

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

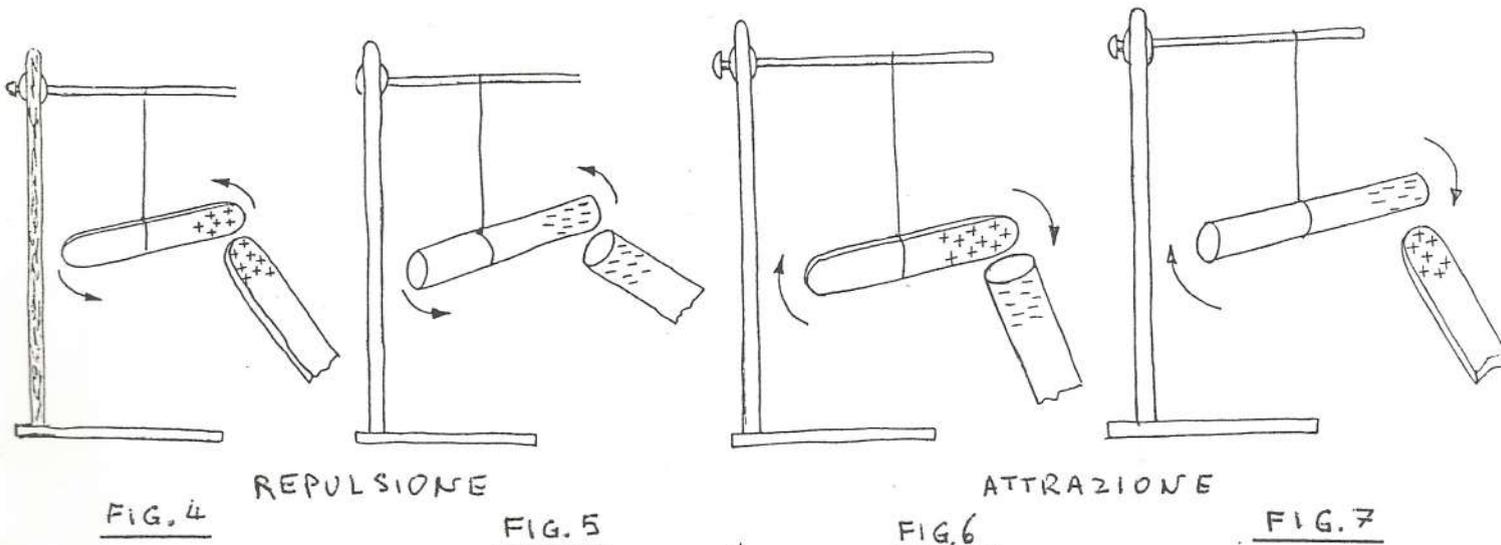
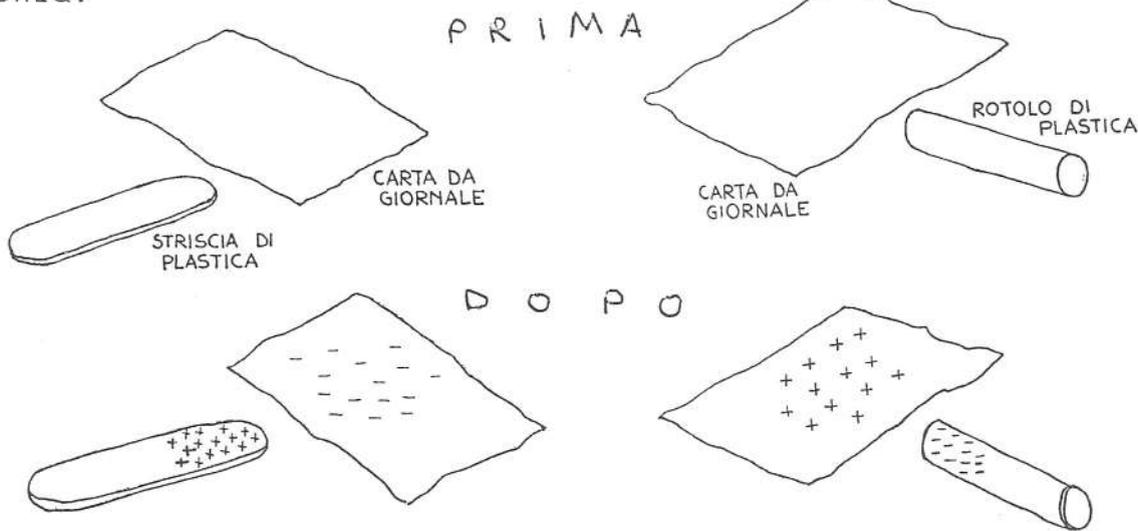
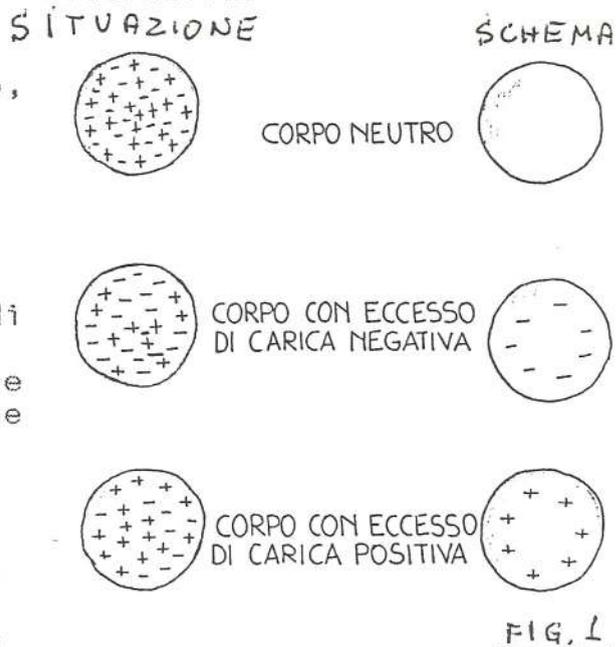
facilmente qualche elettrone del guscio più esterno. Ve ne sono altre i cui atomi, al contrario, acquistano facilmente qualche elettrone.

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.



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.

