

# DIFFUSIONE DI PARTICELLE ALFA

Esperienza realizzata da E. Rutherford e dai suoi collaboratori H. Geiger e E. Marsden (1908-1910);

interazione tra le particelle  $\alpha$  (prodotti di emissione radioattiva) e la materia;

sondare la struttura dell'atomo della quale era stato proposto un modello da Thomson (1904 - *On the structure of the atom*; modello *plum pudding*);

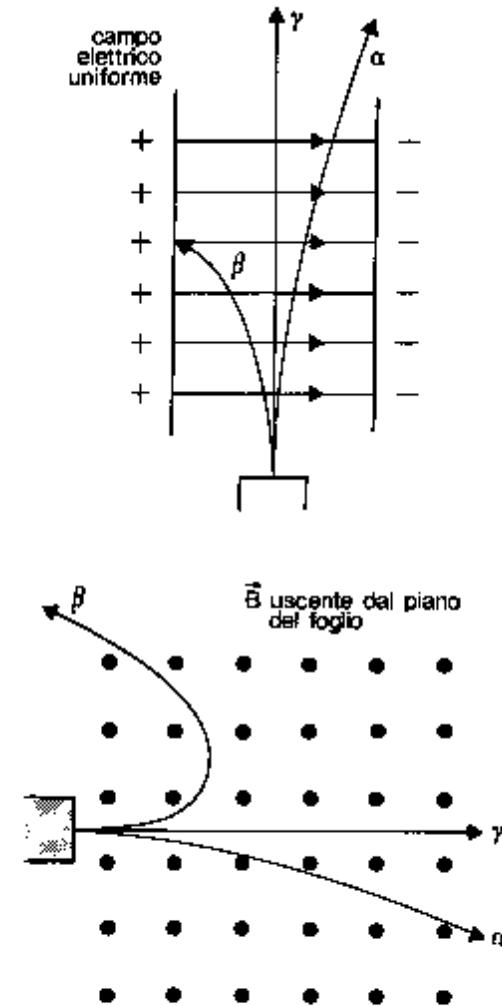


FIG. 3 - Per studiare la natura della emissione radioattiva, questa viene fatta passare in campi elettrici (sopra) e magnetici (sotto). Il comportamento della emissione è indicato dalle due figure.

**PARTICELLE  $\alpha$ :** costituiscono uno dei tipi di radiazione emessi da materiali radioattivi;

l'emissione di radiazione è scoperta da H. Becquerel sulla base di osservazioni relative alla fluorescenza di sali contenenti uranio (*Sur les radiations émises par phosphorescence* - 1896);

in seguito (1898) le ricerche di M. e P. Curie portano alla individuazione di altri elementi radioattivi, il torio, il polonio e il radio;

nel 1899 Rutherford espone risultati interpretabili con l'ipotesi che le radiazioni emesse dai sali di uranio siano costituite da una radiazione di tipo  $\alpha$ , poco penetrante e facilmente assorbita, e da un'altra radiazione di tipo  $\beta$  più penetrante; nello stesso anno diversi ricercatori dimostrano che le radiazioni  $\beta$  subiscono deviazioni in un campo magnetico e sono caratterizzate da un rapporto carica/massa uguale a quello dei raggi catodici (elettroni);

nel 1900 P. U. Villard scopre che la radiazione emessa dai materiali radioattivi contiene un terzo componente dotato di elevato potere penetrante: la radiazione  $\gamma$ ;

Nel 1902 Rutherford dimostra che le radiazioni  $\alpha$  in un campo magnetico subiscono deviazioni in senso opposto alle radiazioni  $\beta$  e presentano un rapporto carica/massa circa pari alla metà dell'analogo rapporto per lo ione idrogeno; non conoscendo elementi intermedi tra idrogeno ed elio, Rutherford formula l'ipotesi che le radiazioni  $\alpha$  siano ioni di elio doppiamente ionizzati;

le esperienze di Rutherford e collaboratori riguardano l'interazione delle particelle  $\alpha$  con la materia; in particolare la diffusione (*scattering*) di tali particelle in seguito all'attraversamento di una sottile lamina metallica.

## MODELLO DI THOMSON DELL'ATOMO

tra il 1858 e il 1859 J. Plücker avvia lo studio dei fenomeni che si osservano durante la conduzione elettrica nei gas in condizione di estrema rarefazione, mettendo in evidenza l'esistenza di una radiazione emessa dal catodo (raggi catodici);

nel 1871 E. Goldstein analizza le caratteristiche dei raggi catodici e interpreta tali raggi mediante una concezione ondulatoria; nello stesso anno C. Varley propone una interpretazione dei raggi catodici come particelle cariche (negativamente);

nel 1895 J. Perrin progetta un'esperienza atta ad osservare una serie di effetti che corroborano l'assunto secondo cui i raggi catodici sono costituiti da particelle cariche negativamente;

