fatto da Joule nel secolo scorso con l'apparecchio descritto in molti testi (vedi anche: V. Zanetti, "Percorsi di Fisica", Bologna, Zanichelli, 1990, pag. 333).

a) Per scaldare un litro d'acqua aumentando la temperatura di $1,00$ °C, da quale altezza si dovrebbe fare scendere una massa di $5,00$ kg?

b) Per ottenere lo stesso risultato, quale massa si dovrebbe fare scendere di $2,00$ m?

c) Per ottenere lo stesso risultato, quante volte si dovrebbe fare scendere di $2,00$ m una massa di $5,00$ kg?

4. In tutti i calcoli precedenti è stato determinante il prodotto Ph . Tale quantità rappresenta il lavoro compiuto dalla forza peso ($L = Ph$). Esso si misura in Nm e tale unità è stata chiamata joule (J), in onore del fisico James Prescott Joule.

5. La caduta di un grave può essere sfruttata per produrre tanti effetti diversi, tutti descritti come trasferimenti di energia da un grave che scende, perdendo energia di posizione, a un ascensore che sale, acquistando energia di posizione, oppure a una molla che si allunga, acquistando energia elastica, o a un generatore elettrico che accende una lampadina (vedi il testo citato, paragrafo 11.2).

Anche l'esperimento di Joule può essere interpretato in termini di energia: cadendo in modo frenato il grave perde energia di posizione che viene trasferita all'acqua per mezzo dell'attrito che le palette incontrano dentro al mulinello. Diminuisce l'energia di posizione del grave, ma aumenta l'energia termica dell'acqua.

Il nostro esperimento può essere interpretato in modo analogo a quello di Joule, solo che l'energia di posizione persa dal grave si trasferisce al disco di rame.

6. Nel nostro esperimento:

- a) - diminuisce l'energia di posizione del grave,
- la diminuzione è espressa dal lavoro L della forza peso,
- indicando con EP_1 l'energia iniziale di posizione, a quota h_1 misurata rispetto al livello di riferimento, e con EP_f l'energia finale di posizione, a quota $h_f = 0$ m, scriveremo:

$$EP_1 - EP_f = L \quad (1)$$

- b) - aumenta l'energia termica del disco di rame,
- l'aumento di energia termica è espresso dal calore Q sviluppato,
- indicando con ET_1 l'energia termica iniziale, alla temperatura T_1 , e con ET_f l'energia termica finale, alla temperatura T_f , scriveremo:

$$ET_f - ET_1 = Q \quad (2)$$

7. La relazione $Q = kL$, con $k = (0,24 \pm 0,01)$ cal/joule, ci dice che l'aumento dell'energia termica del disco di rame corrisponde alla diminuzione di energia di posizione del grave, nel senso che a ogni dato L corrisponde un unico e ben determinato Q .

In particolare, per $L = 1$ joule si ha $Q = (0,24 \pm 0,01)$ cal, per cui 1 joule equivale a 0,24 cal entro il 4%; ovvero, 1 cal = 4,2 joule entro il 4%, cioè 1 cal = $(4,2 \pm 0,2)$ joule.

La caloria e 11 joule sono due unità di misura di variazioni di energia e quindi anche di energia.

Il joule è l'unità di energia del Sistema Internazionale.

La caloria è caduta in disuso e viene utilizzata ancora solo in campo medico e ... scolastico!

8. Se si misurano in joule sia il lavoro L sia il calore Q , il risultato dei due esperimenti eseguiti con l'apparecchio di Dalla Valle diventa semplicemente:

$$Q = L \quad (3)$$

La relazione (3) equivale alla seguente affermazione:

aumento dell'energia termica del disco =
= diminuzione dell'energia potenziale del grave

che, per la (1) e la (2), diventa in simboli:

$$ET_f - ET_1 = EP_1 - EP_f$$

9. Dall'ultima relazione si ricava che:

$$ET_f + EP_f = ET_1 + EP_1 \quad (4)$$

Essa ci dice che, considerando l'apparecchio di Dalla Valle come un sistema unico costituito dal grave e dal dischetto di rame ad esso collegato, la somma delle energie associate alle singole parti del sistema, cioè la sua energia totale, rimane complessivamente la stessa anche se in esso è avvenuta una trasformazione.

Come vedremo, tale risultato costituisce uno dei tanti esempi di un principio generale che, almeno finora, non ha mai avuto eccezioni: in un sistema isolato l'energia totale si conserva.

10 Che cosa succede se si esclude l'ipotesi iniziale e il grave cade con velocità non più trascurabile? Che cosa ci aspettiamo?

INTRODUZIONE AI FENOMENI ELETTRICI

(a cura dei docenti di fisica del biennio; disegni di R. Cugini)

- A. Manifestazione di forze che agiscono a distanza (dalla cattedra)
1. Forza gravitazionale: lasciare cadere un chiodo.
 2. Forza magnetica: attirare il chiodo vincendo la forza gravitazionale.
 3. Forza gravitazionale e resistenza dell'aria: lasciare cadere pezzettini di carta.
 4. Forza elettrica: attirare i pezzettini di carta vincendo la forza gravitazionale.

Le forze di interazione elettromagnetica hanno in natura un ruolo altrettanto importante di quelle di interazione gravitazionale. Oggi cominceremo a studiare i fenomeni che le riguardano direttamente.

B. Stati elettrici (dalla cattedra e a gruppi)

5. Una striscia di plastica trasparente viene strofinata con carta di giornale e appesa con un pezzo di nastro adesivo lungo un paio di spanne: essa viene respinta da un'altra striscia di plastica uguale strofinata allo stesso modo.
6. Un foglio di acetato arrotolato viene strofinato con un secondo pezzo di carta di giornale e appeso anch'esso con nastro adesivo: viene respinto da un altro foglio di acetato arrotolato e strofinato allo stesso modo.
7. Se, invece, al foglio arrotolato sospeso si avvicina la striscia di plastica trasparente, si ha attrazione.
8. Se alla striscia sospesa di plastica trasparente si avvicina il foglio arrotolato di acetato, si ha attrazione.

Facendo prove analoghe con materiali plastici diversi si trova che si comportano o come la plastica trasparente o come l'acetato. Ciò consente di affermare che esistono degli stati, provocati dallo strofinio, di due specie: uno si presenta con sostanze che si comportano come la plastica trasparente, l'altro con sostanze che si comportano come l'acetato.

I due stati vengono detti elettrici e interpretati come la manifestazione, sulla superficie strofinata dei corpi, di una proprietà della materia chiamata carica elettrica. La carica che si manifesta su tutti quei materiali che si comportano come la plastica trasparente è detta positiva, quella che si manifesta sui materiali che si comportano come l'acetato è detta negativa.

Considerando le forze di interazione osservate ai punti 5, 6, 7, 8 diremo che esse sono repulsive quando agiscono tra cariche dello stesso segno, sono attrattive quando agiscono tra cariche di segno opposto.

Inoltre, per quanto si è potuto vedere, esse cambiano di intensità con la distanza, indebolendosi quando essa aumenta e diventando molto intense a distanza ravvicinata.

C. Induzione elettrica (dalla cattedra e a gruppi)

9. Striscia di carta del marcatempo, lunga un paio di spanne, appesa senza essere stata strofinata: viene attratta da qualsiasi corpo carico, indipendentemente dal segno della carica elettrica.

10. Striscia di carta di alluminio, lunga un paio di spanne, appesa senza essere stata strofinata: viene attratta da qualsiasi corpo carico, indipendentemente dal segno della carica elettrica.

11. Pallina di polistirolo espanso sospesa con un filo di nylon molto sottile, lungo tre o quattro spanne: viene attratta da qualsiasi corpo carico, indipendentemente dal segno della carica elettrica.

12. Piccolo getto d'acqua che esce dal rubinetto: viene attratto da qualsiasi corpo carico, indipendentemente dal segno della carica elettrica.

In tutti i casi siamo indotti a pensare che un corpo carico, quando viene avvicinato ad un altro corpo scarico, produca su quest'ultimo un effetto particolare che dia luogo ad attrazione. Tale effetto prende il nome di induzione.

Da quanto visto in precedenza è evidente che sul corpo scarico deve in qualche modo manifestarsi una carica di segno opposto a quella del corpo inducente. Ne deriva che le cariche elettriche debbono essere già presenti entro la materia e non venire create al momento dello strofinamento.

Per approfondire la questione proseguiamo con altri esperimenti.

D. Conduttori e isolanti (dalla cattedra)

13. Pallina di polistirolo espanso, ricoperta di grafite e sospesa con un filo di nylon molto sottile lungo tre o quattro spanne, posta a contatto con l'estremità di una bacchetta metallica orizzontale appoggiata su un becker di vetro: toccando l'altra estremità della bacchetta con un corpo carico, la pallina si allontana e rimane un po' distanziata da essa.

Toccando la bacchetta con un dito viene ripristinata la condizione iniziale.

14. Ripetendo le stesse operazioni con una bacchetta di vetro o di plastica al posto di quella metallica, non succede nulla. La pallina non si sposta. Se però si ruota la bacchetta di 180° , invertendo le posizioni delle sue estremità, si può osservare che la sferetta, dopo avere toccato la nuova estremità della bacchetta, ne viene respinta. Se si scarica la sferetta, toccandola con un dito, essa riacquista la propria posizione iniziale a contatto con la bacchetta.

L'esperimento 13 si interpreta facilmente ammettendo che il corpo con cui è stata toccata l'estremità libera della bacchetta abbia ceduto parte della propria carica, per contatto, all'asta metallica; la carica si sia distribuita lungo tutta la bacchetta fino a includere

anche la pallina; le forze repulsive fra le cariche presenti sulla bacchetta e sulla pallina abbiano fatto allontanare quest'ultima.

Tutto ciò non si è verificato nell'esperimento 14 dove la carica, che la bacchetta di plastica ha ricevuto dal corpo che l'ha toccata, è rimasta localizzata e non ha potuto distribuirsi in tutta l'asta.

Materiali in cui, come nei metalli, le cariche elettriche possono spostarsi liberamente vengono detti conduttori. Materiali in cui, come nella plastica, le cariche elettriche non possono spostarsi vengono detti isolanti. Nell'esperimento 13 sono conduttori l'acciaio, la grafite e il corpo umano, sono isolanti il nylon e il vetro.

E. Interpretazione microscopica

La materia, come è già stato visto in precedenza, ha una struttura granulare. E' stato però riscontrato che i corpuscoli costituenti la materia, cioè le molecole e gli atomi, hanno una struttura complessa e, a loro volta, sono il risultato della combinazione di tre tipi di particelle fondamentali: elettroni, protoni e neutroni.

Gli elettroni e i protoni hanno, oltre alla massa, anche la proprietà carica elettrica; i neutroni, invece, sono dotati di massa, ma sono privi di carica.

La massa dei protoni è quasi uguale alla massa dei neutroni, mentre quella degli elettroni è più piccola di tre ordini di grandezza.

La carica dei protoni è uguale a quella degli elettroni, ma di segno opposto; positiva la prima, negativa la seconda.

Tutti i protoni sono uguali fra loro e quindi indistinguibili uno dall'altro; così pure gli elettroni fra loro e i neutroni fra loro.

Gli atomi di tutti gli elementi hanno una struttura simile: un nucleo centrale formato da protoni e neutroni, attorno al quale si trova una nuvola (o guscio) di elettroni orbitanti.

Nel nucleo, che ha dimensioni inferiori a quelle dell'atomo di quattro ordini di grandezza, è concentrata tutta la carica positiva e praticamente tutta la massa.

L'atomo è considerato neutro quando il numero degli elettroni della nuvola è uguale al numero dei protoni del nucleo. Infatti la carica totale dell'atomo risulta nulla, in quanto somma algebrica delle cariche positive e negative.

Ne deriva che potremo ritenere neutro un corpo quando sono neutri tutti gli atomi che lo costituiscono.

Più in generale, considereremo neutro un corpo per il quale sia nulla la somma algebrica di tutte le cariche positive e negative presenti.

Di conseguenza, risulterà carico un corpo per il quale tale somma risulti diversa da zero: positivamente, se vi è un eccesso di cariche positive, negativamente nel caso contrario.