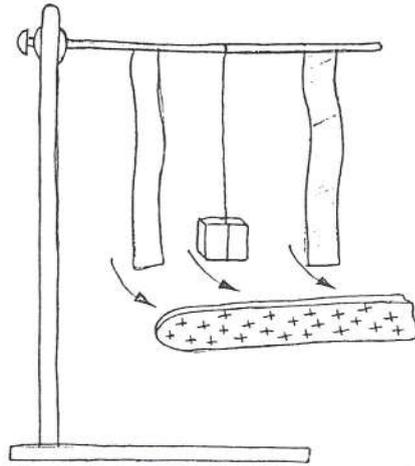


FIG. 8

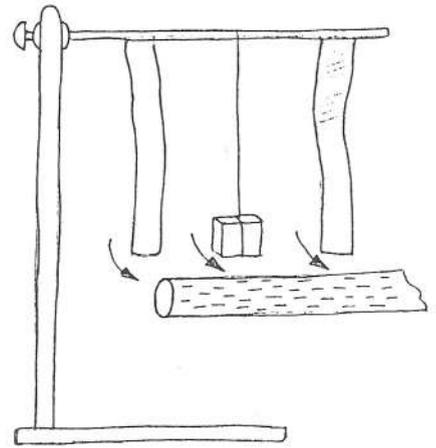


FIG. 9

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

DOPO

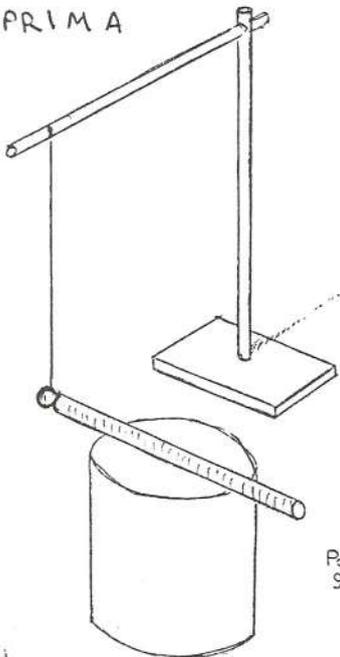


FIG. 10a

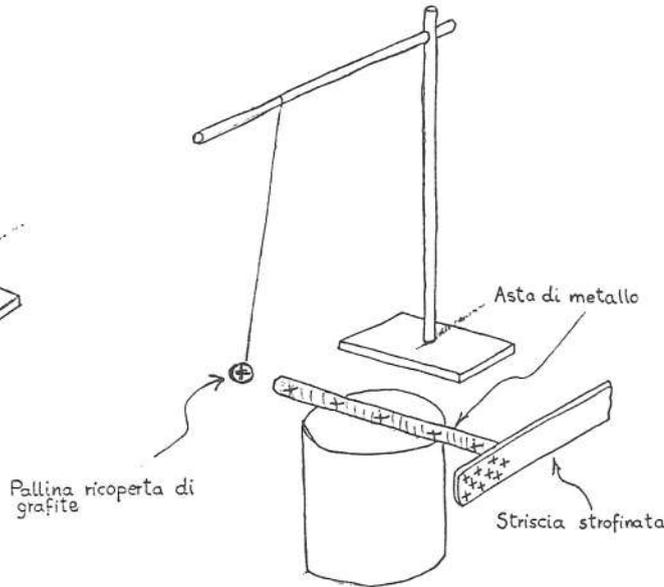


FIG. 10b

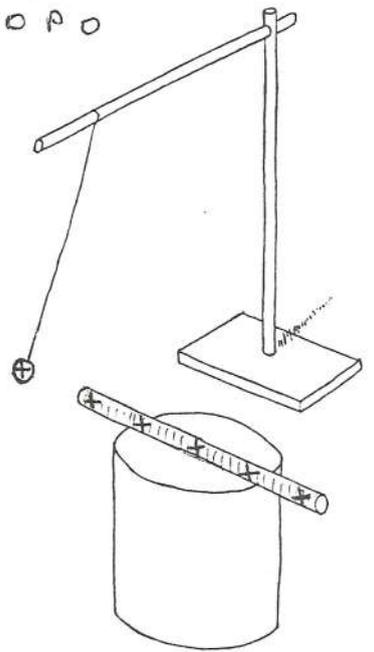


FIG. 10c

PRIMA

DOPO

FIG. 11a

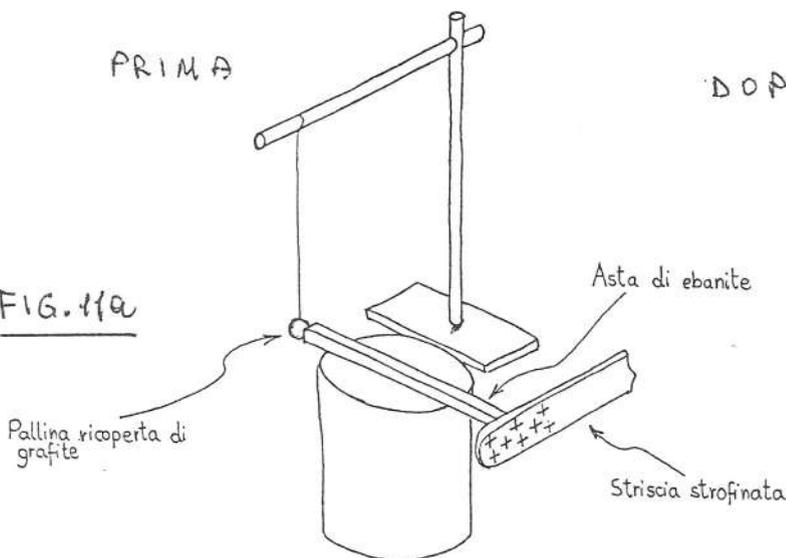
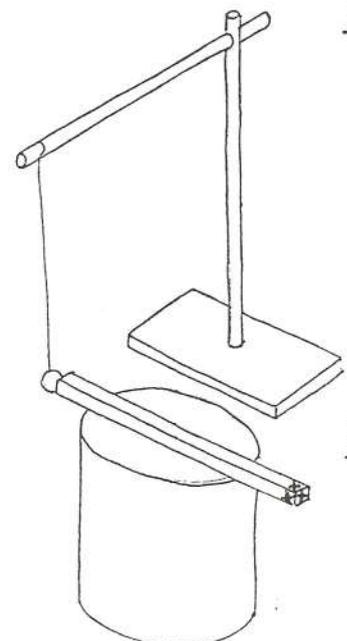


FIG. 11b



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.

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

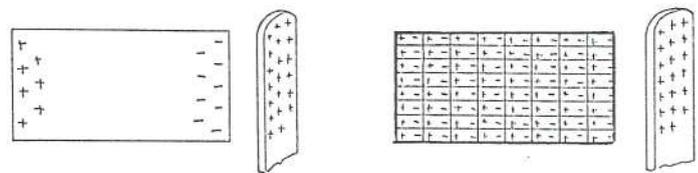
Corpo di plastica neutro



Avvicinando, senza toccare, un corpo carico

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.



Oppure

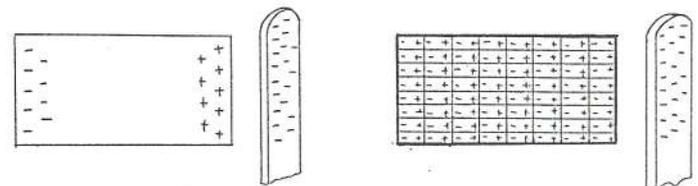


FIG. 13

INDUZIONE
ELETTROSTATICA

POLARIZZAZIONE
DIELETTICA

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.

ELETTROSCOPIO CARICO

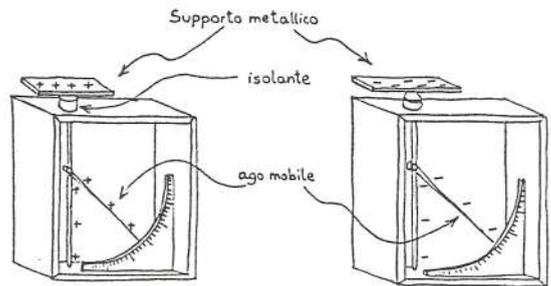


FIG. 14

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.

INDUZIONE ELETTROSTATICA

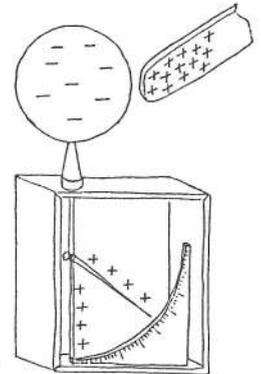


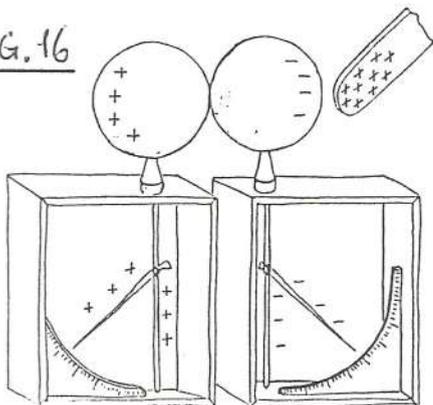
FIG. 15

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.

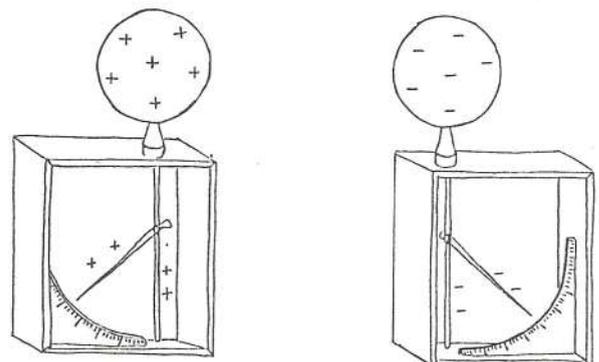
17. Due oggetti metallici, montati su supporti isolanti, sono posti in contatto fra loro. Quindi, avvicinato un corpo carico a uno di essi, vengono separati: allontanato il corpo carico si rilevano sui due oggetti metallici cariche di segno opposto e di uguale valore (figure 16 e 17).

FIG. 16



PRIMA

FIG. 17



D O P O

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

FIG. 18

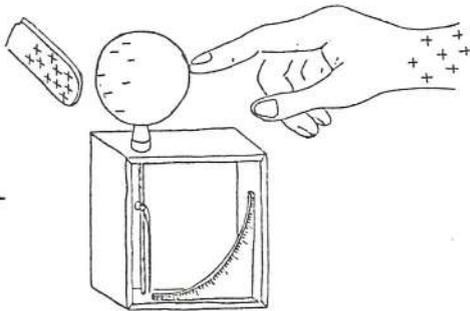
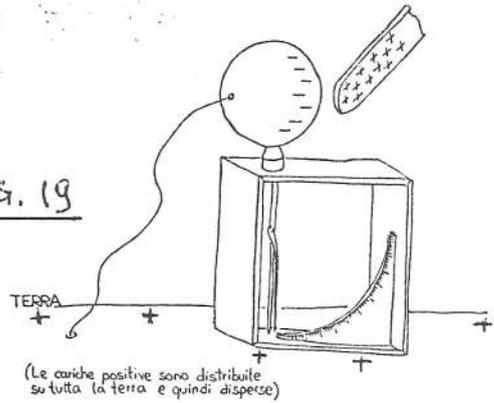