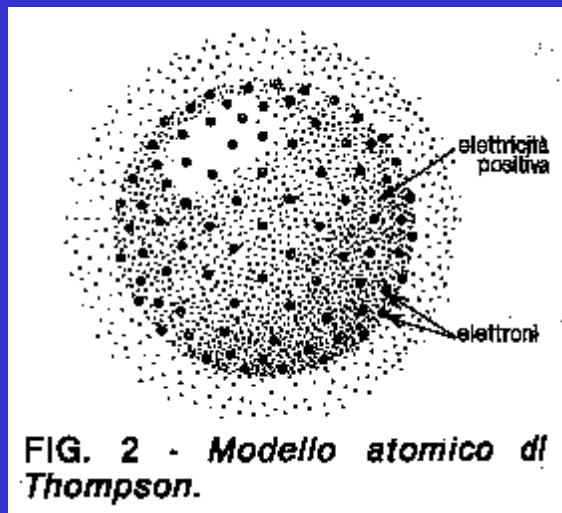
in seguito J. J. Thomson dimostra che tali particelle devono avere dimensione molto minore di quelle delle molecole di aria e nel 1897 realizza esperimenti mediante i quali riesce a determinarne il rapporto carica/massa (*On cathods rays* - 1897); i risultati delle esperienze di Thomson portano all'ipotesi dell'esistenza di costituenti elementari dell'atomo e alla necessità di costruire modelli della struttura interna dell'atomo stesso;

nel 1904 J. J. Thomson espone un modello per l'atomo (*On the structure of the atom* - 1904) nel quale dimostra che accettando l'ipotesi che gli elettroni negativi sono disposti su cerchi concentrici e sono in rotazione con opportune velocità all'interno di una sfera diffusa di carica positiva si ottiene un modello meccanicamente stabile dell'atomo che fornisce una spiegazione sufficientemente corretta di numerosi fenomeni; inoltre è possibile collegare il numero degli elettroni con la periodicità presente nella tabella degli elementi (modello *plum pudding*);

in seguito (dal 1908), le esperienze di Rutherford e collaboratori sulla diffusione delle particelle  $\alpha$  da parte degli atomi di una sottile lamina metallica indicano la presenza entro l'atomo di strutture più complesse rispetto a quelle di quelle compatibili con il modello di Thomson.

## Il modello di Thomson dell'atomo (modello *plum pudding*)

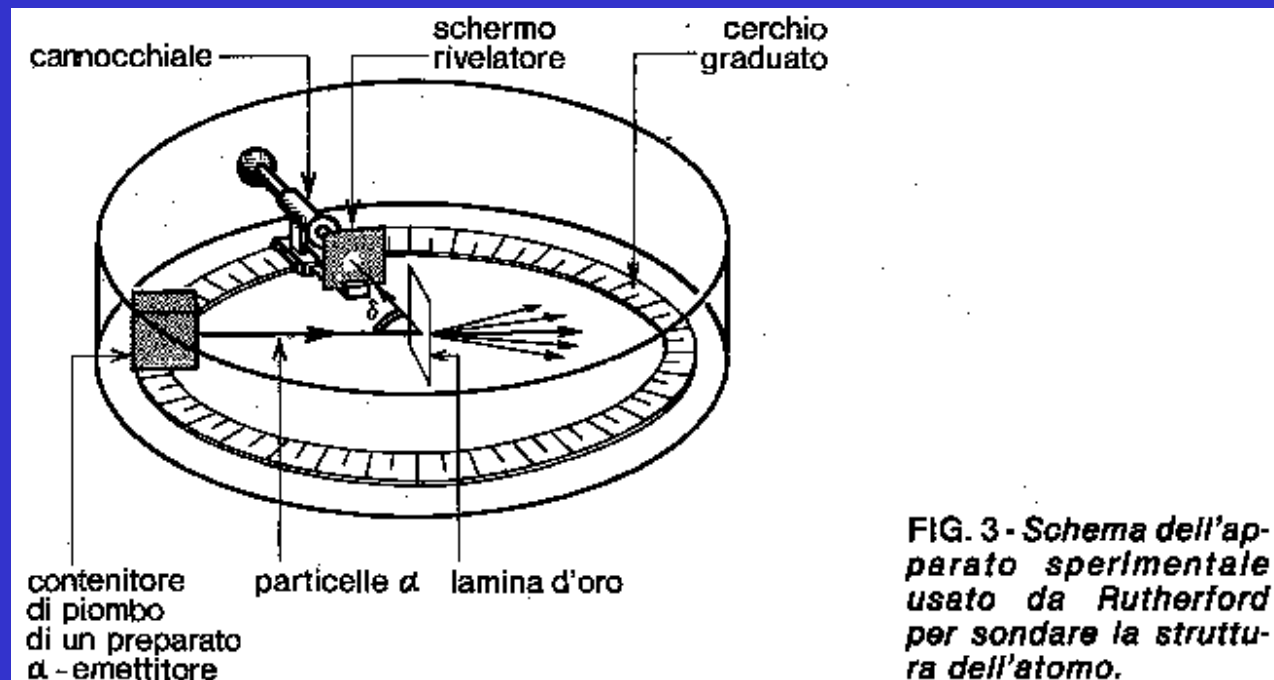
l'atomo è costituito da una “goccia” sferica uniformemente carica, positivamente, contenente elettroni, carichi negativamente, e con massa notevolmente inferiore alla “goccia” stessa