Gli elettroni sono le particelle che più facilmente gli atomi tendono a cedere o ad acquistare. Vi sono sostanze i cui atomi cedono

facilmente qualche elettrone del guscio più esterno. Ve ne sono altre i cui atomi, al contrario, acquistano facilmente qualche elettrone.

Pertanto accade che un corpo risulti carico positivamente, o negativamente, a seconda che esso abbia un difetto, oppure un eccesso, di elettroni rispetto alla condizione di neutralità.

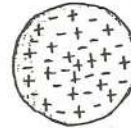
Per rappresentare un corpo neutro, oppure carico di uno o dell'altro segno, useremo disegni schematici come quelli rappresentati in figura 1, dove sono state evidenziate solamente le cariche in eccesso.

L'interpretazione, dal punto di vista microscopico, degli esperimenti di elettrizzazione per strofinio eseguiti all'inizio, sono illustrati nelle figure 2 e 3, dove è evidenziata la separazione di cariche ottenuta.

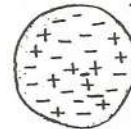
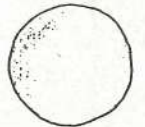
Le figure 4, 5, 6, 7, invece, evidenziano le azioni di repulsione, fra cariche dello stesso segno, e di attrazione, fra cariche di segno opposto, osservate negli esperimenti eseguiti in precedenza.

SITUAZIONE

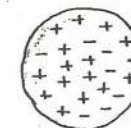
SCHEMA



CORPO NEUTRO



CORPO CON ECCESSO DI CARICA NEGATIVA



CORPO CON ECCESSO DI CARICA POSITIVA

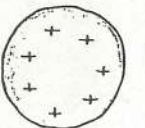


FIG. 1



FIG. 2

FIG. 3

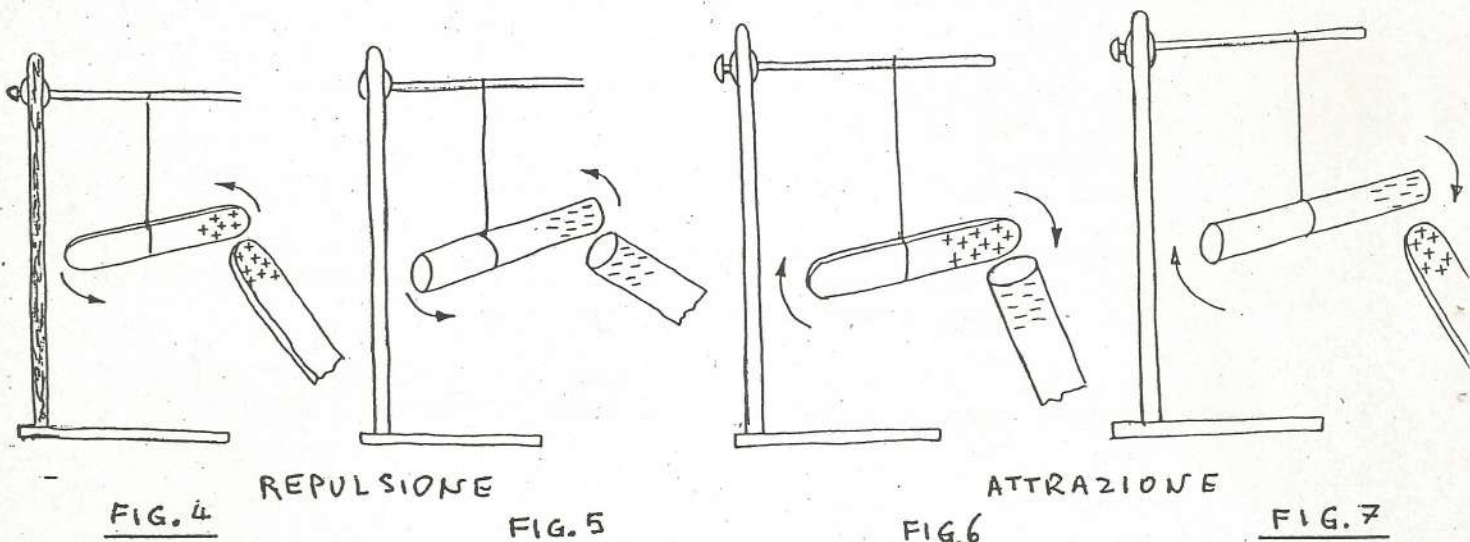


FIG. 4

REPULSIONE

FIG. 5

FIG. 6

ATTRAZIONE

FIG. 7

SEMPRE . ATTRAZIONE

Le figure 8 e 9 illustrano l'effetto attrattivo che sempre si verifica su di un qualsiasi corpo neutro, purché sufficientemente leggero, quando viene ad esso avvicinato un corpo elettricamente carico.

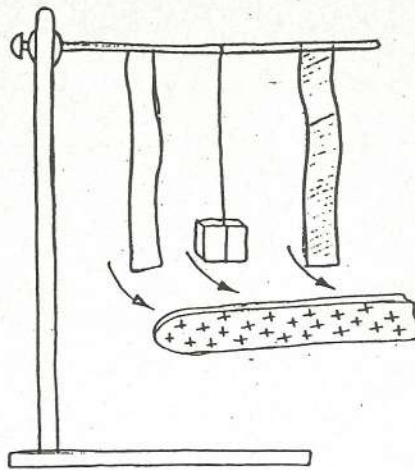


FIG. 8

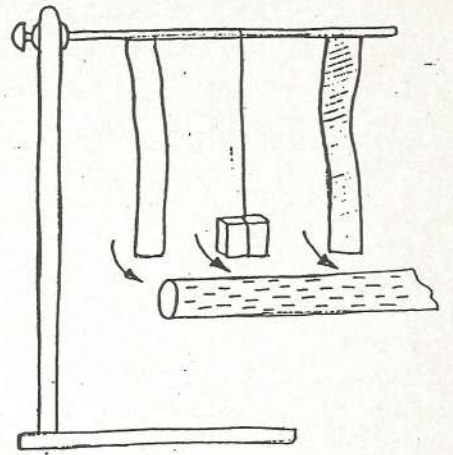


FIG. 9

Le figure 10a, 10b, 10c e 11a, 11b illustrano il diverso comportamento di un'asta conduttrice e di un'altra di materiale isolante, quando entrano in contatto con un corpo carico.

PRIMA

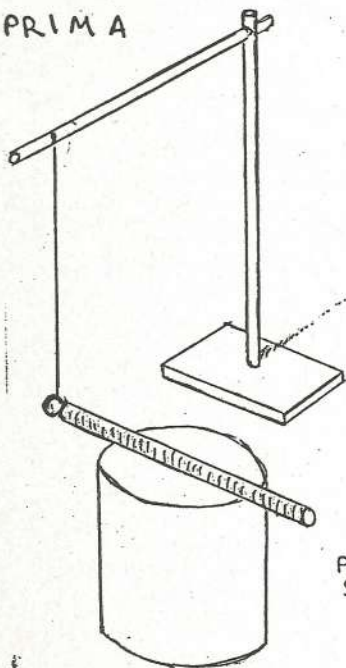


FIG. 10a

Pallina ricoperta di grafite

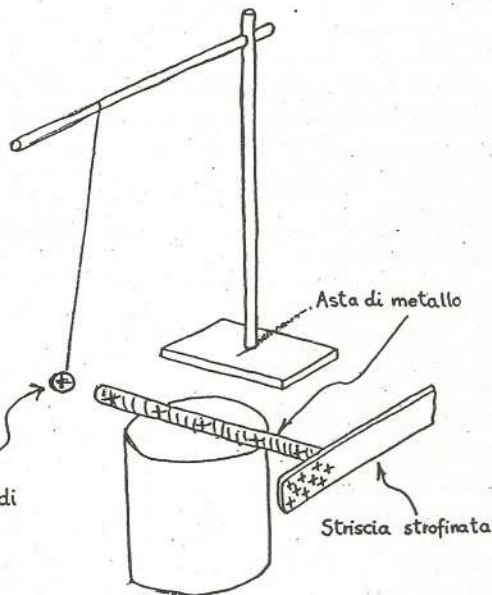


FIG. 10b

Asta di metallo

Striscia strofinata

DOPO

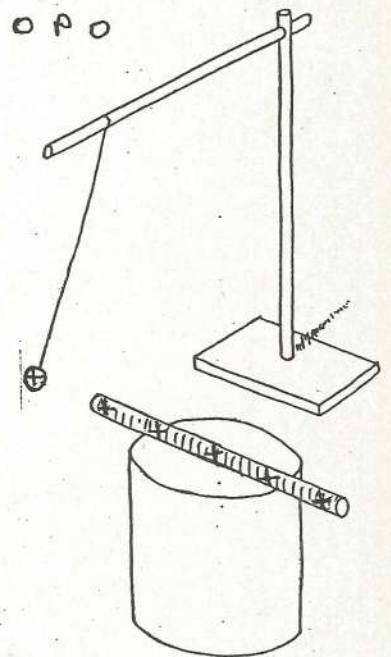


FIG. 10c

PRIMA

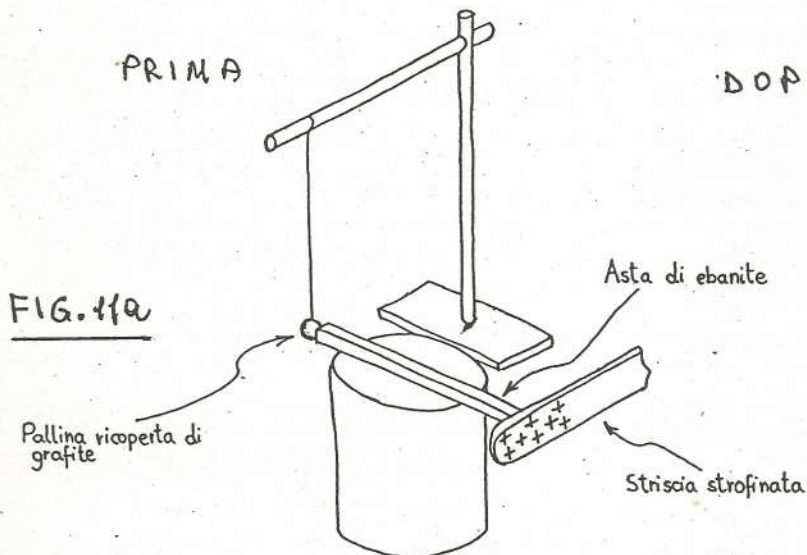


FIG. 11a

Pallina ricoperta di grafite

Asta di ebanite

Striscia strofinata

DOPO

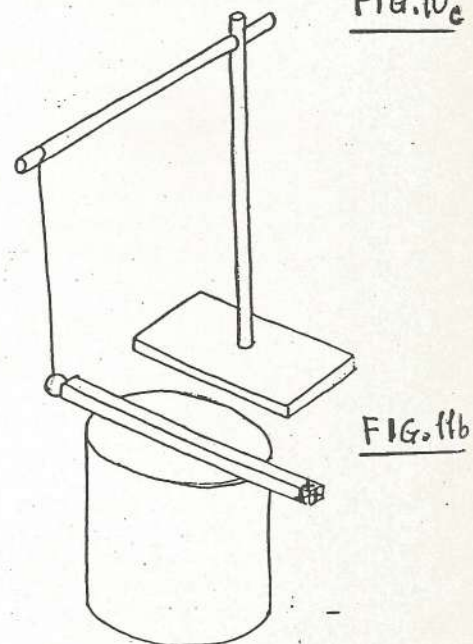


FIG. 11b

Il diverso comportamento dei conduttori e degli isolanti si può spiegare, dal punto di vista microscopico, nel modo seguente.

Nei conduttori, una parte degli elettroni è libera di spostarsi al loro interno. In media ogni atomo presente nel corpo libera uno o due elettroni, per cui entro l'oggetto si può immaginare contenuto una specie di gas di elettroni.

Quando si avvicina un corpo carico, positivamente o negativamente, il gas di elettroni si addensa, rispettivamente nella parte più vicina o in quella più lontana, lasciando scoperta all'altra estremità una carica positiva.