FIG. 19



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

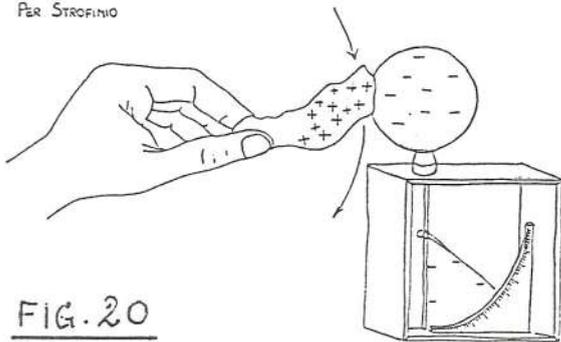


FIG. 20

PER CONTATTO

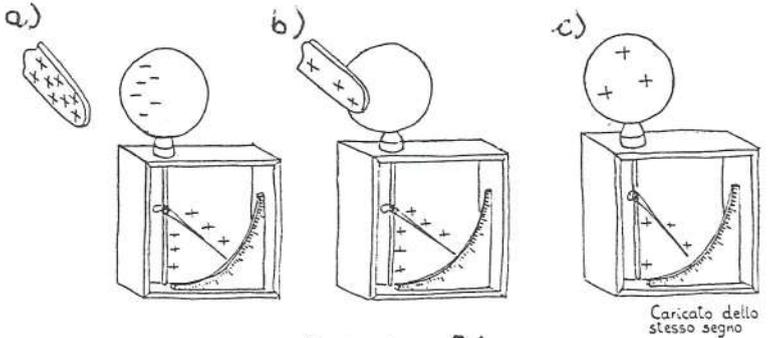
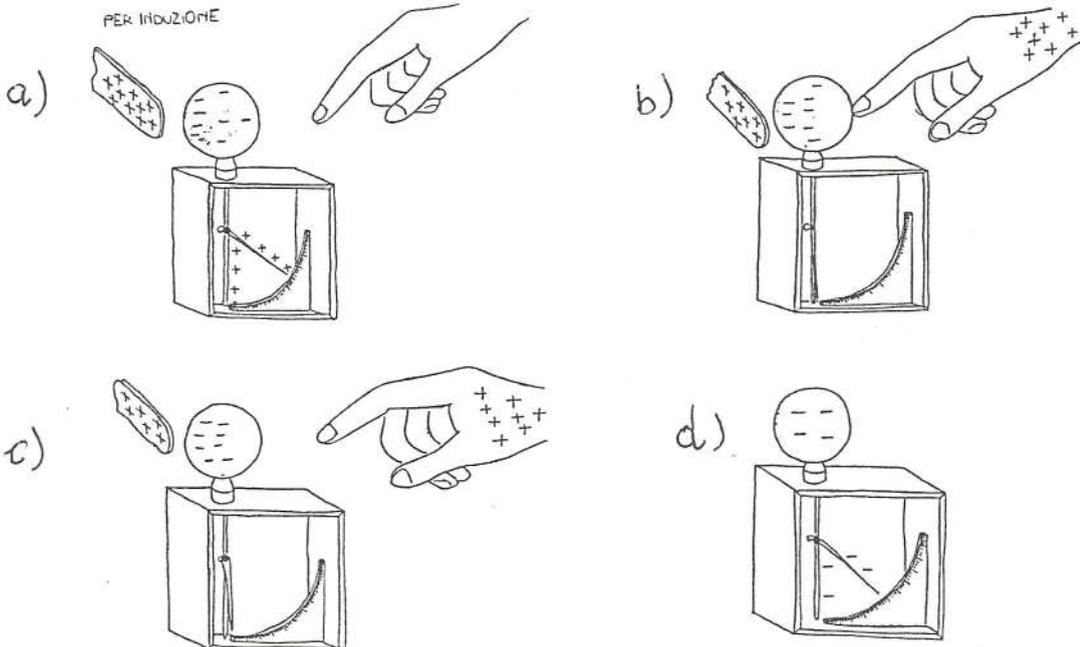


FIG. 21

- 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 quella 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.

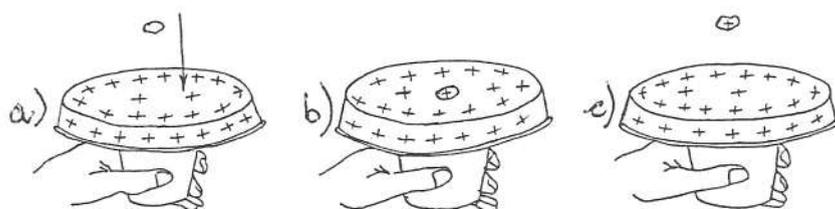
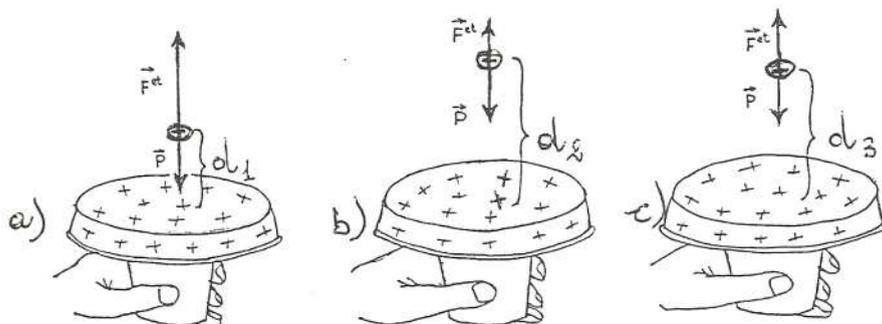


FIG. 23



Condizione di equilibrio (levitazione)

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.

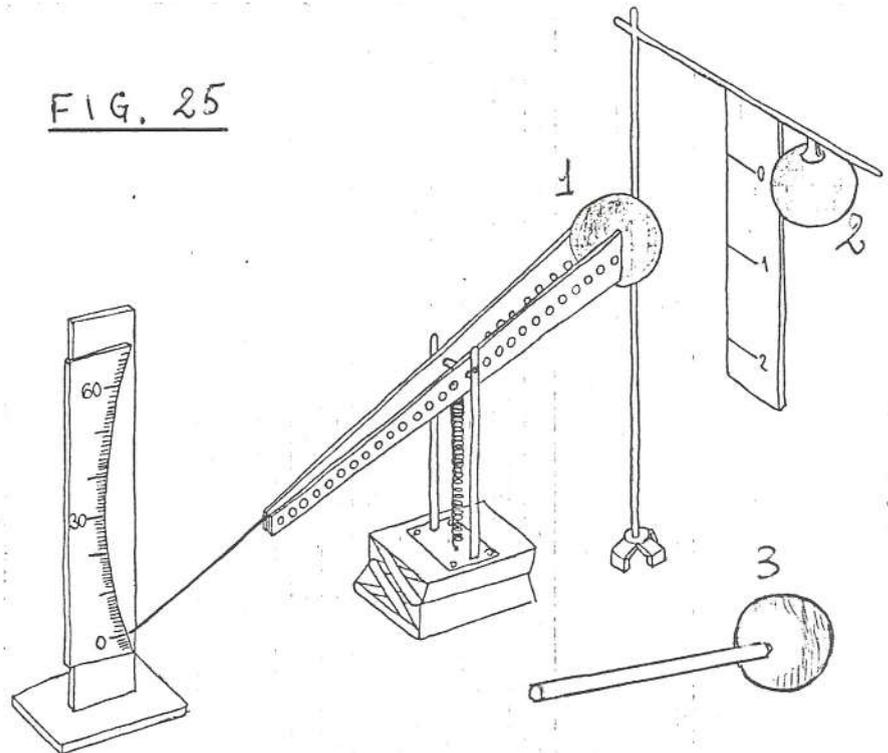
Si ripetono le stesse operazioni, dopo aver dimezzato la carica anche sulla sfera 1.

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.

FIG. 25



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

Si ripetono le operazioni, triplicando la distanza.

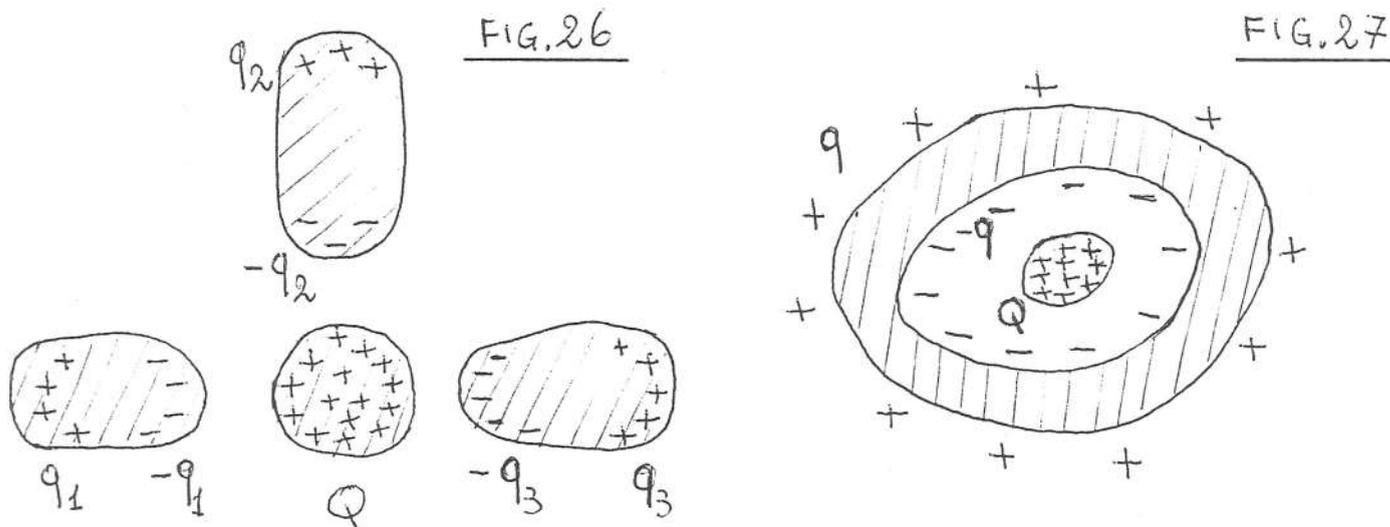
I valori della forza repulsiva ottenuti in una prova sono stati, rispettivamente, 60, 16, 6,5 divisioni. Ciò ha confermato la proporzionalità inversa tra l'intensità della forza e il quadrato della distanza.