## Apparato sperimentale utilizzato originariamente da Geiger e Marsden:

l'apparato sperimentale è costituito da:

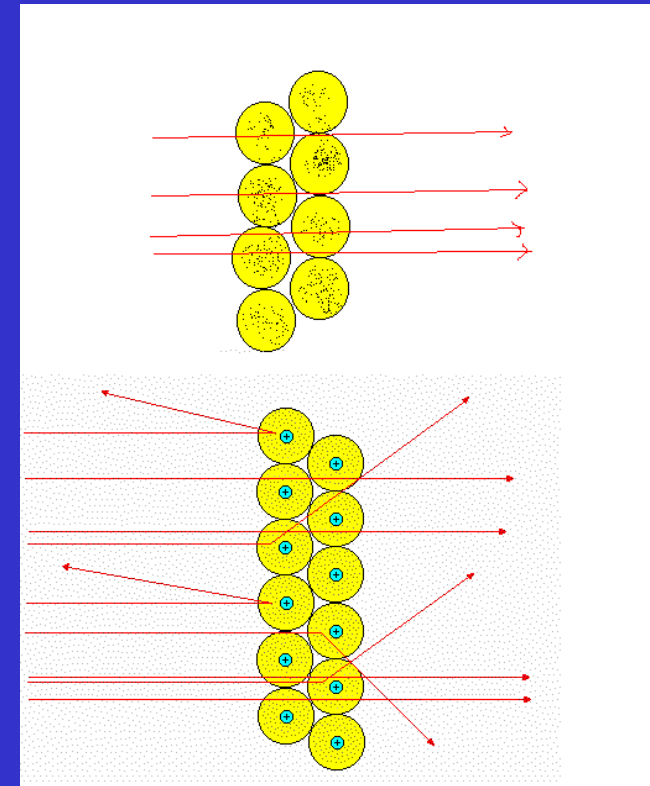
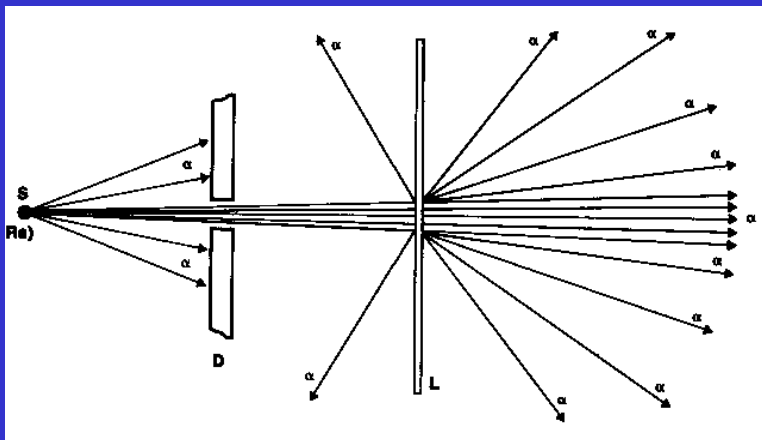
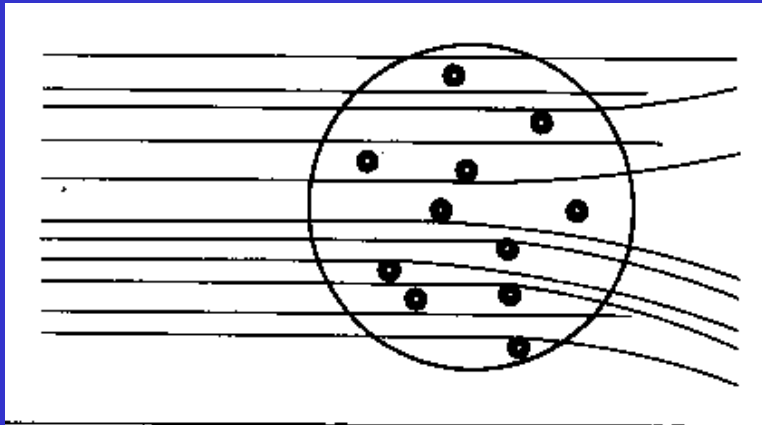
- sorgente di particelle  $\alpha$ ;
- schermo di piombo con sottile fenditura per ottenere un fascio molto sottile;
- laminetta sottile di metallo (oro, alluminio ecc.) contro cui viene indirizzato il fascio di particelle  $\alpha$ ;
- schermo di solfuro di zinco (materiale fluorescente che emette lampi di luce quando viene colpito dalle particelle dopo che esse hanno superato la laminetta di metallo);