Negli isolanti, invece, l'interpretazione è diversa poiché non esiste un gas di elettroni liberi e la struttura materiale che costituisce queste sostanze è organizzata in dipoli. Sostanzialmente si tratta di molecole, nelle quali il centro delle cariche positive è spostato rispetto al centro delle cariche negative (figura 12).

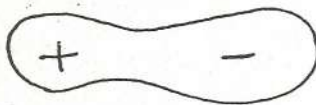


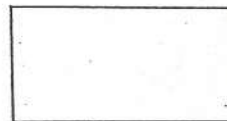
FIG. 12

Quando si avvicina un corpo carico, positivamente o negativamente, il dipolo tende a orientarsi, con la carica opposta rivolta dalla parte del corpo inducente. Poiché la miriade di dipoli presenti all'interno dell'oggetto seguono questo comportamento, il risultato complessivo è equivalente a una separazione di cariche opposte alle estremità dell'oggetto.

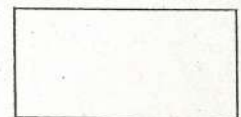
All'interno, invece, la carica complessiva è nulla perché le cariche dei vari dipoli, strato dopo strato, si compensano a vicenda. In figura 13 sono illustrati i due comportamenti descritti.

CARICHE INDOTTE

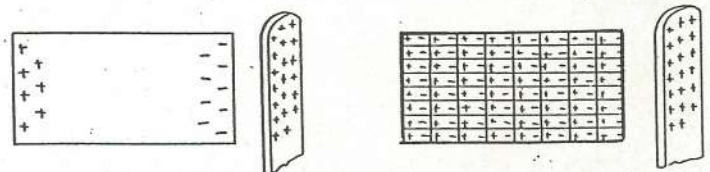
NEI CONDUTTORI
Corpo metallico neutro



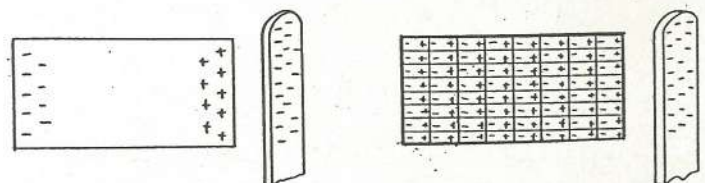
NEGLI ISOLANTI
Corpo di plastica neutro



Avvicinando, senza toccare, un corpo carico



Oppure



Gli esperimenti fin qui condotti, e la interpretazione che ne è stata data a livello microscopico, consentono di fare la seguente affermazione:

in natura le cariche elettriche non sono né create né distrutte; esse sono presenti nella materia, come proprietà delle particelle che la costituiscono e possono soltanto essere parzialmente separate.

FIG. 13

INDUZIONE ELETTRICA

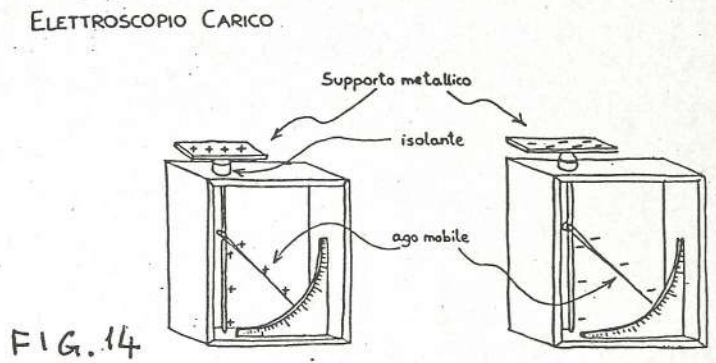
POLARIZZAZIONE DIELETTRICA

F. Un primo strumento: l'elettroscopio (dalla cattedra)

E' realizzato con materiale conduttore (foglioline o equipaggio mobile, pomello) e materiale isolante (supporti), come mostra la figura 14.

Serve a evidenziare la presenza di cariche elettriche, consente di valutarne il segno e di stimarne la quantità più o meno grande.

L'elettroscopio permette anche di studiare la ripartizione di una carica elettrica tra due corpi conduttori, evidenziando che l'oggetto di maggiori dimensioni riceve la frazione maggiore di carica.



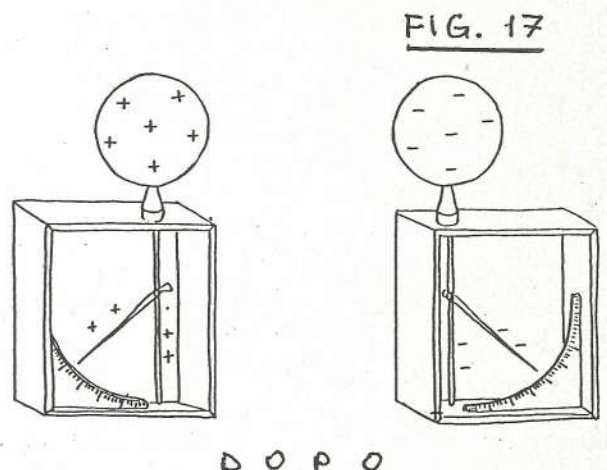
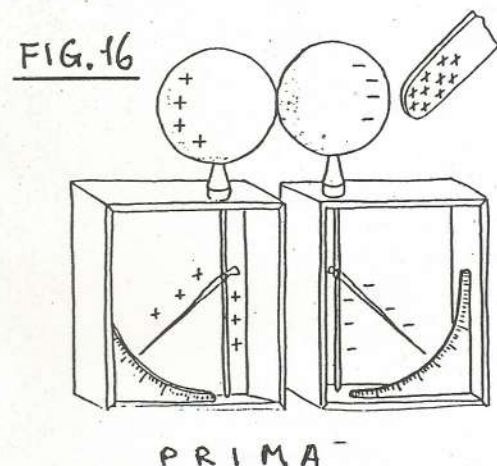
15. Corpo carico avvicinato all'elettroscopio: l'ago mobile ruota di un certo angolo, allontanandosi dalla verticale, e rivela la presenza di cariche indotte (figura 15); maggiore è l'ampiezza dell'angolo e più grande è il valore della carica.

Se si allontana il corpo carico inducente, l'ago ritorna alla posizione iniziale.

16. Elettroscopio carico in modo permanente: l'ago è ruotato di un certo angolo rispetto alla verticale, in posizione fissa, senza oggetti carichi nelle vicinanze. Se si avvicina, partendo da lontano, un corpo che porta una carica dello stesso segno, l'ampiezza dell'angolo aumenta. Se si avvicina, partendo da lontano, un corpo che porta una carica di segno opposto, l'ampiezza dell'angolo diminuisce; quando l'oggetto che si avvicina è molto carico, l'ampiezza può anche annullarsi e poi aumentare di nuovo.

Gli esperimenti 15 e 16 si spiegano con l'induzione elettrica nei conduttori.

17. Due oggetti metallici, montati su supporti isolanti, sono posti in contatto fra loro. Quindi, avvicinato un corpo carico a uno di essi, vengono separati: allontanato il corpo carico si rilevano sui due oggetti metallici cariche di segno opposto e di uguale valore (figure 16 e 17).



18. Uno degli oggetti metallici può essere sostituito dal corpo umano (figura 18) o dalla Terra (figura 19).

FIG. 18

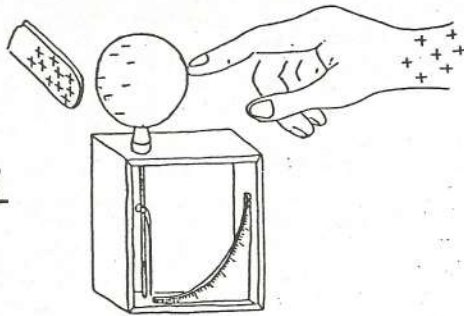
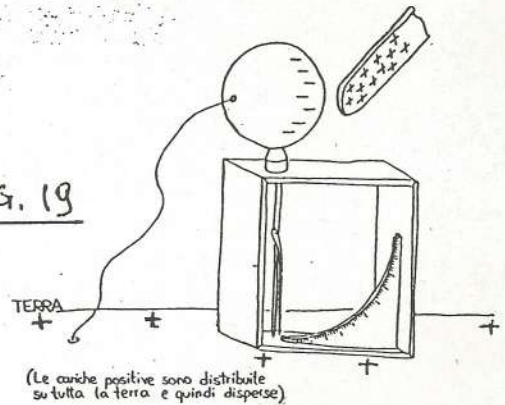


FIG. 19



19. L'elettroscopio può essere caricato:

- a) per strofinio, battendo il pomello con un panno di lana (figura 20);
- b) per contatto, toccando il pomello con un corpo carico (figure 21a, 21b, 21c);

PER STROFINIO

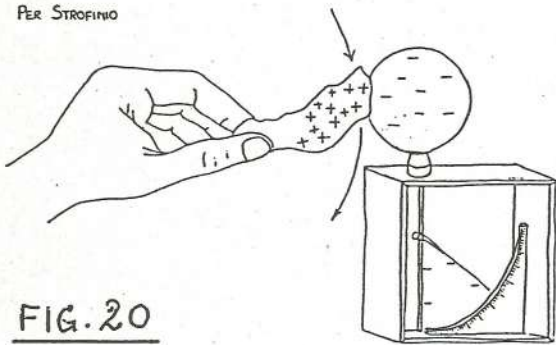


FIG. 20

PER CONTATTO

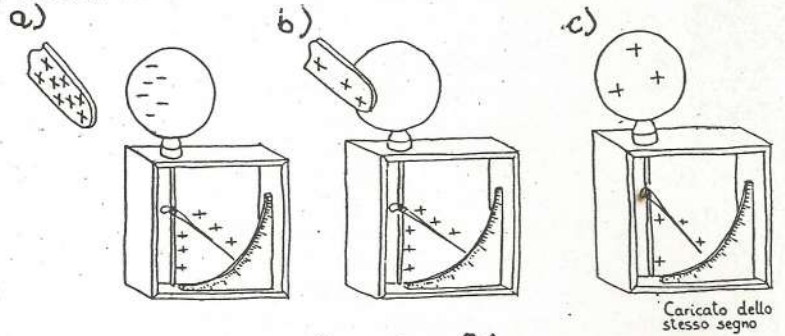
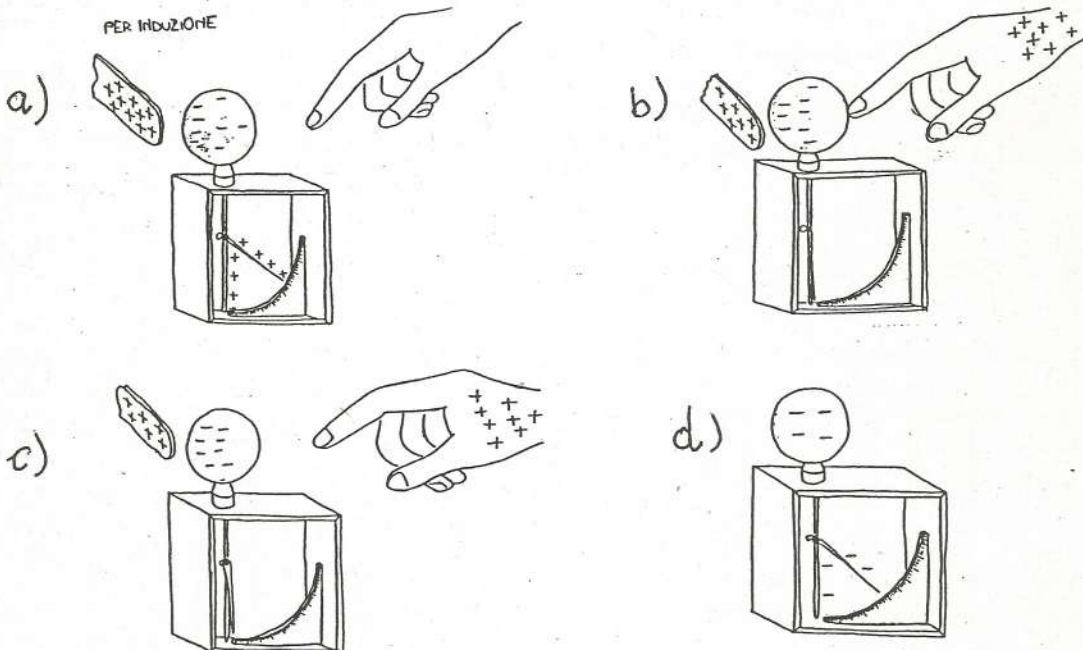


FIG. 21

- c) per induzione, avvicinando un corpo carico al pomello e toccando quest'ultimo per un attimo con un dito (figure 22a, 22b, 22c, 22d).