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).

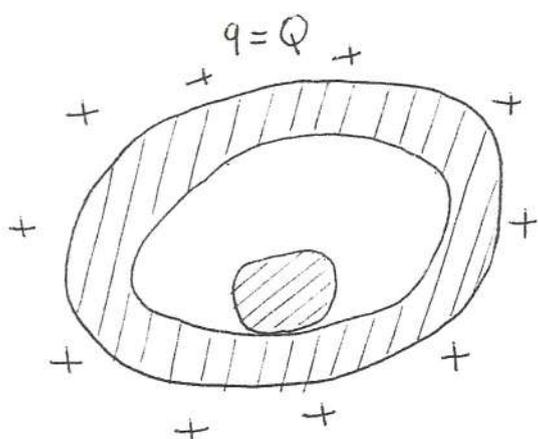


FIG. 28

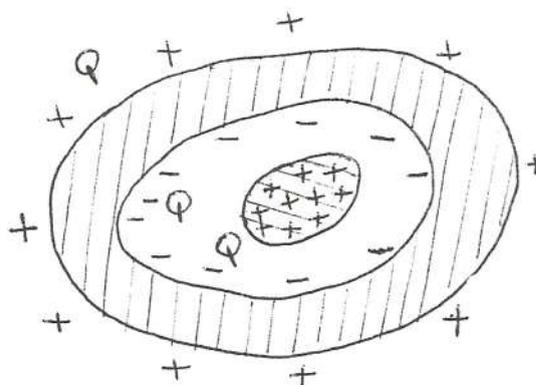
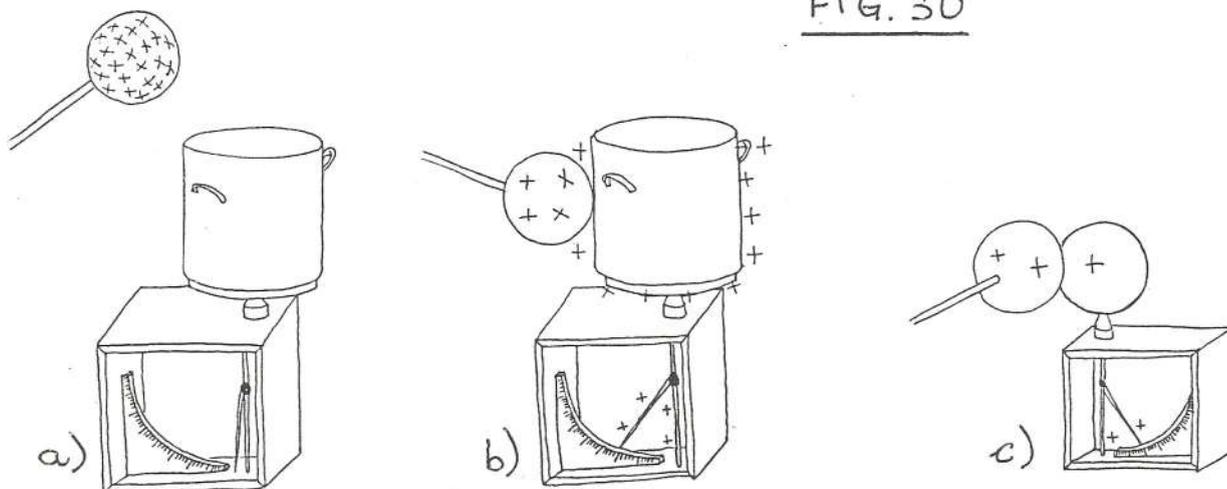


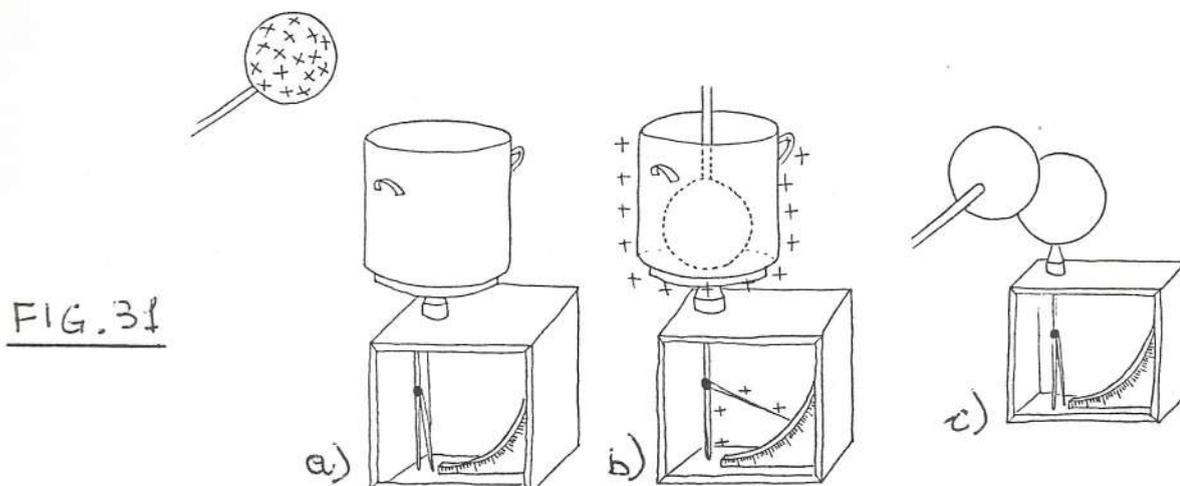
FIG. 29

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).



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).

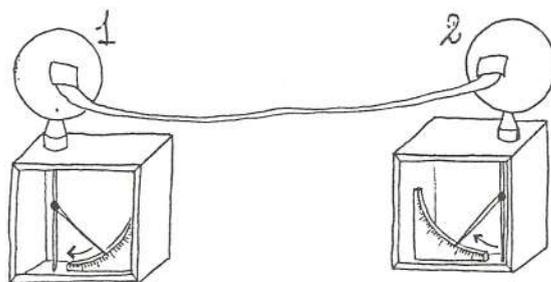


FIG. 32

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 e 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.

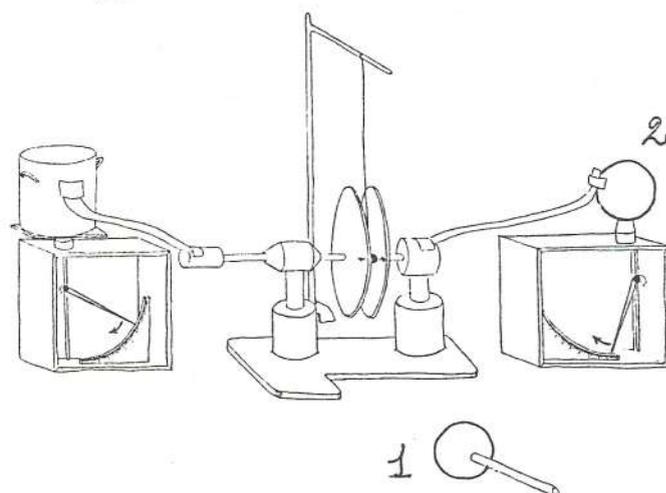


FIG. 33

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.

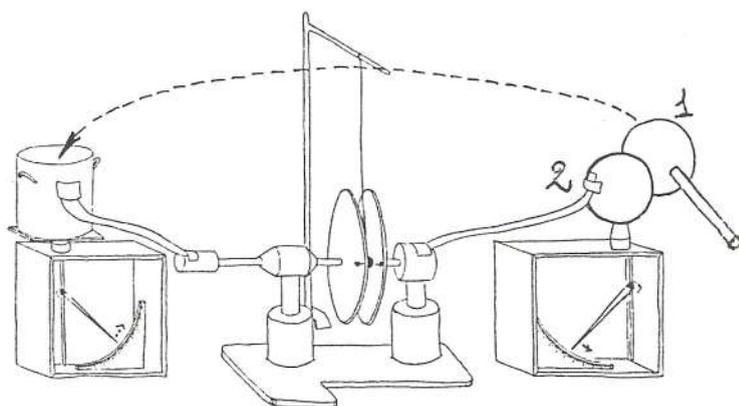


FIG. 34

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)