## I risultati delle esperienze di Geiger e Mardsen mostrano:

a) allargamento del fascio di particelle, prevedibile in base al modello di Thomson ipotizzando deflessioni successive delle particelle  $\alpha$  da parte degli atomi costituenti la laminetta metallica;

b) rilevamento di alcune particelle anche ad angoli molto grandi rispetto alla direzione originaria e di alcune rimbalzate indietro; dati non interpretabili in base al modello di Thomson;

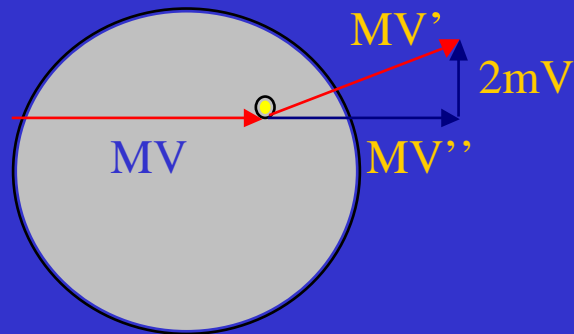


Consideriamo l'urto di una particella  $\alpha$  contro un atomo nell'ipotesi che il modello di Thomson sia valido.

La deflessione della particella  $\alpha$  non può essere dovuta alla presenza di cariche positive poiché, essendo distribuite uniformemente nello spazio, il contributo di una qualsiasi di esse sarà bilanciato dal contributo di un'altra. La deflessione è perciò causata da urti elastici con gli elettroni.

Supponendo il momento della particella  $\alpha$  incidente pari a  $MV$ , la velocità acquistata, dopo l'urto, dall'elettrone colpito non può superare il valore  $2V$  nel caso di urto elastico. Ne segue che il massimo momento acquistato dall'elettrone, e perciò perso dalla particella, non può superare  $2mV$ . Se supponiamo che tale momento perso dalla particella sia ortogonale alla direzione del momento iniziale otteniamo per l'angolo di uscita della particella un valore dell'ordine di:

$$\text{Tg} \vartheta \approx \vartheta \approx \frac{2mV}{MV''} \approx \frac{2mV}{MV} = 10^{-3} \text{ rad}$$



Si noti che abbiamo approssimato  $V''$  con  $V$  poiché la perdita di quantità di moto della particella è molto piccola visto la piccola massa dell'elettrone.

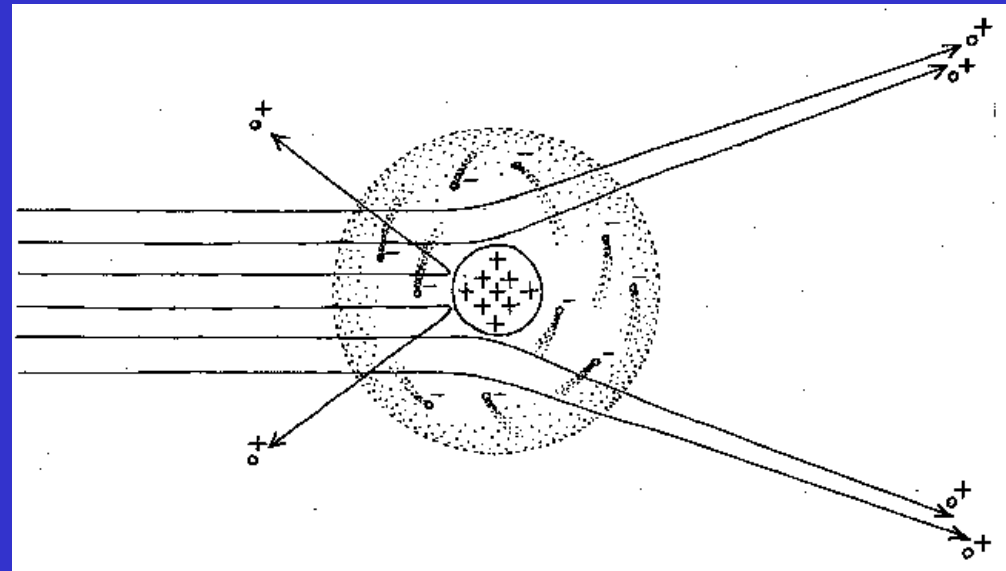
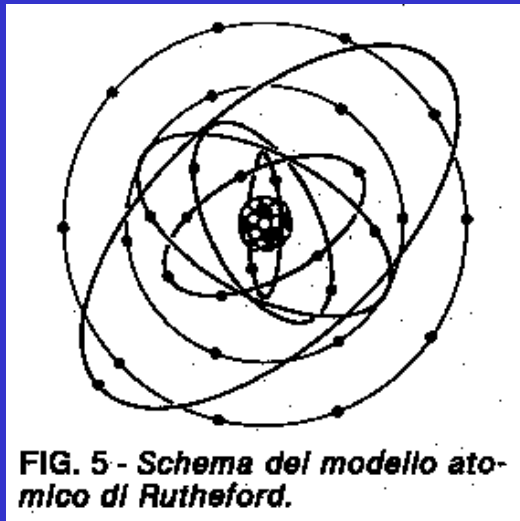
I dati sperimentali forniscono valori per l'angolo di deflessione anche superiori a  $90^\circ$  il che significa che il modello di Thomson non è corretto.