PER INDUZIONE



Caricato di segno opposto a quello della carica inducente.

FIG. 22

G. Elettroforo di Volta (dalla cattedra e a gruppi)

Realizzato con materiale conduttore (disco) e isolante (manico, lastra di acetato).

Serve a ottenere cariche di una certa consistenza.

Si carica per strofinio la lastra di acetato e, nonostante le apparenze, per induzione il disco.

Il filo di cotone costituisce un rudimentale elettroscopio incorporato.

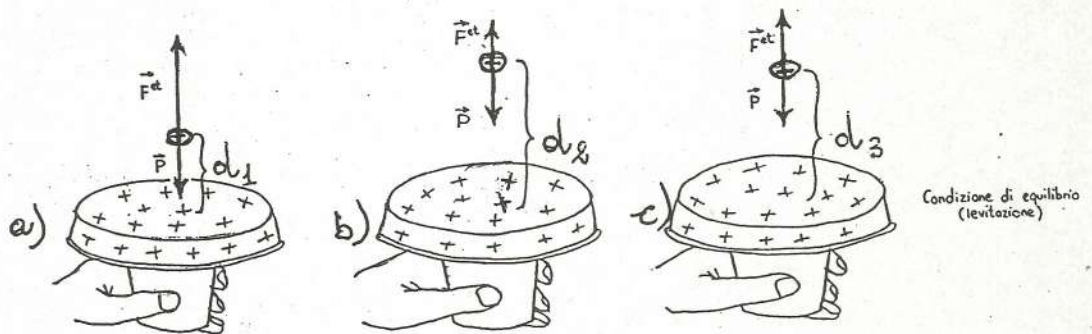
20. Piccolo batuffolino di ovatta lasciato cadere sul piatto, eventualmente privato del filo: caricatosi per contatto, il batuffolino levita sopra il piatto in condizioni di equilibrio tra il proprio peso e la forza elettrica repulsiva (figure 23a, 23b, 23c). Le intensità delle forze agenti sul batuffolino quando è troppo vicino, troppo lontano, alla giusta distanza dal disco sono evidenziate nelle figure 24a, 24b, 24c.

Per fare ricadere il batuffolino di ovatta basta scaricare il piatto avvicinando la nocca di un dito.

FIG. 23



FIG. 24



21. Batuffolino di ovatta che levita sul piatto dell'elettroforo, eventualmente privato del filo: toccato con una mano, il batuffolino ricade, si ricarica, risale. Mantenendo la mano a poche dita dal piatto, al di sopra del batuffolino, si osserva quest'ultimo scendere e salire freneticamente (probabilmente al contatto con la mano si scarica e ricarica di segno opposto a causa dell'induzione elettrostatica sul palmo).

22. Scintilla (osservabile su sfondo scuro) quando si scarica il piatto avvicinando la nocca di un dito: trasferimento di cariche elettriche attraverso l'aria dal disco al dito (o dal dito al disco) che evidenzia una brevissima corrente elettrica.

L'aria, che fino a questo punto si era comportata come un isolante, è diventata, per un attimo, conduttrice.

H. La bilancia a molla e la legge di Coulomb (dalla cattedra)

Realizzata dal tecnico S. Grecchi, la bilancia è simile a quella utilizzata da E. Rogers nei film didattici "La legge di Coulomb" e "La costante della legge di Coulomb" (figura 25). Differisce da quella essenzialmente nel fatto che la molla è applicata, rispetto al fulcro, dalla parte opposta.

Consente di misurare forze elettrostatiche ed è utile per verificare la legge di Coulomb.

In Appendice è riportata la teoria relativa al funzionamento della bilancia.

23. Controllo della scala

Sulla sfera 1 si pongono masse da 100 mg, 200 mg, 300 mg. In una prova sono state lette, rispettivamente, 12, 24, 35 divisioni.

Ciò ha confermato la buona linearità della scala. Inoltre, essendo $P = mg = 100 \text{ mg} \cdot 9,806 \text{ N/kg} = 9,806 \cdot 10^{-4} \text{ N}$, risulta $1 \text{ div} \approx 8,2 \cdot 10^{-5} \text{ N}$.

24. Dipendenza della intensità della forza dalle cariche, a parità di distanza

Le sfere 1 e 2 vengono caricate con il disco dell'elettroforo di Volta e messe in contatto fra loro, così da avere la stessa carica elettrica (massimo effetto repulsivo). Poste a una certa distanza, si legge sulla scala il valore della forza di repulsione.

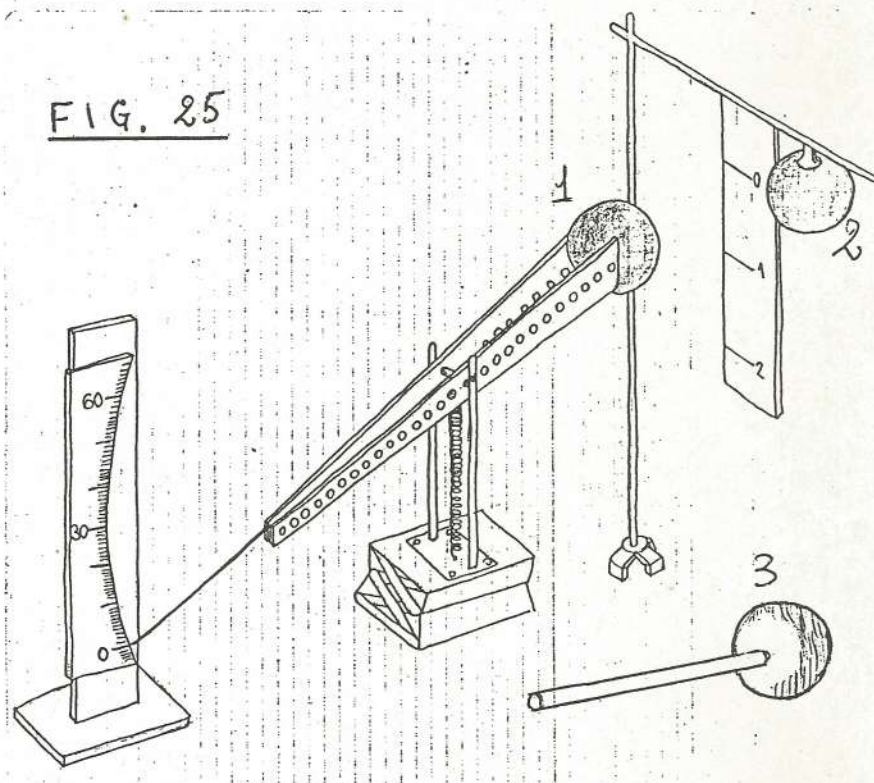
Toccando con la sfera 3, scarica, la sfera 2, si dimezza il valore della carica. Riportate le sfere 1 e 2 alla stessa distanza di prima, si legge nuovamente l'intensità della forza di repulsione.

Si ripetono le stesse operazioni, dopo aver dimezzato la carica anche sulla sfera 1.

I valori della forza repulsiva ottenuti in una prova sono stati, rispettivamente, 37, 17, 8 divisioni. Ciò ha confermato la proporzionalità diretta tra l'intensità della forza e il prodotto delle due cariche.

25. Dipendenza della intensità della forza dalla distanza, a parità di cariche

Le sfere 1 e 2 vengono nuovamente caricate con il disco dell'elettroforo di Volta, messe in contatto fra loro e poste a una distanza unitaria di una dozzina di centimetri; quindi si legge sulla scala l'intensità della forza di repulsione.



Le sfere vengono portate a distanza doppia e si legge il nuovo valore della forza.

Si ripetono le operazioni, triplicando la distanza.

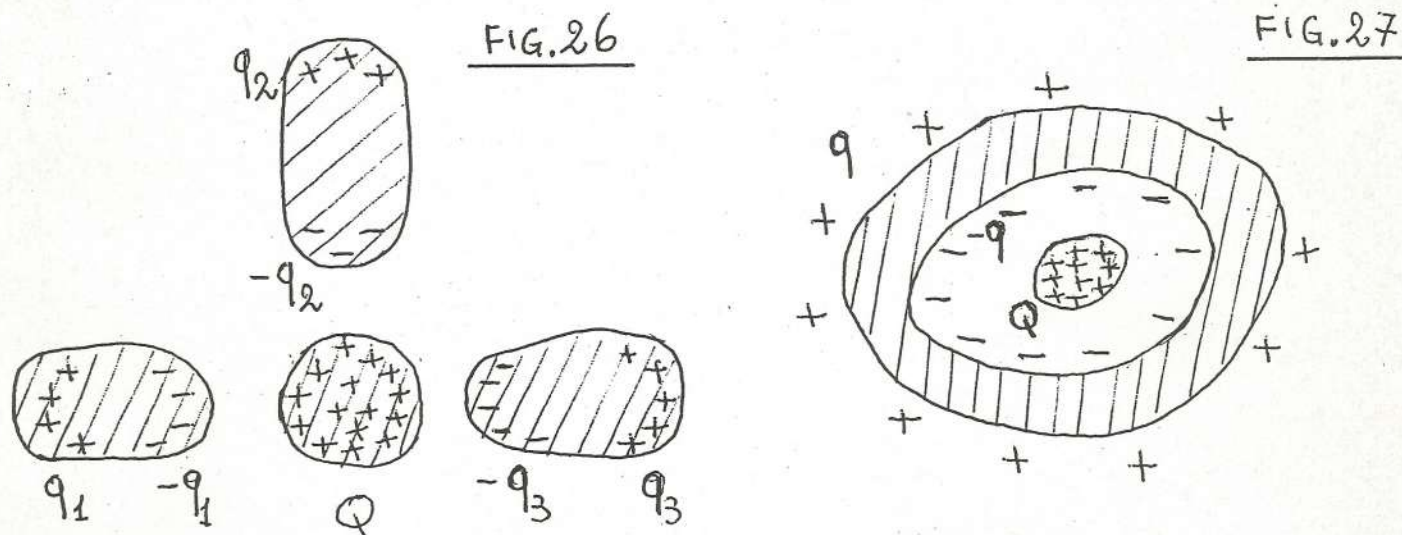
I valori della forza repulsiva ottenuti in una prova sono stati, rispettivamente, 60, 16, 6,5 divisioni. Ciò ha confermato la proporzionalità inversa tra l'intensità della forza e il quadrato della distanza.

26. Gli esperimenti con la bilancia a molla non costituiscono una prova della validità della legge di Coulomb, ma ne sono soltanto una verifica in qualche caso particolare. Maggiori garanzie si potrebbero avere dal riscontro sperimentale di qualche fatto nuovo, prevedibile in base a tale legge di forza. Ciò è vero, in particolare, per la totale assenza di qualsiasi effetto elettrico all'interno di una sfera metallica cava e carica.

Il discorso viene sviluppato in modo efficace da E. Rogers nel film didattico "La legge di Coulomb".

I. Induzione parziale e completa nei conduttori metallici (alla lavagna e dalla cattedra)

Esperimento ideale (per mancanza dei materiali): quando a un corpo metallico carico si avvicina un oggetto metallico scarico, su quest'ultimo si separano delle cariche per induzione. Se dalla parte opposta si avvicina un secondo oggetto metallico scarico, anche su di esso si separeranno delle cariche indotte. Ne deriva che la presenza del secondo oggetto ha fatto aumentare la quantità delle cariche indotte. Avvicinando altri corpi metallici scarichi, le cariche indotte aumenteranno ulteriormente (figura 26) e sorge quindi una domanda: fino a che punto potranno aumentare?