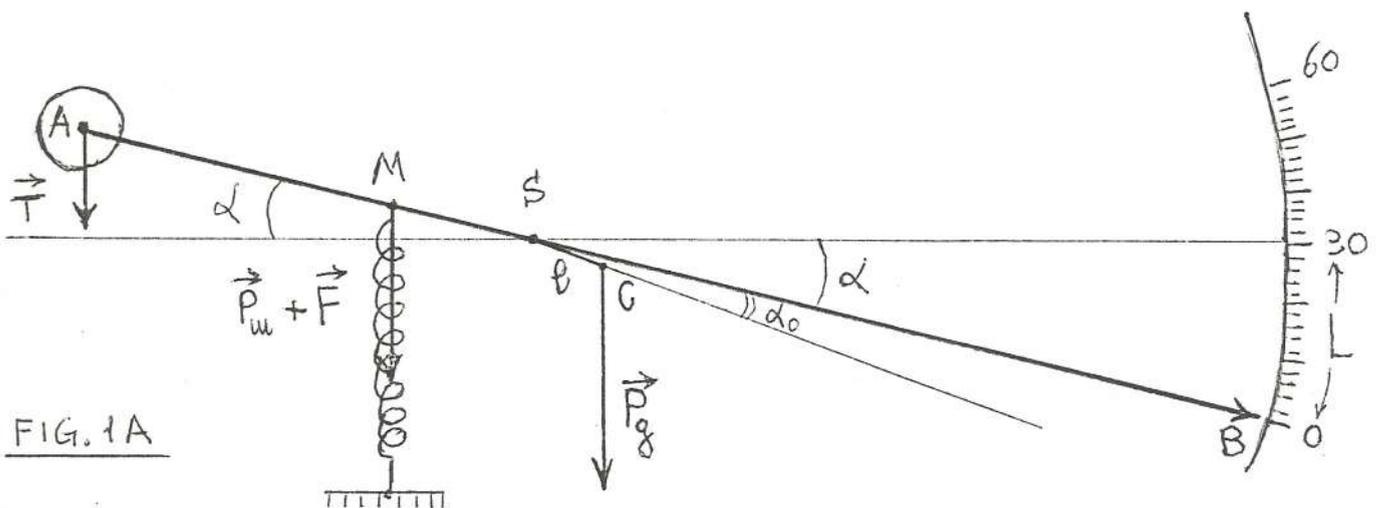


FIG. 1A

\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

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

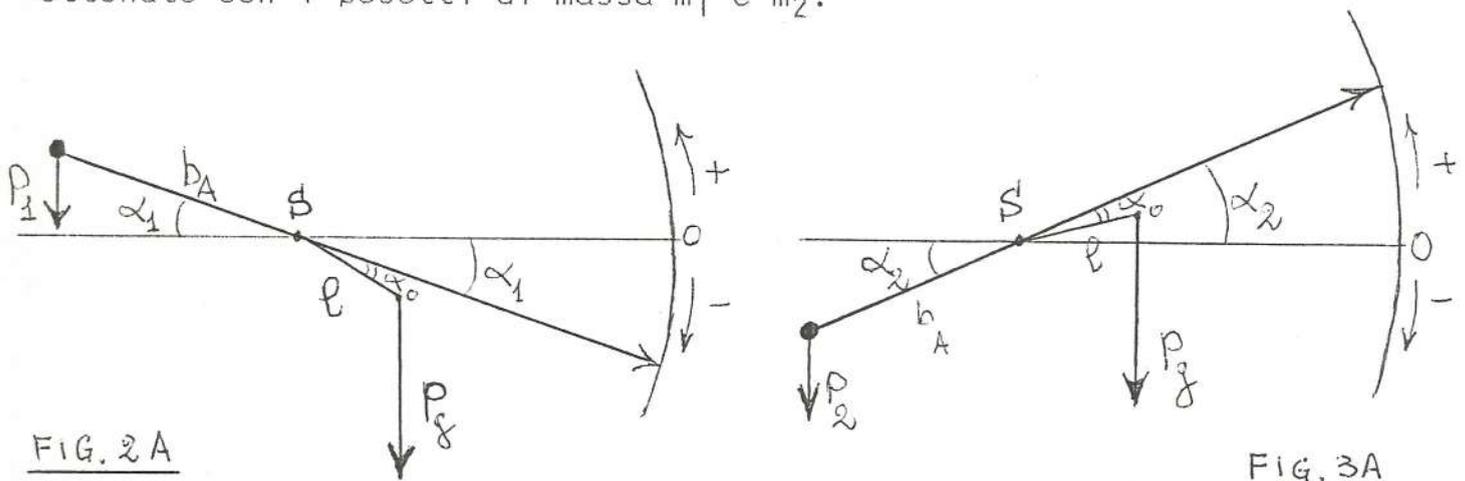
e il suo intervallo di variabilità risulta $- 0,269 \text{ rad} \leq \alpha \leq 0,269 \text{ rad}$ ovvero $- 15,4^\circ \leq \alpha \leq 15,4^\circ$.

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 .



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

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

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

m (g)	L (cm)	$\alpha = \frac{L}{b_B} \frac{180''}{\pi}$	$\tan\alpha$
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

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

$$T b_A + (P_M + F')b_M = P_g l (\cos \alpha_0 + \sin \alpha_0 \tan \beta) \quad (5')$$

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

$$T b_A + (F' - F)b_M = P_g l \sin \alpha_0 (\tan \beta - \tan \alpha) \quad (6)$$

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

$$T b_A + k(x' - x)b_M \approx P_g l \alpha_0 (\beta - \alpha) \quad (7)$$

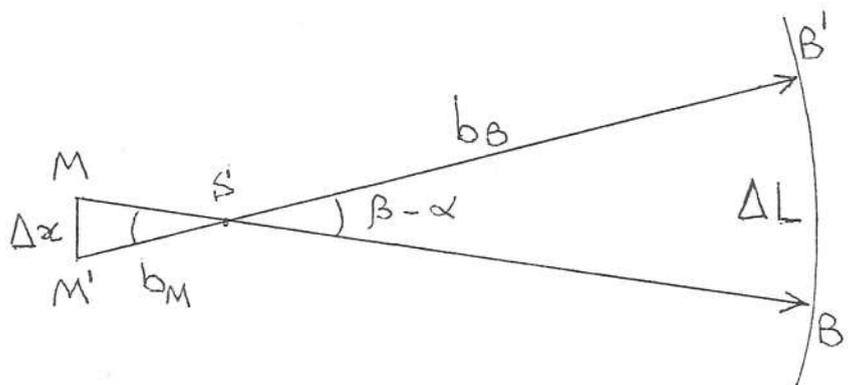
dove $x' < x$ e $\beta > \alpha$.

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

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

FIG. 4A

Allora si ha

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

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).

DETERMINAZIONE DEL RAPPORTO CARICA-MASSA DELL'ELETTRONE

(LUIGI TOGLIANI - Liceo Scientifico "Belfiore" - Mantova, 8/4/97)

BREVE STORIA DEI RAGGI CATODICI

- 1855 - H. GEISSLER (1815-1879) inventa la pompa a vuoto (milionesimo di atmosfera).
Esperimenti su conduzione elettrica nei gas rarefatti, tubi di J. PLÜCKER (1801-1868).
- 1858 - Esperimenti di Plücker e J. HITTORF (1824-1914) con gas rarefatti e osservazione della luminescenza verde.
- 1869 - Hittorf descrive per primo i raggi catodici (r.c.).
E. GOLDSTEIN (1850-1930) studia le emissioni del catodo pensandole come radiazioni (ipotesi ondulatoria o eterea).
- 1871 - C. VARLEY propone un'ipotesi corpuscolare per i r.c.
- 1875-79 - W. CROOKES (1832-1919) introduce barriere nei tubi a vuoto per studiare la natura dei r.c. (a lui è attribuita la scoperta dei r.c., a Goldstein è dovuto il nome).
Crookes stabilisce che i r.c.:
- hanno tutti le stesse proprietà, indipendentemente dalla natura del catodo;
 - seguono traiettorie rettilinee ortogonali al catodo;
 - possono essere deviati con un campo magnetico;
 - possono produrre reazioni chimiche simili alla luce (sali di Ag che cambiano colore se colpiti);
 - possono essere deviati da oggetti carichi (ipotizzato).
- 1884 - A. SCHUSTER (1851-1934) confuta l'idea di Crookes e propone, con Thomson e Perrin che dentro il tubo a vuoto avvenga la creazione di ioni positivi e negativi.
- 1887 - H. HERTZ (1857-1894) esegue una serie di esperimenti atti a rinforzare la tesi ondulatoria; prova che i r.c. non sono deviati da campi elettrici e non hanno proprietà elettrostatiche.
- 1895 - J.B. PERRIN (1870-1942) prova sperimentalmente che il catodo emette cariche negative, ma non che esse formino i r.c.
- 1897 - J.J. THOMSON (1856-1940) prova che i r.c. sono costituiti da particelle cariche negativamente (elettroni) e ne determina il rapporto massa/carica.

GLI ESPERIMENTI DI J. J. THOMSON (1897)

PRIMO ESPERIMENTO

Thomson ripete l'esperimento di Perrin modificando il tubo al fine di provare che i r.c. sono costituiti da particelle cariche negativamente emesse dal catodo.

I raggi sono emessi dal catodo C, passano attraverso il tappo forato metallico T connesso con l'anodo A, entrando nel bulbo del tubo a vuoto, senza incontrare i due cilindri coassiali B dotati di fenditure. T è collegato a terra (fig. 1).

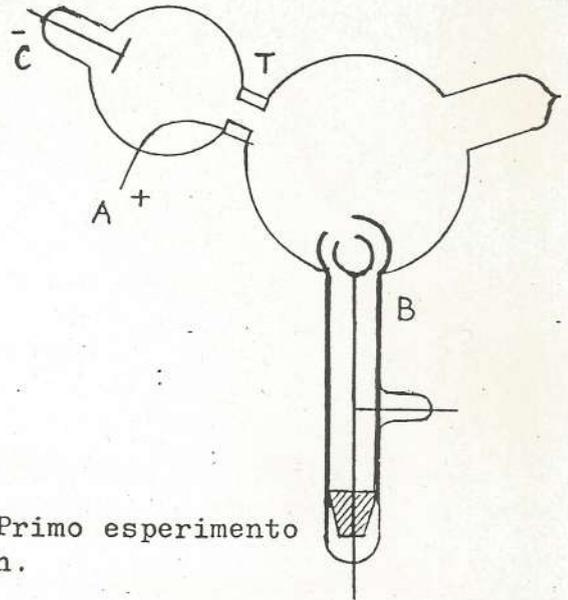


Fig. 1 - Primo esperimento di Thomson.