## DIFFUSIONE DI RUTHERFORD (5);

L'interpretazione di Rutherford dei risultati delle esperienze di Geiger e Mardsen

•1911 - *The scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  particles by matter and the structure of the atom*

ipotesi di Rutherford: la carica positiva dell'atomo si suppone concentrata in un nucleo centrale nel quale è anche localizzata la quasi totalità della massa; intorno a tale nucleo ruotano a velocità elevatissima i singoli elettroni dotati di massa molto più piccola e di carica negativa (modello *nucleare* dell'atomo); interazione coulombiana delle particelle  $\alpha$  con la carica positiva del nucleo:



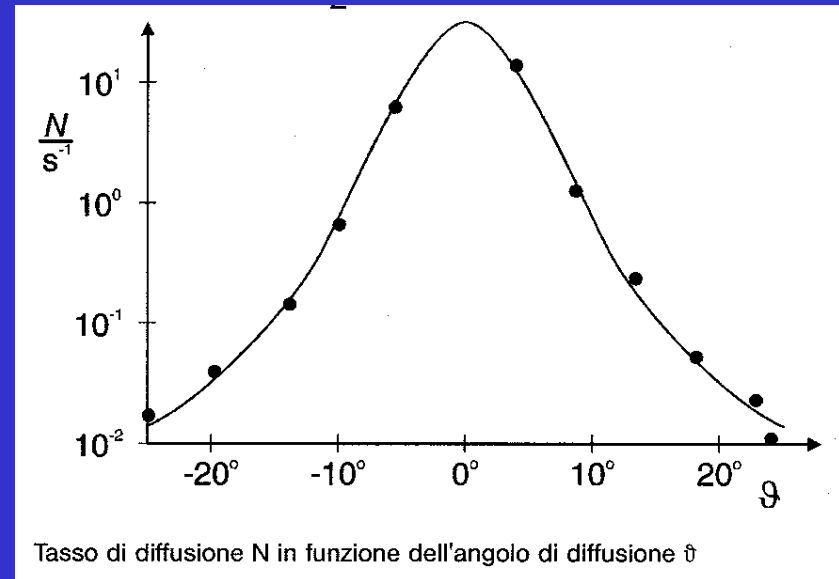


**Risultati del modello di Rutherford e previsioni** successivamente confermate:

la formula di Rutherford che esprime la percentuale di particelle  $\alpha$  diffuse entro un angolo compreso tra  $\theta$  e  $\theta+d\theta$  in relazione alla carica degli atomi costituenti la laminetta bersaglio dell'esperimento e allo stesso angolo  $\theta$ : il numero  $N(\theta)$  di particelle deviate in un angolo compreso tra  $\theta$  e  $\theta+d\theta$  è direttamente proporzionale al quadrato del numero atomico  $Z$  del materiale costituente la laminetta e inversamente proporzionale alla quarta potenza del seno dell'angolo  $\theta/2$ :

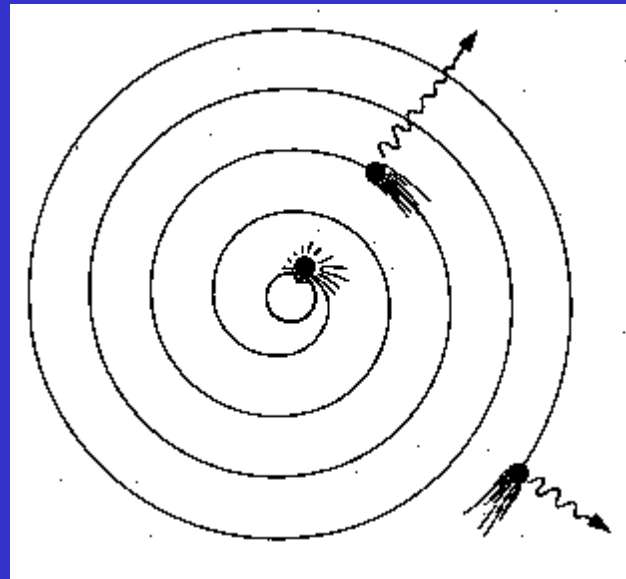
$$N(\theta) \propto \frac{Z^2}{\sin^4(\theta/2)}$$

mediante tale formula si ottiene un buon accordo quantitativo con i risultati relativi alla diffusione delle particelle  $\alpha$  a grandi angoli; dalla successiva analisi della diffusione delle particelle  $\alpha$  di diversa energia, si ottiene il corretto ordine di grandezza per le dimensioni del nucleo;