Al massimo si può circondare da tutte le parti il corpo carico con oggetti scarichi, realizzando praticamente un involucro metallico. L'induzione, in tal modo, risulta completa (figura 27). Quanto vale ora la carica indotta, prossima a quella inducente e di segno opposto a essa?

Ce lo dirà l'esperienza.

27. Sfera metallica e due calotte metalliche semisferiche: quando la sfera carica viene racchiusa fra le due calotte, su queste ultime si verifica l'induzione, con cariche di segno opposto all'interno, dello stesso segno all'esterno. Facendo toccare la sfera con la superficie interna delle calotte e allontanando nuovamente queste ultime, si verifica che la sfera è rimasta priva di carica.

Il risultato indica che la carica indotta sulla superficie interna dell'involucro realizzato con le due calotte semisferiche ha neutralizzato la carica inducente che si trovava sulla sfera, quindi aveva lo stesso valore di questa pur essendo di segno opposto (figura 28). Ne deriva che la carica presente sulla superficie esterna dell'involucro deve essere uguale a quella che prima era presente sulla sfera (figura 29).

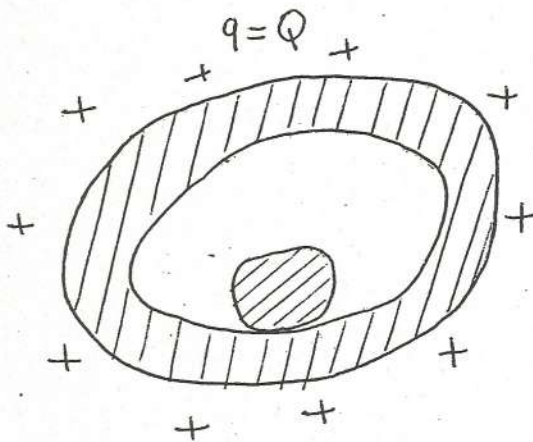


FIG. 28

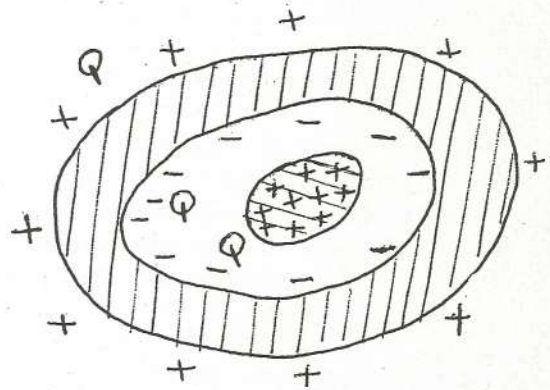
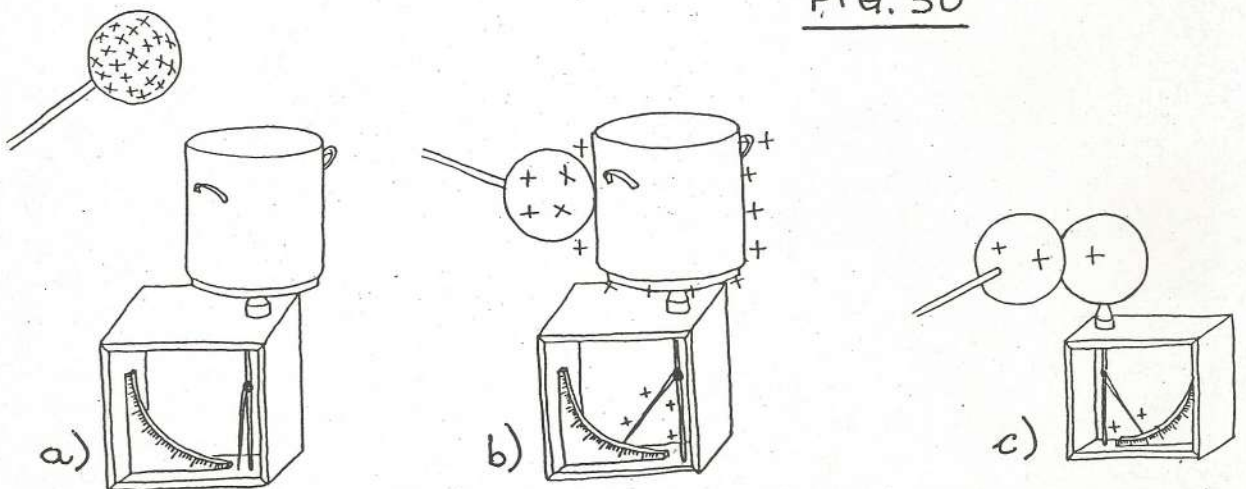


FIG. 29

28. Pentola sul piattello dell'elettroscopio e sfera carica su manico isolante: toccando la pentola esternamente con la sfera e controllando con un secondo elettroscopio, si constata che la sfera non si è scaricata del tutto (figure 30a, 30b, 30c).

FIG. 30



Toccando invece la pentola internamente, la sfera cede praticamente tutta la carica (figure 31a, 31b, 31c).

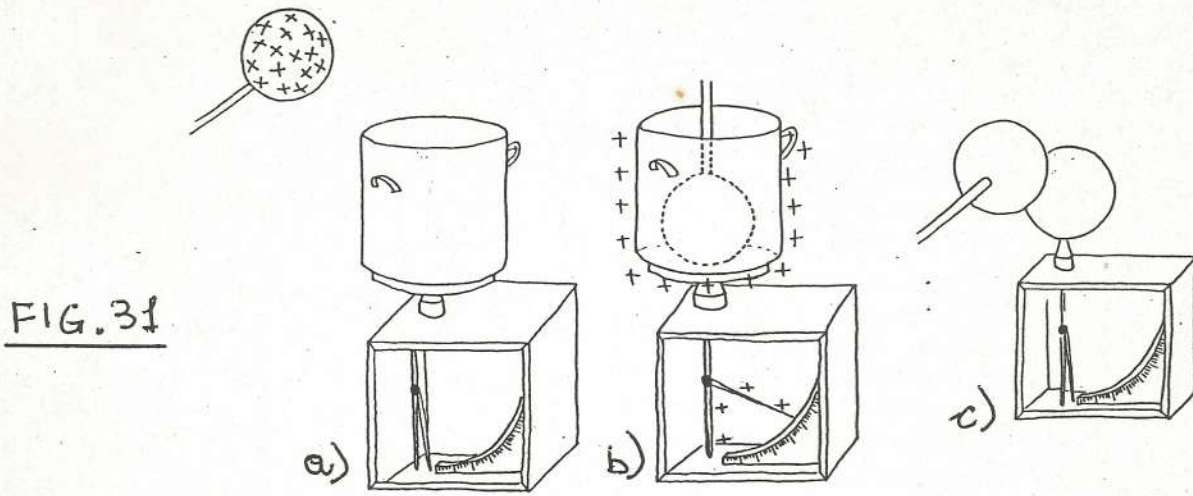


FIG. 31

L. Flusso di cariche elettriche attraverso strisce di carta (dalla cattedra)

29. Due sfere metalliche montate su elettroscopi: viene caricata una delle due, quindi si porta la seconda a contatto con la prima; gli elettroscopi evidenziano che la carica si è ripartita fra le due sfere.

30. Striscia di carta, lunga un paio di spanne, fissata agli estremi a due sfere metalliche montate su elettroscopi: si carica bene per induzione una delle sfere e si attende; osservando i due elettroscopi si nota che a poco a poco la seconda sfera acquista una carica mentre si riduce la carica sulla prima fino a raggiungere una situazione di equilibrio analoga a quella dell'esperimento 29 (figura 32).

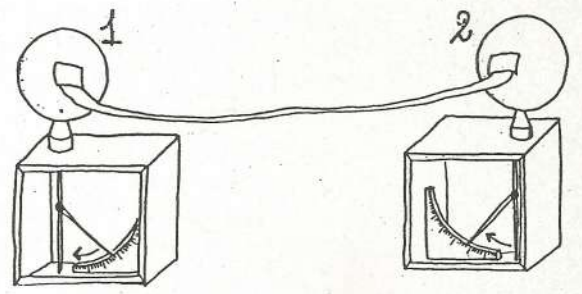


FIG. 32

L'interpretazione dell'esperimento 30 è immediata: la prima sfera ha ceduto una parte delle cariche alla seconda per mezzo della striscia di carta. Il flusso di cariche elettriche attraverso la carta è chiamata corrente elettrica.

La portata di cariche, analoga alla portata di un flusso d'acqua, è detta intensità della corrente: rappresenta la quantità di carica che attraversa in un secondo una qualsiasi sezione della striscia. L'intensità della corrente può essere più o meno grande come evidenziano gli esperimenti seguenti.

- 31. Come l'esperimento 30 con due strisce affiancate.
- 32. Come l'esperimento 30 con una striscia lunga il doppio.

M. Flusso permanente di cariche e lavoro elettromotore
(dalla cattedra)

33. Esperimento 30 modificato: su uno degli elettroscopi la pentola dell'esperimento 28 sostituisce la sfera 1, che viene montata su un manico isolante; caricata la pentola, si ripete l'esperimento 30 fino all'equilibrio.

Occorre un dispositivo che evidenzi la presenza della corrente elettrica. Esso dovrà essere inserito fra i due elettroscopi in modo da produrre effetti osservabili del passaggio delle cariche.

Pendolino elettrico costituito da una sferetta leggera, ricoperta di grafite, sospesa con un filo di nylon lungo alcune spanne, fra le armature verticali di un condensatore di Epino: inserito in serie fra gli elettroscopi dell'esperimento 30 è opportunamente regolato, mostra la sferetta in rapida oscillazione da un'armatura all'altra (figura 33). La frequenza delle oscillazioni, tuttavia, diminuisce poco a poco e cessa del tutto quando si raggiunge l'equilibrio elettrostatico.

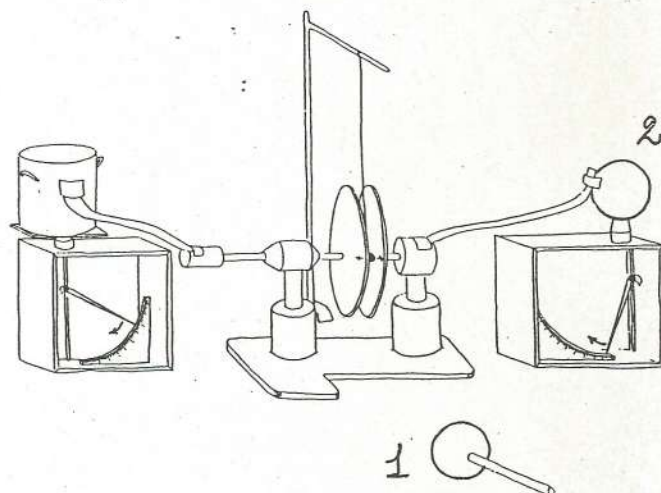


FIG. 33

La corrente elettrica costituisce una fase transitoria fra la condizione di equilibrio elettrostatico iniziale e quella dell'equilibrio elettrostatico finale. Per riattivare il flusso delle cariche, in modo da mantenere la corrente attraverso la striscia di carta, occorre riportare indietro le cariche dalla sfera 2 alla pentola lungo un percorso diverso.

Ciò può essere fatto prelevando cariche dalla sfera 2 mediante il contatto con la sfera 1, montata sul manico isolante, e poi scaricando quest'ultima dentro alla pentola, grazie all'induzione pressoché completa (figura 34). Se l'operazione viene ritmicamente ripetuta, si osserva che il pendolino continua a oscillare, evidenziando un flusso di cariche permanente.