"I raggi catodici pertanto non potevano cadere sopra i due cilindri finché non venivano deflessi da un magnete. Il cilindro esterno era connesso a terra, quello interno all'elettrometro. Quando i r.c. non raggiungevano le fenditure, la carica trasmessa all'elettrometro [...] era piccola e irregolare; quando i raggi erano deflessi da un magnete in modo che cadessero sulla fenditura, all'elettrometro veniva trasmessa una forte carica di elettricità negativa. [...] Pertanto questo esperimento mostra che, comunque noi, tramite forze magnetiche, contorciamo e deflettiamo i r.c., la carica negativa segue lo stesso percorso dei raggi e che questa carica negativa è indissolubilmente legata ai r.c."

(J.J.Thomson, "On cathode rays", Philosophical Magazine, XLIV, 1897)

SECONDO ESPERIMENTO

Thomson ripete l'esperimento di Hertz (1887) per confutarne la tesi, secondo la quale i r.c. non potevano essere deflessi da forze elettriche. Thomson sostiene che il risultato di Hertz è spiegabile con la conducibilità del gas rarefatto del tubo: migliorando il vuoto si sarebbe dovuta vedere la deflessione prevista.

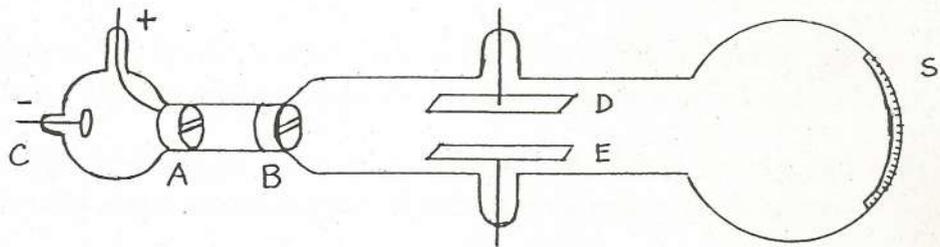


Fig. 2 - Secondo esperimento di Thomson.

I raggi emessi dal catodo C passano, attraverso le fenditure dell'anodo A e del tappo metallico forato B connesso a terra, tra le due piastre di alluminio D e E, fino a produrre una piccola macchia fosforescente sull'estremità del tubo provvista di una scala S. Applicando una d.d.p. tra D e E si ottiene una deflessione ad essa proporzionale. La deflessione era visibile anche con una d.d.p. di soli 2 V, purché il vuoto fosse molto spinto (vedi fig. 2).

TERZO ESPERIMENTO

L'ultimo esperimento fu quello determinante. Partendo dai risultati precedenti e, utilizzando sostanzialmente l'apparato del secondo esperimento, Thomson portò a fondo l'indagine sulla natura dei raggi catodici e misurò il rapporto massa/carica (e non carica/massa) degli elettroni, dando così una prova decisiva a favore dell'ipotesi corpuscolare sui raggi catodici. Per raggiungere l'obiettivo, Thomson usò due diversi metodi, utilizzando un campo deflettente prima magnetico e poi elettrico. Con il metodo del campo magnetico, dette m ed e rispettivamente la massa e la carica di una particella (elettrone), N elettroni portano una carica totale $Q = N \cdot e$, misurabile con un elettrometro collegato ad un recipiente che raccoglie i raggi catodici. Urtando contro un corpo solido, l'energia cinetica

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot N \cdot m \cdot v^2 = W$$

degli elettroni si converte in calore W (v è il modulo della velocità degli elettroni). Il calore W è misurabile, nota la capacità termica del corpo riscaldato, mediante la lettura dell'aumento di temperatura. Detto r il raggio di curvatura dell'orbita degli elettroni soggetti al campo magnetico B , risulta, dopo semplici passaggi algebrici, che:

$$m/e = B^2 \cdot r^2 \cdot Q / 2W.$$

Pertanto, misurati Q e W , resta da misurare il campo magnetico B ed il raggio r di deflessione del fascio. Per il campo Thomson dichiara che "il tubo veniva posto tra due grosse spire circolari parallele e spaziate di una lunghezza pari al loro raggio; queste spire producevano un campo magnetico uniforme, la cui intensità veniva determinata misurando con un amperometro la corrente che passava entro le spire".

Quindi il sistema usato da Thomson per creare il campo è quello delle bobine di Helmholtz, molto diffuso nei laboratori di Fisica in dotazione alle nostre scuole secondarie. Per quanto riguarda il raggio r , invece, Thomson ricorre ad una misura indiretta piuttosto insolita per noi. Schematizzando il tubo come in fig. 3, il fascio deflesso dal punto A al punto E , avrà un raggio di curvatura

$$r = \frac{1}{2} (AB + BE^2/AB)$$

come si vede in figura 4.

Infatti, detto O il centro dell'orbita e detto D il punto diametralmente opposto ad A , ne viene, per il secondo teorema di Euclide applicato al triangolo AED , che

$$BE^2 = AB \cdot DB = AB \cdot (2r - AB);$$

segue che:

$$2r = (AB^2 + BE^2) / AB$$

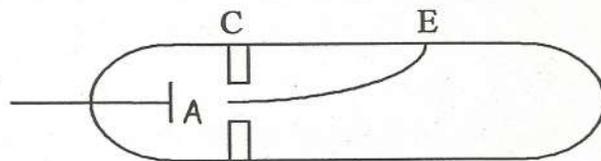


Fig. 3

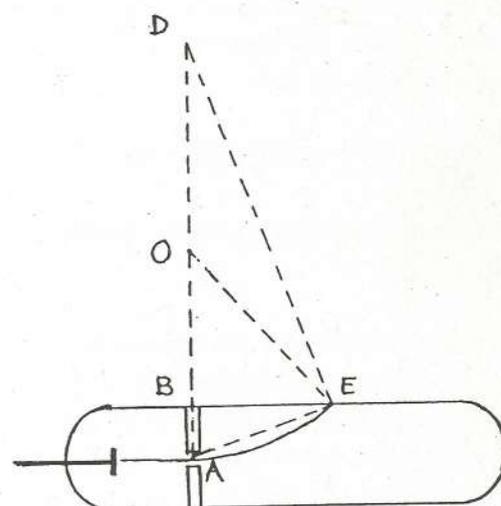


Fig. 4 - Terzo esperimento di Thomson.

e quindi vale la formula sopra riportata per r .
Thomson eseguì molte misure, concludendo che "la quantità m/e è indipendente dal tipo di gas", come si vede confermato nella sottostante tabella che riproduce quella compilata dallo stesso Thomson a seguito dei suoi celebri esperimenti.

Gas	Valore di W/Q	I	m/e	v	Gas	Valore di W/Q	I	m/e	v
Tubo 1									
Aria	$4.6 \cdot 10^{11}$	230	$0.57 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^9$	Aria	$1.8 \cdot 10^{12}$	350	$0.34 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{10}$
Aria	$6.1 \cdot 10^{11}$	230	$0.43 \cdot 10^{-7}$	$5.4 \cdot 10^9$	Aria	$2.5 \cdot 10^{12}$	400	$0.32 \cdot 10^{-7}$	$1.2 \cdot 10^{10}$
Aria	$5.5 \cdot 10^{11}$	230	$0.48 \cdot 10^{-7}$	$4.8 \cdot 10^9$	Aria	$1 \cdot 10^{12}$	285	$0.4 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^9$
Aria	$4 \cdot 10^9$	285	$0.4 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^9$	Idrogeno	$6 \cdot 10^{12}$	205	$0.35 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^9$
Idrogeno	$2.1 \cdot 10^{12}$	460	$0.5 \cdot 10^{-7}$	$9.2 \cdot 10^9$	Acido carbonico	$8.4 \cdot 10^{11}$	260	$0.4 \cdot 10^{-7}$	$7.5 \cdot 10^9$
Acido carbonico	$1.47 \cdot 10^{11}$	340	$0.4 \cdot 10^{-7}$	$8.5 \cdot 10^9$	Acido carbonico	$3.0 \cdot 10^{12}$	480	$0.39 \cdot 10^{-7}$	$1.3 \cdot 10^{10}$
Tubo 2									
Aria	$2.8 \cdot 10^{11}$	175	$0.53 \cdot 10^{-7}$	$3.3 \cdot 10^9$	Aria	$4.4 \cdot 10^{11}$	195	$0.47 \cdot 10^{-7}$	$4.1 \cdot 10^9$
Aria	$3.5 \cdot 10^{11}$	181	$0.47 \cdot 10^{-7}$	$3.8 \cdot 10^9$	Idrogeno	$2.8 \cdot 10^{11}$	175	$0.53 \cdot 10^{-7}$	$3.3 \cdot 10^9$
Aria	$2.5 \cdot 10^{11}$	160	$0.51 \cdot 10^{-7}$	$3.1 \cdot 10^9$	Acido carbonico	$2 \cdot 10^{11}$	148	$0.54 \cdot 10^{-7}$	$2.5 \cdot 10^9$
Aria	$1.8 \cdot 10^{11}$	151	$0.63 \cdot 10^{-7}$	$2.3 \cdot 10^9$	Idrogeno	$2.8 \cdot 10^{11}$	175	$0.53 \cdot 10^{-7}$	$3.3 \cdot 10^9$
Idrogeno	$4.4 \cdot 10^{11}$	201	$0.46 \cdot 10^{-7}$	$4.4 \cdot 10^9$	Aria	$2.5 \cdot 10^{11}$	176	$0.61 \cdot 10^{-7}$	$2.8 \cdot 10^9$
Aria	$4.2 \cdot 10^{11}$	200	$0.48 \cdot 10^{-7}$	$4.1 \cdot 10^9$					
Tubo 3									
Aria	$2.5 \cdot 10^{11}$	220	$0.9 \cdot 10^{-7}$	$2.4 \cdot 10^9$	Aria	$3.5 \cdot 10^{11}$	225	$0.7 \cdot 10^{-7}$	$3.2 \cdot 10^9$
Idrogeno	$3 \cdot 10^{11}$	250	$1.0 \cdot 10^{-7}$	$2.5 \cdot 10^9$					