## Problemi lasciati aperti dal modello di Rutherford

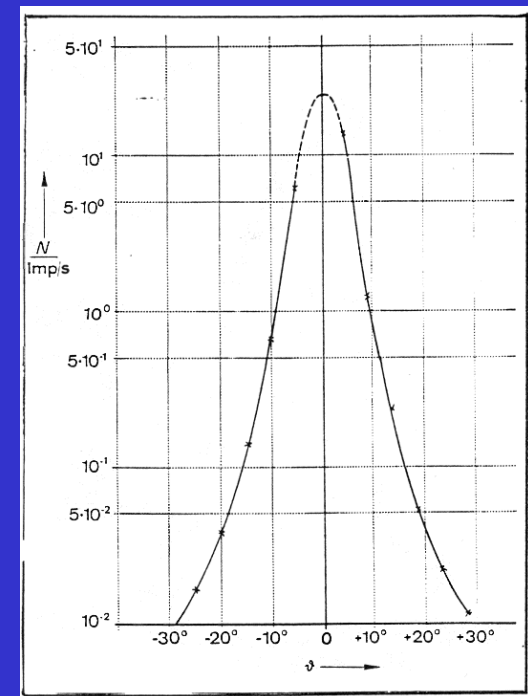
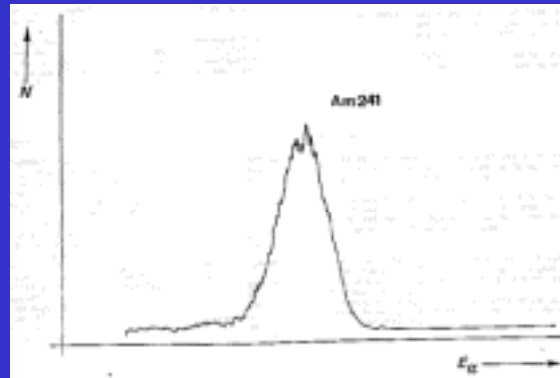
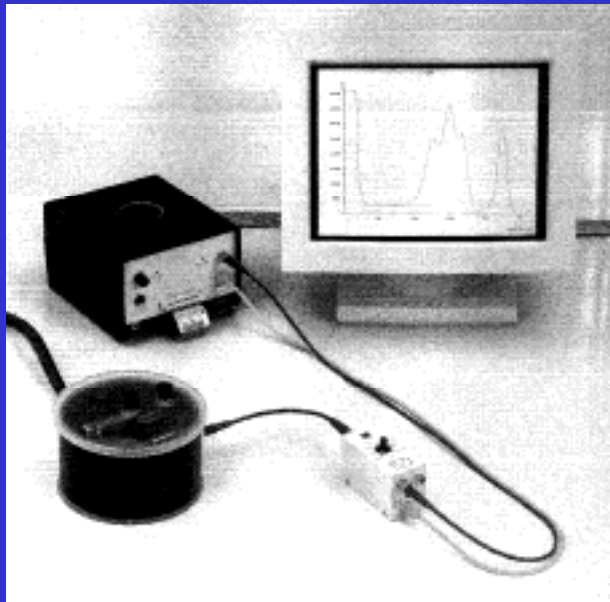
per l'elettromagnetismo classico l'atomo strutturato secondo il modello nucleare sarebbe un sistema instabile: secondo la teoria di Maxwell dell'elettromagnetismo infatti, gli elettroni in orbita intorno al nucleo dovrebbero perdere rapidamente energia per irraggiamento e quindi precipitare sul nucleo; il modello di Rutherford non spiega le caratteristiche degli spettri di emissione



## Proposta di esperimento

consiste nel rilevare mediante un sensore a semiconduttore le particelle  $\alpha$  emesse da una sorgente di Am 241 e diffuse a vari angoli da una laminetta sottile di metallo all'interno di una camera a vuoto;

si confronta quindi la distribuzione delle particelle diffuse in funzione dell'angolo di diffusione con la relazione di Rutherford: essendo  $N(\theta)$  il numero di particelle deviate in un angolo compreso tra  $\theta$  e  $\theta+d\theta$ ;  $Z$ : il numero atomico del materiale costituente la laminetta;  $\theta$ : l'angolo di diffusione.



## L'elettrone e l'esperimento di Millikan

La parola "elettrone" (deriva dalla parola greca che significa "ambra") fu introdotto nel 1894 dal fisico irlandese G. J. Stoney.