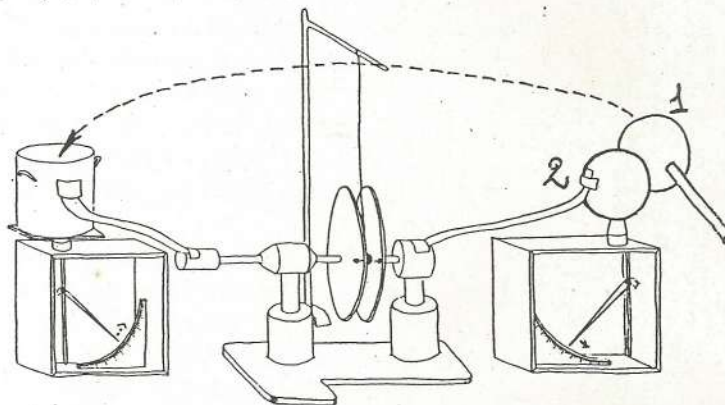


FIG. 34

L'operatore, nel riportare le cariche sulla pentola, deve compiere un lavoro per vincere le forze elettriche repulsive che si esercitano fra le cariche sulla pentola e quelle trasportate dalla sfera. Il lavoro viene compiuto dalla forza muscolare, non elettrica, a spese dell'energia interna ricavata dal cibo.

L'operatore costituisce una 'pila umana'.

Si può fare meglio sostituendo l'operatore con un apparecchio apposito, l'alimentatore.

34. L'alimentatore di alta tensione è un separatore di cariche: le due sfere montate sugli elettroscopi vengono collegate rispettivamente al polo positivo e al polo negativo dell'apparecchio, mettendo a terra il polo centrale; quando l'alimentatore viene messo in funzione le due sfere si caricano e si può controllare che le cariche sono opposte.

35. Esperimento 33 modificato: l'operatore viene sostituito dall'alimentatore di alta tensione; si raggiunge una situazione di equilibrio elettrodinamico, in cui il continuo fluire delle cariche è evidenziato dalla sferetta del pendolino in rapida oscillazione.

La corrente non rappresenta più una fase transitoria tra due condizioni di equilibrio elettrostatico, perché è diventata un fatto permanente, a causa del costante disequilibrio elettrico fra le due sfere assicurato dall'alimentatore.

APPENDICE

Aspetti teorici della bilancia a molla di S. Grecchi (a cura di M. Francesio)

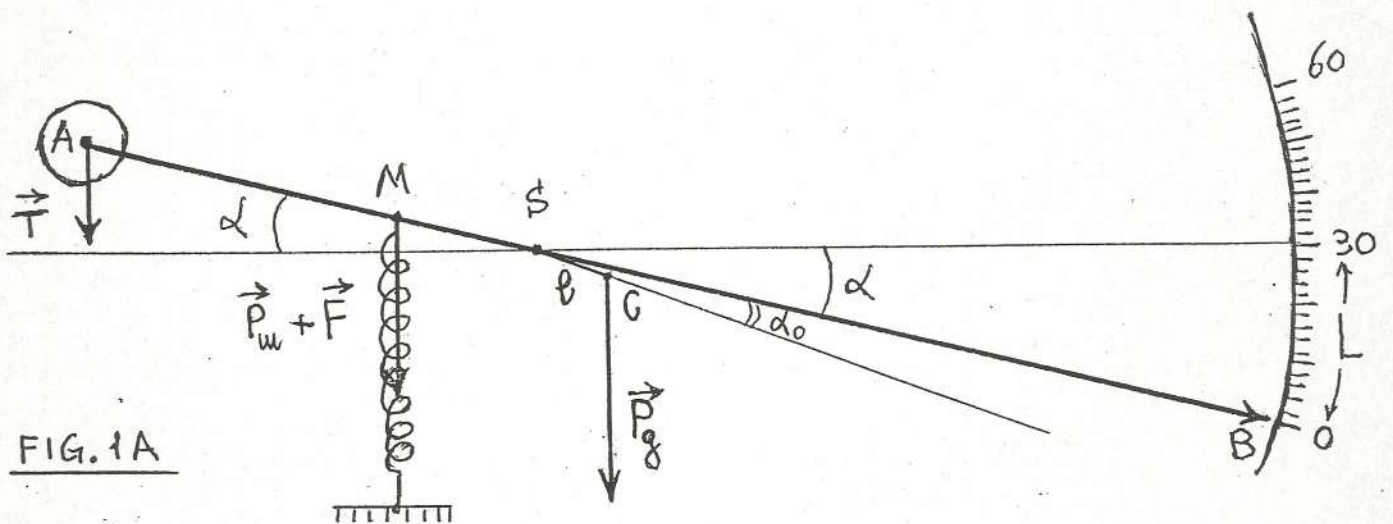


FIG. 1A

\vec{P}_g : peso del giogo	$m_g = 141,5 \text{ g}$	$\overline{SA} = b_A = 53,8 \text{ cm}$
\vec{P}_m : peso della molla		$\overline{SM} = b_M = 3,2 \text{ cm}$
\vec{F} : forza elastica	$k = 2,0 \text{ N/m}$	$\overline{SB} = b_B = 111,5 \text{ cm}$

a) Caratteristiche costruttive

Il dispositivo è costituito da un giogo asimmetrico, con fulcro in S, avente all'estremità del braccio più corto una sfera con superficie metallizzata di raggio 9,0 cm (figura 1A). Il braccio più lungo costituisce l'indice della bilancia. Il centro di massa C del giogo è spostato rispetto al fulcro come indicato nella figura e l'equilibrio del sistema è assicurato dalla molla applicata nel punto M e, all'altra estremità, a un punto fisso. Le misure delle grandezze principali, con i loro simboli, sono riportate sotto la figura.

La scala, centimetrata, si estende da 0 a 60 divisioni e, quando l'indice è in corrispondenza della trentesima divisione, il giogo è orizzontale. Ne deriva che l'angolo α assume, agli estremi della scala, valori opposti, dati da $\pm \alpha_{MAX}$ con

$$\alpha_{MAX} = L/b_B = 30 \text{ cm} / 111,5 \text{ cm} \approx 0,269 \text{ rad} \approx 15,4^\circ$$

e il suo intervallo di variabilità risulta $- 0,269 \text{ rad} \leq \alpha \leq 0,269 \text{ rad}$ ovvero $- 15,4^\circ \leq \alpha \leq 15,4^\circ$.

b) Determinazione del centro di massa del giogo

Per individuare il centro di massa (CM) occorre determinare i valori di l e α_0 , che indicano rispettivamente la lunghezza del segmento SC, congiungente il fulcro con il CM, e l'angolo tra SC e l'indice della bilancia.

Ciò è stato fatto equilibrando il giogo, privato della molla, con pesetti, appositamente costruiti con filo di rame e opportunamente tarati, posti in corrispondenza del diametro orizzontale della sfera.

Le figure 2A e 3A mostrano le due diverse situazioni di equilibrio ottenute con i pesetti di massa m_1 e m_2 .

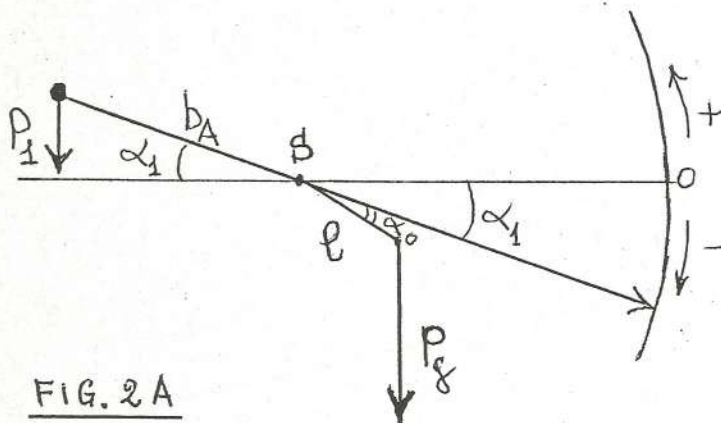


FIG. 2A

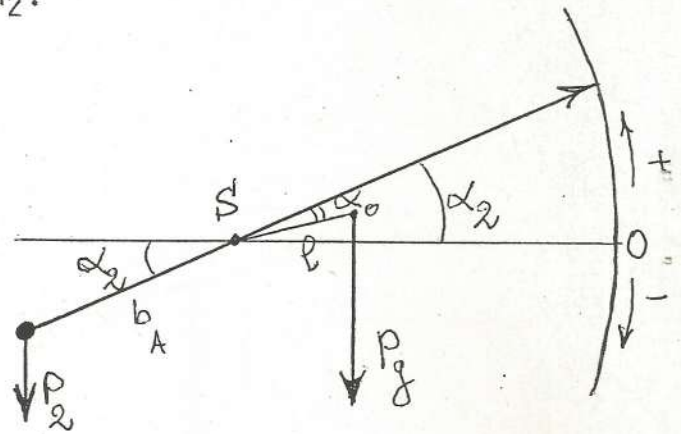


FIG. 3A

La condizione di equilibrio è data dalla uguaglianza dei momenti delle due forze peso, quindi nei due casi considerati valgono le relazioni

$$P_1 b_A \cos \alpha_1 = P_g l \cos(\alpha_1 - \alpha_0), \quad P_2 b_A \cos \alpha_2 = P_g l \cos(\alpha_2 - \alpha_0),$$

ovvero, dividendo per g ,

$$m_1 b_A \cos \alpha_1 = m_g l \cos(\alpha_1 - \alpha_0), \quad m_2 b_A \cos \alpha_2 = m_g l \cos(\alpha_2 - \alpha_0) \quad (1)$$

Dividendo membro a membro e sviluppando si ha

$$\frac{m_1 \cos \alpha_1}{m_2 \cos \alpha_2} = \frac{\cos \alpha_1 \cos \alpha_0 + \sin \alpha_1 \sin \alpha_0}{\cos \alpha_2 \cos \alpha_0 + \sin \alpha_2 \sin \alpha_0} = \frac{\cos \alpha_1 + \sin \alpha_1 \tan \alpha_0}{\cos \alpha_2 + \sin \alpha_2 \tan \alpha_0}$$

e, dividendo per $\cos \alpha_1$ e moltiplicando per $\cos \alpha_2$, si ottiene

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{1 + \tan \alpha_1 \tan \alpha_0}{1 + \tan \alpha_2 \tan \alpha_0}$$

per cui, riordinando,

$$\tan \alpha_0 = \frac{m_2 - m_1}{m_1 \tan \alpha_2 - m_2 \tan \alpha_1} \quad (2)$$

La (2) permette di determinare il valore di α_0 che, introdotto in una delle (1), condurrà al valore di l mediante la relazione

$$l = b_A \frac{m \cos \alpha}{m_g \cos(\alpha - \alpha_0)} \quad (3)$$

I valori delle misure ottenute nelle due situazioni descritte nelle figure 2A e 3A sono riportati nella tabella

m (g)	L (cm)	$\alpha = \frac{L}{b_B} \frac{180^\circ}{\pi}$	$\tan \alpha$
3,6655	- 25	- 12,85	- 0,228
3,8788	+ 27	+ 13,87	+ 0,245

e utilizzati nella (2), e successivamente nella (3), forniscono i seguenti risultati

$$\alpha_0 = \tan^{-1}(0,1197) = 6,82^\circ = 0,119 \text{ rad}$$

$$l = 1,44 \text{ cm}$$

c) Funzionamento della bilancia

Come è stato detto all'inizio, il giogo, che ha centro di massa in C e sostegno in S, è bilanciato dalla molla applicata nel punto M (figura 1A).

Nella posizione di zero, la condizione di equilibrio del sistema sarà data dall'uguaglianza del momento complessivo del peso della molla e della forza elastica di richiamo, da una parte, con il momento del peso del giogo dall'altra. Tale condizione è espressa dalla equazione

$$(P_m + F)b_M \cos \alpha = P_g l \cos(\alpha - \alpha_0) \quad (4)$$

dove $\alpha = -\alpha_{MAX}$.

Sotto l'azione di una forza di intensità T applicata in A, la condizione di equilibrio sarà invece espressa da

$$T b_A \cos \beta + (P_m + F') b_M \cos \beta = P_g l \cos(\beta - \alpha_0) \quad (5)$$

dove β indica il nuovo angolo di equilibrio e F' l'intensità della mutata forza di richiamo.