Si noti che i valori delle grandezze W/Q , $I = B \cdot r$, m/e , v in tabella sono tutti privi di unità di misura, così come appare nello scritto originale di Thomson. Ho buone ragioni per credere che l'unità usata da Thomson per m/e fosse g/unità (CGS) em. Infatti, come si riscontra sul testo di Perucca citato in bibliografia, una vecchia unità di carica elettrica è appunto l'unità del sistema CGS elettromagnetico che equivale a $10 C$. Prendendo tale unità di carica, si ottiene per il primo valore in tabella di m/e :

$$m/e = 0,57 \cdot 10^{-7} \text{ g/unità (CGS) em} = 0,57 \cdot 10^{-8} \text{ g/C.}$$

Il valore così ottenuto è proprio quello che si calcola, con due cifre significative, prendendo i valori noti di m e di e .

Nella parte finale della sua memoria, Thomson conclude dicendo che "I due punti fondamentali relativi a queste cariche mi sembrano essere: (1) esse sono identiche qualunque sia il gas attraverso cui avviene la scarica, (2) il loro libero cammino medio dipende unicamente dal mezzo attraversato". E successivamente: "Noi troviamo nei raggi catodici un nuovo stato della materia, uno stato in cui la suddivisione della materia è spinta molto più in là che nel comune stato gassoso: uno stato in cui tutta la materia - cioè materia derivata da sorgenti diverse, quali idrogeno, ossigeno, ecc. - è di un unico tipo, essendo questa materia la sostanza che compone tutti gli elementi chimici".

ESPERIENZE DIDATTICHE PER DETERMINARE IL RAPPORTO CARICA/MASSA DELL'ELETTRONE

A) IMPIEGO DELLE BOBINE DI HELMHOLTZ

E' noto che per una bobina di N spire circolari di raggio R , percorse da corrente i , il campo magnetico lungo l'asse x della bobina è dato da:

$$B = \mu_0 \frac{NiR^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

nel punto P distante x dal centro della bobina. Se invece le bobine sono due, collegate in serie e distanti $2d$, il campo magnetico nel punto $P(x,0)$, con $-d \leq x \leq +d$, è dato da:

$$B = \frac{\mu_0 NiR^2}{2} \left[\frac{1}{(R^2 + (d+x)^2)^{3/2}} + \frac{1}{(R^2 + (d-x)^2)^{3/2}} \right] \quad (1)$$

da cui segue:

$$B \cong 0,7155 \frac{\mu_0 N}{R} i \quad (2)$$

In prossimità del punto O e comunque per $-d \leq x \leq +d$, nell'ipotesi $R = 2d$, il campo \vec{B} risulta uniforme con buona approssimazione.

Si può proporre lo studio della funzione $B = B(x)$ di (1), ove $d = R/2$:

$$B = \frac{\mu_0 NiR^2}{2} \left[\frac{1}{(R^2 + (R/2 + x)^2)^{3/2}} + \frac{1}{(R^2 + (R/2 - x)^2)^{3/2}} \right], \quad -R/2 \leq x \leq +R/2$$

oppure graficarla con l'uso di strumenti informatici opportuni.

Nell'esperimento usiamo due bobine di Helmholtz di raggio medio $R = 20$ cm, dotate di $N = 154$ spire ciascuna.

Le bobine di Helmholtz, alimentate in continua, sono inserite in circuito come in figura 6.

L'alimentatore comprende reostato, amperometro e voltmetro. Il tubo a vuoto, sferico, è posto al centro delle bobine di H., ove il campo magnetico è quasi uniforme. All'interno del tubo gli elettroni sono sparati da un triodo (vedi fig. 7) usato come cannone elettronico.

Su ogni elettrone agisce la forza di Lorentz $\vec{f} = -e\vec{v} \wedge \vec{B}$ che funge da forza centripeta, dove:

$-e$ è la carica dell'elettrone, \vec{v} è la velocità degli elettroni, \vec{B} è il campo magnetico prodotto dalle bobine di H. (vedi fig. 8).

D'altra parte l'energia potenziale di un elettrone emesso dal filamento per effetto termoelettronico è data da: $U = eV$ (V è la d.d.p. filamento - placca) e si converte in energia cinetica $E_c = \frac{1}{2} m v^2$ (m è la massa dell'elettrone). da tutto ciò segue che:

$$\begin{cases} evB = m \frac{v^2}{r} \\ eV = \frac{1}{2} m v^2 \end{cases} \quad \text{da cui:} \quad \frac{e}{m} = \frac{2V}{B^2 r^2} \quad (3)$$

e anche: $v = \frac{2V}{Br}$, ove r è il raggio dell'orbita circolare degli elettroni.

Dalla (3) si vede che, per determinare e/m , occorre conoscere il valore di V (letto sul voltmetro delle figure 6 e 7), quello di r (letto grazie alle tacche interne del tubo a vuoto che, rivestite di materiale fluorescente, si illuminano se colpite dal fascio elettronico, come indicato in fig. 9; sono possibili valori di r pari a: 2,0 cm; 3,0 cm; 4,0 cm; 5,0 cm) e infine quello di B ,

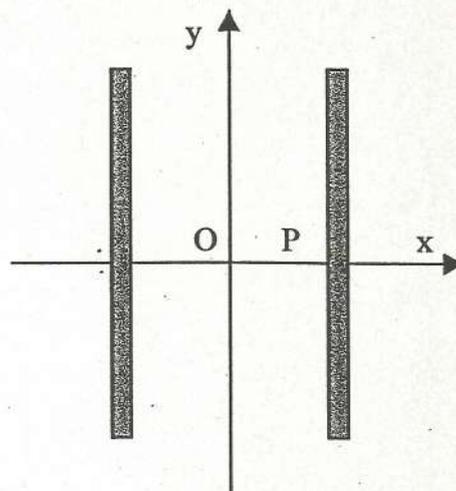


Fig. 5 - Bobine di Helmholtz

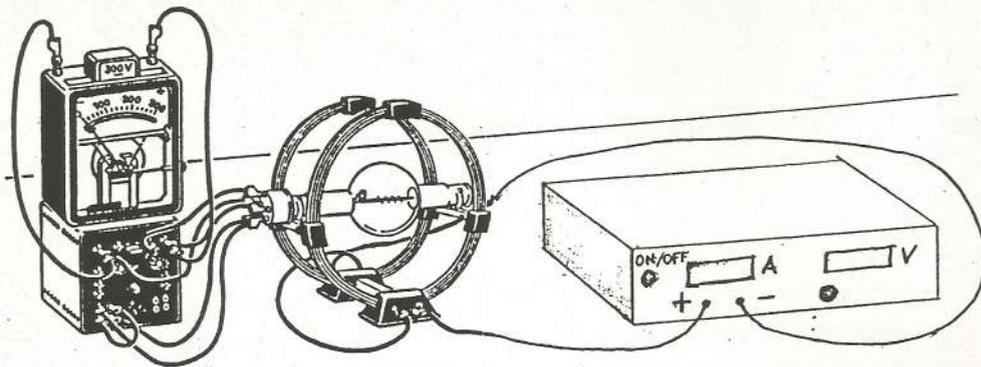


fig. 6

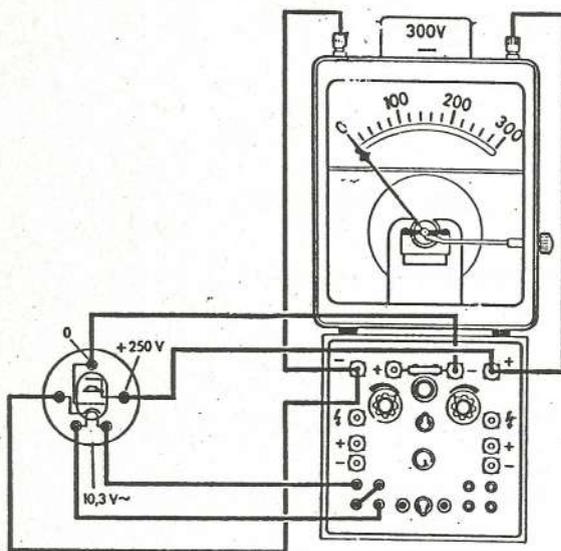


fig. 7

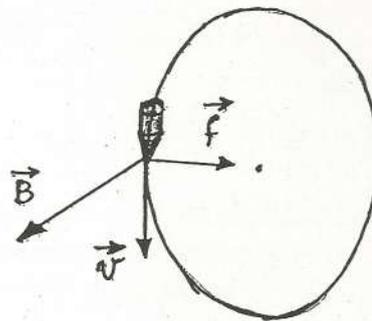


fig. 8

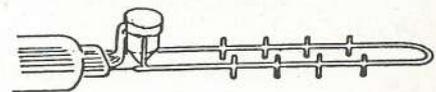


fig. 9

calcolabile con l'equazione (2) , dopo aver letto l'intensità di corrente i sull'amperometro di figura 6 .