Gli elettroni venivano prodotti nei tubi a scarica (raggi catodici), attraverso l'effetto fotoelettrico o come risultato della emissione di raggi beta da parte di nuclei radioattivi. Oggi: emissione termoionica da filamenti o per "effetto campo" (field emission).

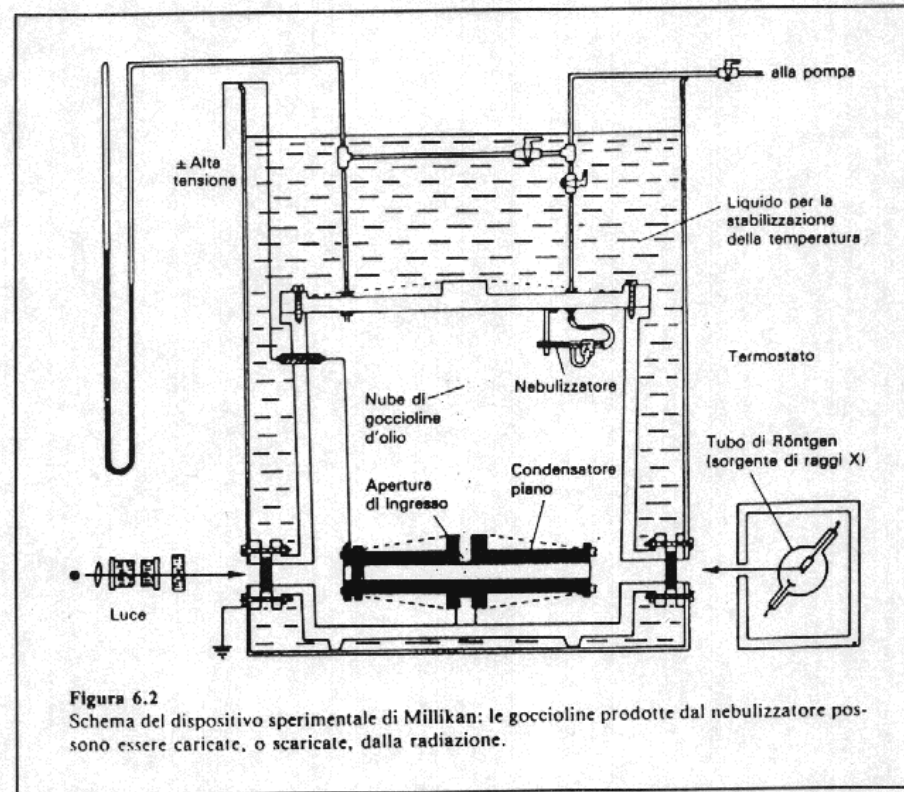


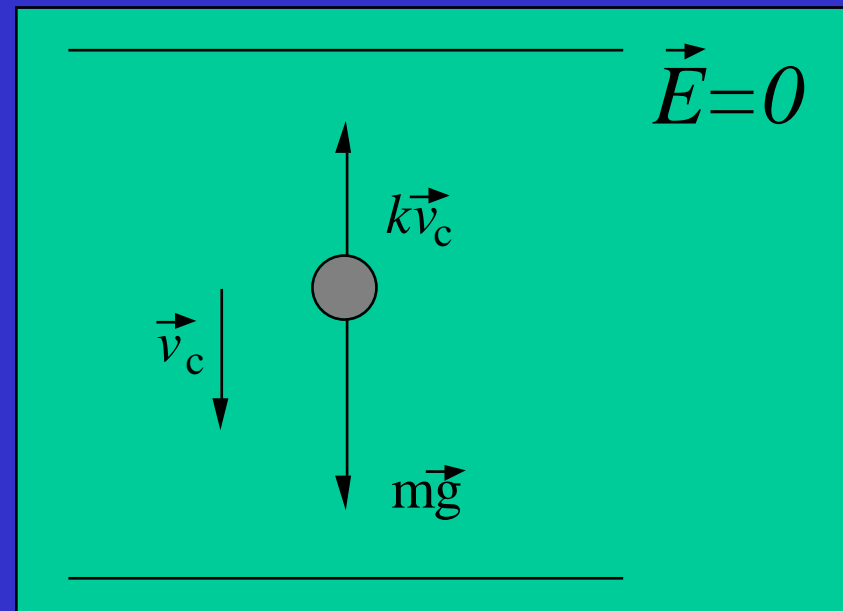
Figura 6.2  
Schema del dispositivo sperimentale di Millikan: le goccioline prodotte dal nebulizzatore possono essere caricate, o scaricate, dalla radiazione.

L'analisi delle forze su una goccia d'olio darà l'equazione che determina la carica di una goccia.