Sviluppando $\cos(\alpha - \alpha_0)$ e $\cos(\beta - \alpha_0)$, dividendo la (4) per $\cos \alpha$ e la (5) per $\cos \beta$, le due equazioni si riscrivono come segue

$$(P_m + F)b_M = P_g l (\cos \alpha_0 + \sin \alpha_0 \tan \alpha) \quad (4')$$

$$Tb_A + (P_m + F')b_M = P_g l (\cos \alpha_0 + \sin \alpha_0 \tan \beta) \quad (5')$$

e, sottraendo membro a membro la (4') dalla (5') si ottiene

$$Tb_A + (F' - F)b_M = P_g l \sin \alpha_0 (\tan \beta - \tan \alpha) \quad (6)$$

Nella (6) si può porre $\sin \alpha_0 \approx \alpha_0$ con un errore trascurabile e $\tan \alpha \approx \alpha$, $\tan \beta \approx \beta$ con un errore massimo inferiore a 2,5 per cento. Tenendo presente la legge di Hooke, l'equazione (6) diventa allora

$$Tb_A + k(x' - x)b_M \approx P_g l \alpha_0 (\beta - \alpha) \quad (7)$$

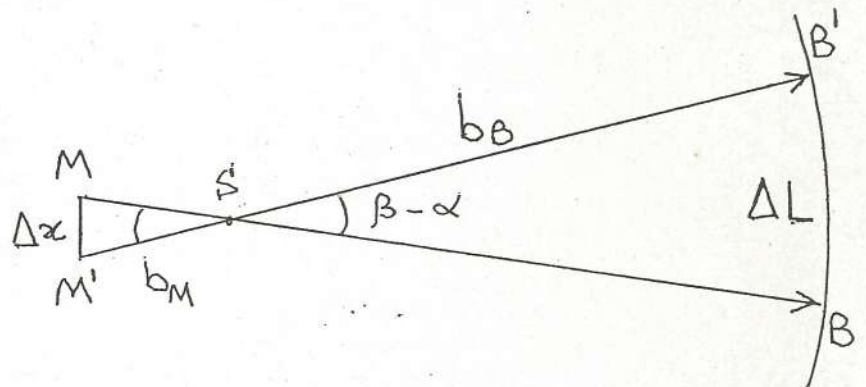
dove $x' < x$ e $\beta > \alpha$.

Ma, come si vede nella figura 4A, risulta

$$\beta - \alpha = \frac{\Delta L}{b_B} \approx \frac{\Delta x}{b_M}$$

con $\Delta x = x - x'$, per cui

$$\Delta x \approx b_M (\beta - \alpha) \approx \frac{b_M}{b_B} \Delta L$$



e quindi la (7) diventa

$$Tb_A - k \frac{b_M^2}{b_B} \Delta L \approx P_g l \alpha_0 \frac{\Delta L}{b_B}$$

FIG. 4A

Allora si ha

$$T \approx C \Delta L \quad \text{con} \quad C = \frac{kb_M^2 + P_g l \alpha_0}{b_A b_B} \quad (8)$$

Inserendo nella (8) i valori delle varie grandezze si ha

$$C = \frac{2,0 \text{ N/m} \cdot (3,2 \cdot 10^{-2} \text{ m})^2 + 0,1415 \text{ kg} \cdot 9,806 \text{ N/kg} \cdot 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot 0,119 \text{ rad}}{0,538 \text{ m} \cdot 1,115 \text{ m}}$$

$$= \frac{2,05 \cdot 10^{-3} \text{ N m} + 2,38 \cdot 10^{-3} \text{ N m}}{0,600 \text{ m}^2}$$

$$= 7,38 \cdot 10^{-3} \text{ N/m} \approx 7,4 \cdot 10^{-5} \text{ N/cm}$$

Poiché ogni divisione della scala corrisponde a un centimetro, il valore teorico di una divisione è pari a $7,4 \cdot 10^{-5} \text{ N}$, valore di poco inferiore a $8,2 \cdot 10^{-5} \text{ N}$ trovato sperimentalmente (vedi punto H 23).

PREMIER MÉMOIRE

SUR

L'ÉLECTRICITÉ ET LE MAGNÉTISME.

Par M. COULOMB.

Construction & usage d'une Balance électrique, fondée sur la propriété qu'ont les Fils de métal, d'avoir une force de réaction de Torsion proportionnelle à l'angle de Torsion.

Détermination expérimentale de la loi suivant laquelle les élémens des Corps électrisés du même genre d'Électricité, se repoussent mutuellement.

DANS un Mémoire donné à l'Académie, en 1784, j'ai déterminé, d'après l'expérience, les loix de la force de torsion d'un fil de métal, & j'ai trouvé que cette force étoit, en raison composée de l'angle de torsion, de la quatrième puissance du diamètre du fil de suspension & de l'inverse de sa longueur, en multipliant le tout par un coëfficient constant qui dépend de la nature du métal, & qui est facile à déterminer par l'expérience.

J'ai fait voir dans le même Mémoire, qu'au moyen de cette force de torsion, il étoit possible de mesurer avec précision des forces très-peu considérables, comme, par exemple, un dix millième de grain. J'ai donné dans le même Mémoire une première application de cette théorie, en cherchant à évaluer la force constante attribuée à l'adhérence dans la formule qui exprime le frottement de la surface d'un corps solide en mouvement dans un fluide.

Je mets aujourd'hui sous les yeux de l'Académie, une balance électrique construite d'après les mêmes principes;

Mém. 1785.

Cccc

elle mesure avec la plus grande exactitude l'état & la force électrique d'un corps, quelque foible que soit le degré d'électricité.

Construction de la Balance.

Quoique la pratique m'ait appris que, pour exécuter d'une manière commode plusieurs expériences électriques, il faut corriger quelques défauts dans la première balance de ce genre que j'ai fait faire; cependant, comme c'est jusqu'ici la seule dont je me sois servi, j'en vais donner la description, en avertissant que sa forme & sa grandeur peuvent & doivent être variées suivant la nature des expériences que l'on a dessein de faire. La figure première représente en perspective cette balance, dont voici le détail.

Sur un cylindre de verre *ABCD*, de 12 pouces de diamètre & de 12 pouces de hauteur, l'on place un plateau de verre de 13 pouces de diamètre, qui recouvre en entier le vaisseau de verre; ce plateau est percé de deux trous de 20 lignes à peu-près de diamètre, l'un au milieu, en *f*, sur lequel s'élève un tuyau de verre de 24 pouces de hauteur; ce tuyau est cimenté sur le trou *f*, avec le ciment en usage dans les appareils électriques: à l'extrémité supérieure du tuyau en *h*, est placé un micromètre de torsion que l'on voit en détail à la figure 2. La partie supérieure, n.º 1, porte le bouton *b*, l'index *io*, & la pince de suspension *q*; cette pièce entre dans le trou *G* de la pièce n.º 2; cette pièce, n.º 2 est formée d'un cercle *ab* divisé sur son champ en 360 degrés, & d'un tuyau de cuivre Φ qui entre dans le tuyau *H*, n.º 3, soudé à l'intérieur de l'extrémité supérieure du tuyau ou de la tige *fh* de verre de la figure 1.^{re}. La pince *q*, figure 2, n.º 1, a à peu-près la forme de l'extrémité d'un porte-crayon solide, qui peut se serrer au moyen de l'anneau *q*; c'est dans la pince de ce porte-crayon, qu'est saisie l'extrémité d'un fil d'argent très-fin; l'autre extrémité du fil d'argent est saisie (fig. 3) en *P*, par la pince d'un cylindre *Po* de cuivre ou de fer,

dont le diamètre n'a guère qu'une ligne, & dont l'extrémité P est fendue, & forme une pince qui se serre par le moyen du coulant Φ . Ce petit cylindre est renflé & percé en C , pour y faire glisser (*fig. 1*) l'aiguille ag : il faut que le poids de ce petit cylindre soit assez considérable pour tendre le fil d'argent sans le rompre. L'aiguille que l'on voit (*fig. 1*) en ag , suspendue horizontalement à la moitié à peu-près de la hauteur du grand vase qui la renferme, est formée, ou d'un fil de soie enduit de cire d'Espagne, ou d'une paille également enduite de cire d'Espagne, & terminée depuis g jusqu'en a , sur 18 lignes de longueur, par un fil cylindrique de gomme-laque: à l'extrémité a de cette aiguille, est une petite balle de sureau de deux à trois lignes de diamètre; en g , est un petit plan vertical de papier passé à la térébenthine, qui sert de contre-poids à la balle a , & qui ralentit les oscillations.

Nous avons dit que le couvercle AC étoit percé d'un second trou en m ; c'est dans ce second trou que l'on introduit un petit cylindre $m\Phi t$, dont la partie inférieure Φt est de gomme-laque; en t , est une balle également de sureau; autour du vase, à la hauteur de l'aiguille, l'on décrit un cercle ζQ divisé en 360 degrés: pour plus de simplicité, je me sers d'une bande de papier divisée en 360 degrés, que je colle autour du vase, à la hauteur de l'aiguille.

Pour commencer à opérer avec cet instrument, je fais à peu-près, en plaçant le couvercle, répondre le trou m à la première division, ou au point o du cercle $\zeta o \gamma$ tracé sur le vase. Je place l'index oi du micromètre sur le point o ou la première division de ce micromètre; je fais ensuite tourner tout le micromètre dans le tube vertical fh , jusqu'à ce qu'en regardant par le fil vertical qui suspend l'aiguille, & le centre de la balle, l'aiguille ag se trouve répondre à la première division du cercle $\zeta o \gamma$. J'introduis ensuite par le trou m l'autre balle t suspendue au fil $m\Phi t$, de manière qu'elle touche la balle a , & qu'en regardant par le centre

du fil de suspension & la balle t , l'on rencontre la première division o du cercle $z o q$. La balance est actuellement en état de se prêter à toutes les opérations; nous allons en donner pour exemple, le moyen dont nous nous sommes servi pour déterminer la loi fondamentale suivant laquelle les corps électrisés se repoussent.

Loi fondamentale de l'Électricité.

La force répulsive de deux petits globes électrisés de la même nature d'électricité, est en raison inverse du carré de la distance du centre des deux globes.

E X P É R I E N C E.

L'on électrise, *fig. 4.* un petit conducteur, qui n'est autre chose, qu'une épingle à grosse tête, qui se trouve isolée en enfonçant sa pointe dans l'extrémité d'un bâton de cire d'Espagne; l'on introduit cette épingle dans le trou m , & on lui fait toucher la balle t , en contact avec la balle a : en retirant l'épingle, les deux balles se trouvent électrisées de la même nature d'électricité, & elles se chassent mutuellement, à une distance que l'on mesure, en regardant par le fil de suspension & le centre de la balle a , la division correspondante du cercle $z o q$: tournant ensuite l'index du micromètre dans le sens, $p n o$, l'on tord le fil de suspension $l p$, & l'on produit une force proportionnelle à l'angle de torsion, qui tend à rapprocher la balle a de la balle t . L'on observe, par ce moyen, la distance à laquelle différens angles de torsion ramènent la balle a vers la balle t , & en comparant les forces de torsions avec les distances correspondantes des deux balles, l'on détermine la loi de répulsion.

Je présenterai seulement ici, quelques essais qui sont faciles à répéter, & qui mettront tout de suite sous les yeux, la loi de la répulsion.

Premier Essai. Ayant électrisé les deux balles avec la

tête d'épingle, l'index du micromètre répondant à 0, la balle *a* de l'aiguille s'est éloignée de la balle *t* de 36 degrés.

Deuxième Essai. Ayant tordu le fil de suspension, au moyen du bouton *o* du micromètre de 126 degrés, les deux balles se sont rapprochées & arrêtées à 18 degrés de distance l'une de l'autre.

Troisième Essai. Ayant tordu le fil de suspension de 567 degrés, les deux balles se sont rapprochées à 8 degrés & demi.

Explication & résultat de cette expérience.

Lorsque les balles ne sont pas encore électrisées, elles se touchent, & le centre de la balle *a*, suspendue à l'aiguille, n'est éloigné du point où la torsion du fil de suspension est nulle, que de la moitié des diamètres de deux balles. Il faut être averti que le fil d'argent *lp*, qui formoit la suspension, avoit 28 pouces de longueur, & ce fil étoit si fin, que le pied de longueur de ce fil ne pesoit que $\frac{1}{16}$ de grains. En calculant la force qu'il falloit pour tordre ce fil, en agissant au point *a*, éloigné de quatre pouces du fil *lp* ou du centre de suspension, j'ai trouvé, par les formules expliquées dans un Mémoire sur les loix de la force de torsion des fils de métal, imprimé dans le volume de l'Académie pour 1784. que pour tordre ce fil de 360 degrés, il ne falloit employer au point *a*, en agissant avec le levier *an*, de quatre pouces de longueur, qu'une force de $\frac{1}{340}$ de grains: ainsi comme les forces de torsion sont, comme il est prouvé dans ce Mémoire, comme les angles de torsion, la moindre force répulsive entre les deux balles, les éloignoit sensiblement l'une de l'autre.