Si possono eseguire le misure con valori diversi del raggio r e della tensione V .

Un esempio di dati sperimentali raccolti è fornito dalla seguente tabella.

V (V)	i (A)	B (mT)	r (m)	e/m ($10^{11}C/kg$)
90 ± 3	$2,46 \pm 0,02$	$1,70 \pm 0,01$	$0,020 \pm 0,001$	$1,6 \pm 0,2$
90 ± 3	$1,55 \pm 0,02$	$1,07 \pm 0,01$	$0,030 \pm 0,001$	$1,7 \pm 0,2$
90 ± 3	$1,28 \pm 0,02$	$0,89 \pm 0,01$	$0,040 \pm 0,001$	$1,4 \pm 0,2$
90 ± 3	$1,03 \pm 0,02$	$0,71 \pm 0,01$	$0,050 \pm 0,001$	$1,4 \pm 0,1$
150 ± 3	$1,29 \pm 0,02$	$0,89 \pm 0,01$	$0,050 \pm 0,001$	$1,5 \pm 0,1$

B) IMPIEGO DI UNA VALVOLA TERMOIONICA (corso P.S.S.C.)

Questa volta gli elettroni sono emessi dal catodo di una valvola termoionica 6AF6G, detta 'occhio magico', usata per mettere in sintonia le radio di una volta.

L'analisi teorica per determinare il rapporto carica/massa dell'elettrone è la stessa dell'esperimento precedente e, pertanto, si usa ancora l'equazione (3).

Gli elettroni, emessi dal catodo riscaldato, sono attratti dall'anodo a forma conica, rivestito di materiale fluorescente, che circonda il catodo. Due elettrodi deflettori, respingendo gli elettroni, originano due zone d'ombra sull'anodo (figure 10 e 11).

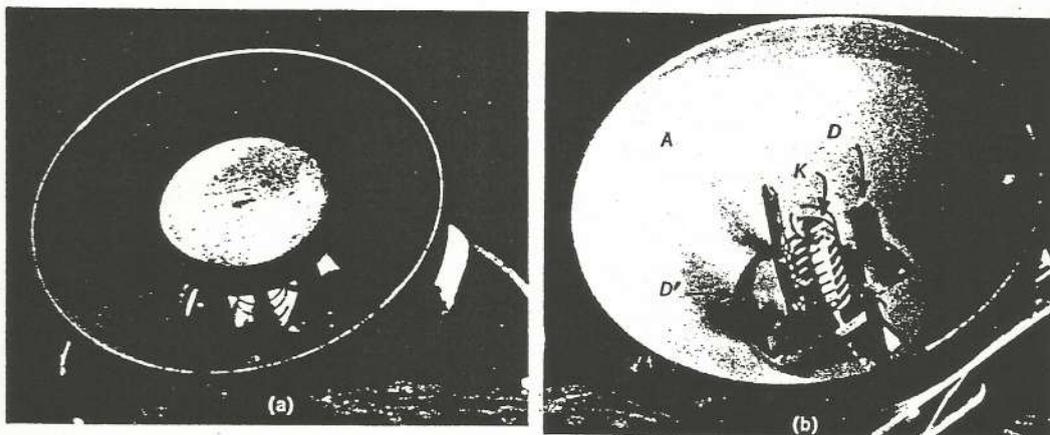


Figura 10(a) Occhio magico senza l'involucro di vetro. (b). Il cappuccio metallico centrale che si vede in (a) è stato rimosso dopo averne tagliato i fili di sostegno: sono così messe in evidenza le parti essenziali di cui è costituita la valvola. K è il catodo che emette gli elettroni. D e D' sono gli elettrodi deflettori che formano l'ombra e A è l'anodo rivestito di materiale fluorescente.

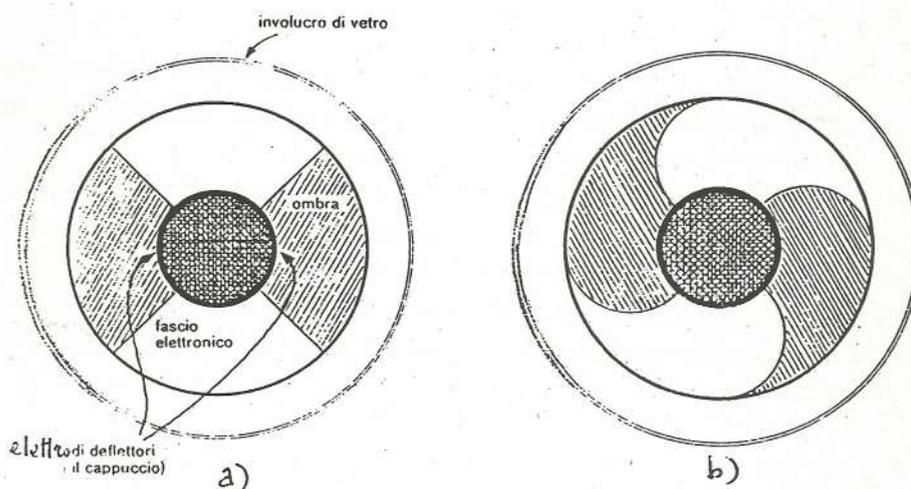


fig. 11

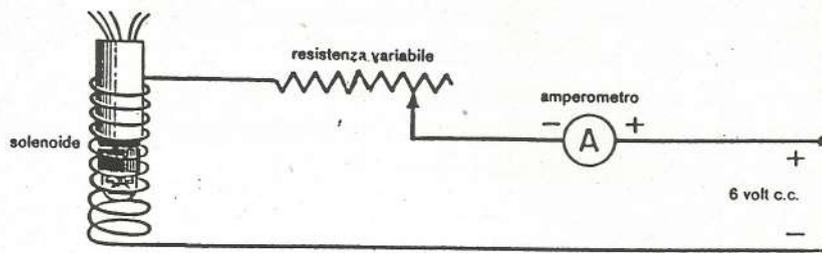


fig. 12

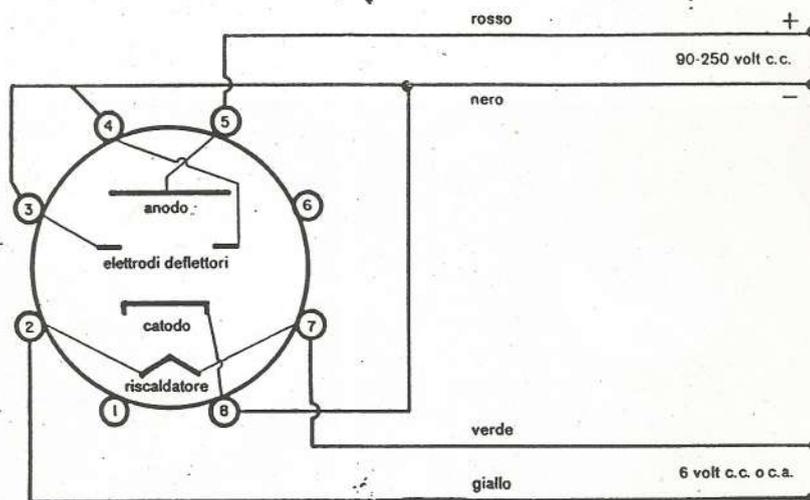


fig. 13

La valvola emette elettroni che sono deviati dal campo magnetico prodotto dal solenoide alimentato come in figura 12; la valvola, inserita nel solenoide, è alimentata come in figura 13. La costante del solenoide vale $k_s = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ T/A} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ N/(A}^2 \text{ m)}$.

Come nell'esperienza precedente si legge la d.d.p. V tra anodo e catodo della valvola sul voltmetro e l'intensità di corrente i del solenoide sull'amperometro. Per valutare il raggio di curvatura del fascio elettronico ci si serve di opportuni cilindretti di legno.

Sostituendo tali misure nella (3) si determina ancora la carica specifica dell'elettrone. La valutazione è molto più grossolana rispetto alla precedente: si arriva solo a trovare l'ordine di grandezza di e/m .

Bibliografia

- [1] E. Perucca, *Fisica generale e sperimentale*, UTET, Torino (1946)
- [2] N. Robotti, *I primi modelli dell'atomo*, Loescher, Torino (1978)
- [3] AA. VV., *Fisica a cura del PSSC*, Zanichelli, Bologna (1995)