Nous trouvons dans notre première expérience, où l'index du micromètre est sur le point *o*, que les balles sont éloignées de 36 degrés, ce qui produit en même temps une force de torsion de $36^d = \frac{1}{3400}$ de grain; dans le

second essai, la distance des balles est de 18 degrés, mais comme l'on a tordu le micromètre de 126 degrés, il en résulte qu'à une distance de 18 degrés, la force répulsive étoit 144 degrés: ainsi à la moitié de la première distance, la répulsion des balles est quadruple.

Dans le troisième essai, l'on a tordu le fil de suspension de 567 degrés, & les deux balles ne se trouvent plus éloignées que de 8 degrés & demi. La torsion totale, étoit par conséquent, 576 degrés, quadruple de celle du deuxième essai, & il ne s'en falloit que d'un demi-degré que la distance des deux balles dans ce troisième essai, ne fut réduite à la moitié de celle où elle étoit au deuxième. Il résulte donc de ces trois essais, que l'action répulsive que les deux balles électrisées de la même nature d'électricité exercent l'une sur l'autre, suit la raison inverse du carré des distances.

Première Remarque.

En répétant l'expérience qui précède, l'on observera, qu'en se servant d'un fil d'argent, aussi fin que celui que nous avons employé, qui ne donne pour la force de torsion d'un angle de 5 degrés, qu'un 24 millième de grain, à peu-près, quelque calme que soit l'air, & quelques précautions que l'on prenne, l'on ne pourra répondre de la position naturelle de l'aiguille, lorsque la torsion est nulle, qu'à 2 ou 3 degrés près. Ainsi, pour avoir un premier essai à comparer avec les suivans, il faut, après avoir électrisé les deux balles, tordre le fil de suspension de 30 à 40 degrés, ce qui réuni à la distance des deux balles observées, donnera une force de torsion assez considérable, pour que les 2 ou 3 degrés d'incertitude dans la première position de l'aiguille, lorsque la torsion est nulle, ne produisent pas dans les résultats une erreur sensible. Il faut d'ailleurs être averti, que le fil d'argent, dont je me suis servi dans cette expérience, est si fin, qu'il casse au moindre ébranlement: j'ai trouvé dans la suite, qu'il étoit plus com-

mode d'employer dans les expériences un fil de suspension d'un diamètre presque double, quoique sa flexibilité de torsion fût de quatorze à quinze fois moins grande que celle du premier. Il faut avoir soin, avant de faire usage de ce fil d'argent, de le tenir pendant deux ou trois jours tendu par un poids qui soit à peu-près la moitié de celui qu'il peut porter sans se rompre; il faut encore avertir, qu'en employant ce dernier fil d'argent, il ne faut jamais le tordre au-delà de 300 degrés, parce que passé ce terme de torsion, il commence à s'écrouir, & ne réagit plus, ainsi que nous l'avons prouvé dans le Mémoire déjà cité, imprimé en 1784, qu'avec une force moindre que l'angle de torsion.

Deuxième Remarque.

L'électricité des deux balles diminue un peu pendant le temps que dure l'expérience; j'ai éprouvé que, le jour où j'ai fait les essais qui précèdent, les balles électrisées se trouvant par leur répulsion à 30 degrés de distance l'une de l'autre, sous un angle de torsion de 50 degrés, elles se sont rapprochées d'un degré dans trois minutes; mais comme je n'ai employé que deux minutes à faire les trois essais qui précèdent, l'on peut, dans ces expériences, négliger l'erreur qui résulte de la perte de l'électricité. Si l'on desire une plus grande précision, où lorsque l'air est humide, & que l'électricité se perd rapidement, l'on doit, par une première observation, déterminer la doit ou la diminution de l'action électrique des deux balles dans chaque minute, & se servir ensuite de cette première observation, pour corriger les résultats des expériences que l'on voudra faire ce jour-là.

Troisième Remarque.

La distance des deux balles, lorsqu'elles sont éloignées l'une de l'autre par leur action répulsive réciproque, n'est pas précisément mesurée par l'angle qu'elles forment, mais par la corde de l'arc qui joint leur centre; de

576 MÉMOIRES DE L'ACADÉMIE ROYALE
même que le levier à l'extrémité duquel s'exerce l'action, n'est pas mesuré par la moitié de la longueur de l'aiguille, ou par le rayon, mais par le cosinus de la moitié de l'angle formé par la distance des deux balles; ces deux quantités, dont l'une est plus petite que l'arc, & diminue par conséquent la distance mesurée par cet arc, dans le temps que l'autre diminue le levier, se compensent en quelque façon; & dans les expériences du genre de celles dont nous sommes occupés, l'on peut sans erreur sensible, s'en tenir à l'évaluation que nous avons donnée, si la distance des deux balles ne passe pas 25 à 30 degrés; dans les autres cas, il faut en faire le calcul rigoureusement.

Quatrième Remarque.

Comme l'expérience prouve, que dans une chambre bien fermée, l'on peut déterminer avec le premier fil d'argent à 2 ou 3 degrés près, la position de l'aiguille, quand la torsion est nulle, ce qui donne, d'après le calcul des forces de torsion, proportionnelles à l'angle de torsion, une force tout au plus d'un quarante millième de grains, les plus foibles degrés de l'électricité se mesureront facilement avec cette balance. Pour cette opération, l'on fait passer, *fig. 5*, à travers un bouchon de cire d'Espagne, un petit fil de cuivre *cd*, terminé en *c* par un crochet, & en *d*, par une petite balle de sureau dorée, & l'on met le bouchon *A* dans le trou *m* de la balance *fig. 1*, de manière que le centre de la balle *d*, vue par le fil de suspension, répond au point *o* du cercle *z o q*; en approchant ensuite un corps électrisé du crochet *c*, quelque foible que soit l'électricité de ce corps, la balle *a* se séparant de la balle *d*, donne des signes de l'électricité, & la distance des deux balles en mesure la force, d'après le principe de la raison inverse du carré des distances.

Mais je dois prévenir que, depuis ces premières expériences, j'ai fait exécuter différens petits électromètres, d'après

Fig. 5.

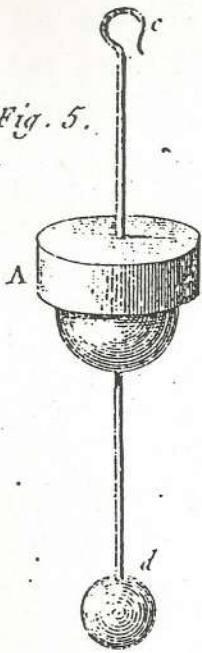
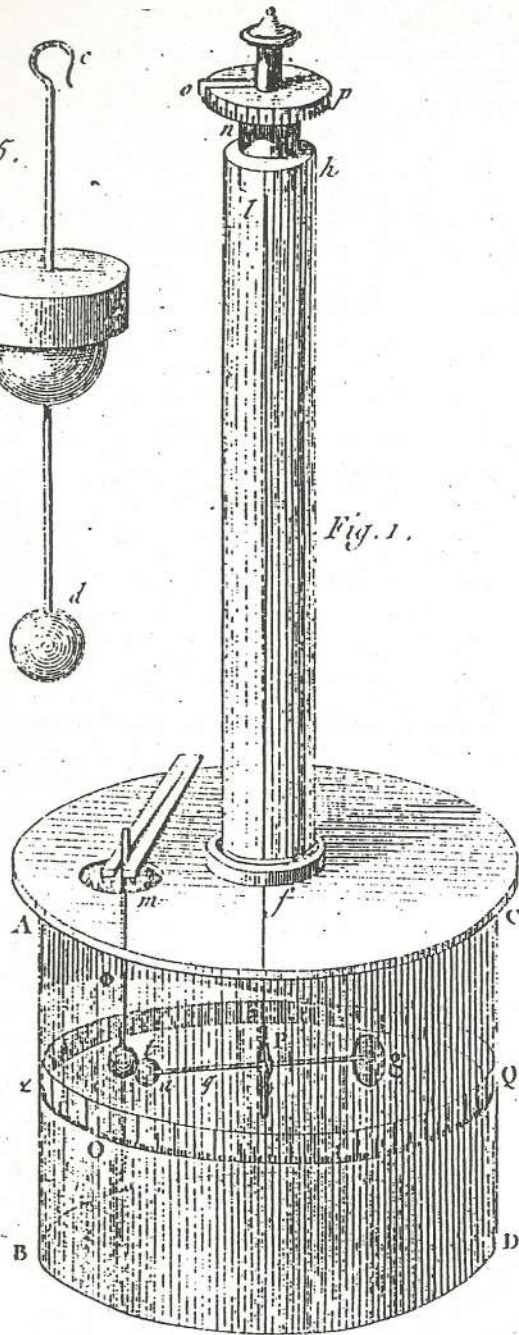


Fig. 1.



N^o 1.

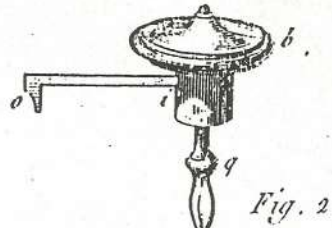
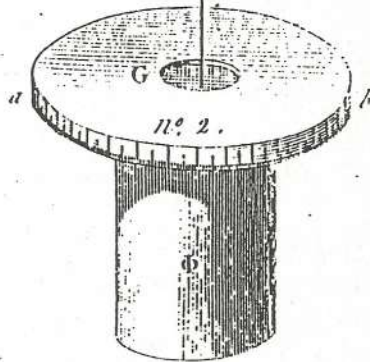
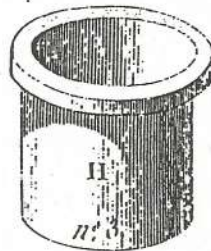


Fig. 2.



N^o 2.



N^o 3.

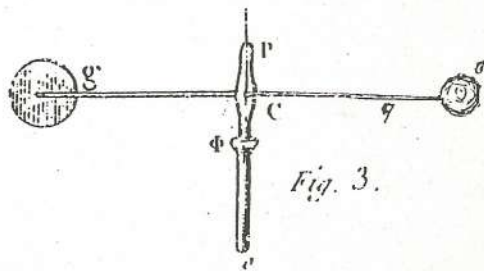


Fig. 3.



Fig. 4.

Foucault del.

F. le Centre sc.

d'après les mêmes principes de la force de torsion, en me servant pour le fil de suspension, d'un fil de soie, tel qu'il sort du cocon, ou d'un poil de chèvre d'Angora. Un de ces électromètres qui a à peu-près la même forme que la balance électrique, décrite dans ce Mémoire, est beaucoup plus petit; il n'a que 5 à 6 pouces de diamètre, une tige d'un pouce; l'aiguille est un petit fil de gomme-laque de 12 lignes de longueur, terminé en *a* par un petit cercle très-léger de clinquant. L'aiguille & le clinquant pèsent à peu-près un quart de grain; le fil de suspension, tel qu'il sort du cocon, ayant 4 pouces de longueur; a une flexibilité telle, qu'en agissant avec un bras de levier d'un pouce, il ne faut qu'un soixante millième de grain pour le tordre d'un cercle entier ou de 360 degrés: en présentant dans cet électromètre au crochet *C* de la *figure 5*, un bâton ordinaire de cire d'Espagne, électrisé par frottement à 3 pieds de distance de ce crochet, l'aiguille est chassée à plus de 90 degrés. Nous décrirons plus en détail dans la suite cet électromètre, lorsque nous voudrons déterminer la nature & le degré d'électricité de différens corps, qui en frottant l'un contre l'autre, prennent un degré d'électricité très-foible.