La Figura 1 mostra le forze agenti su una goccia quando essa cade in aria e raggiunge la velocità limite. (La velocità limite viene raggiunta dopo pochi millisecondi per le gocce usate in questo esperimento.) In Figura 1,  $v_c$  è la velocità di caduta,  $k$  il coefficiente di attrito tra la goccia e l'aria, e  $g$  è l'accelerazione della gravità. Si raggiunge la velocità limite quando le forze sono uguali e opposte:

(1)

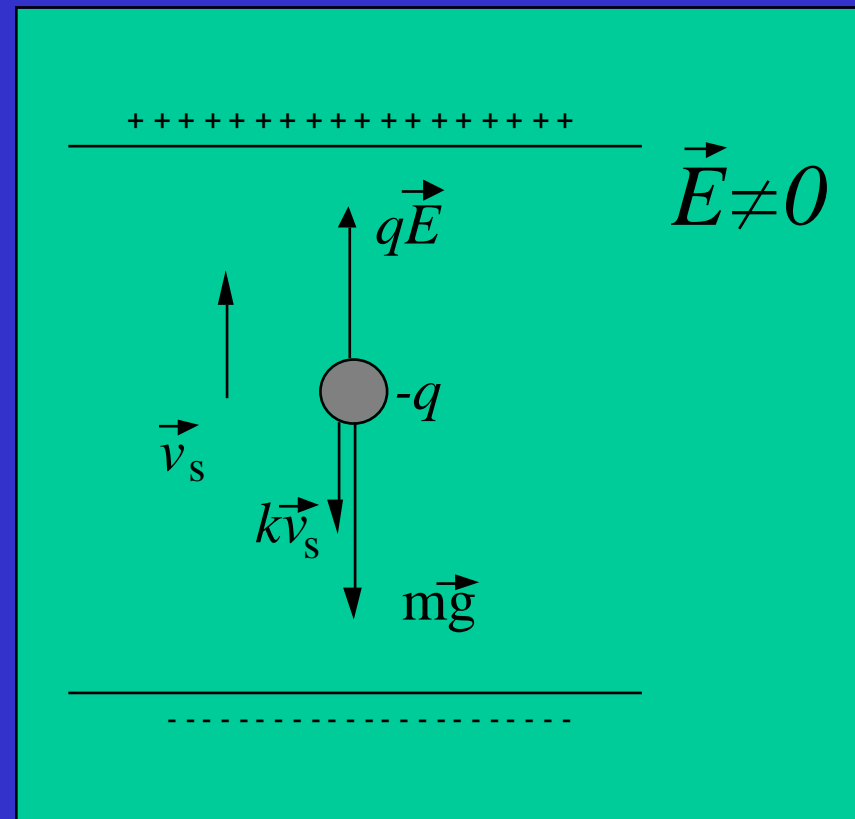
$$mg = kv_c$$



La Fig. 2 mostra le forze che agiscono su una goccia quando sale per l'influenza di un campo elettrico. In Fig. 2,  $E$  è l'intensità del campo elettrico e  $v_s$  è la velocità di salita. Sommando le forze e tenendo presente il loro verso si ottiene:

$$(2) \quad qE = mg + kv_s$$

In entrambi i casi c'è anche una piccola spinta di Archimede esercitata dall'aria sulla goccia. Poiché la densità dell'aria è un millesimo quella dell'olio, questa forza non viene considerata.



Eliminando  $k$  da Eq.(1) e (2) e mettendo in evidenza la carica  $q$ , otteniamo:

$$(3) \quad q = \frac{mg(v_c + v_s)}{Ev_c}$$

Mediante l'espressione del volume della sfera è possibile esprimere la massa in Eq.(3) nella forma:

$$(4) \quad m = (4/3)\pi a^3 \rho$$

dove  $a$  è il raggio della goccia e  $\rho$  la densità dell'olio.

Per calcolare  $a$ , si usa la legge di Stokes, che dà la relazione tra il raggio di un corpo sferico che cade a una velocità limite  $v_c$  in un mezzo viscoso (con coefficiente di viscosità,  $\eta$ )

(5)

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_c}{2g\rho}}$$

La legge di Stokes però non è valida quando la velocità di caduta in aria è minore di 0.1 cm/s. (Le gocce con queste velocità o con velocità minori hanno raggi dell'ordine di 2 micron, comparabile con il libero cammino medio delle molecole di aria, e questa condizione viola una delle assunzioni nella derivazione della legge di Stokes). Poiché le velocità delle gocce in questo esperimento saranno dell'ordine dello 0.01 a 0.001 cm/s, la viscosità deve essere moltiplicata per un fattore di correzione. La viscosità effettiva è:



(6)

$$\eta_{\text{eff}} = \eta \left( \frac{1}{1 + b/pa} \right)$$

dove  $b$  è una costante,  $p$  la pressione atmosferica e  $a$  il raggio della goccia calcolato usando la espressione approssimata (5). Sostituendo  $\eta_{\text{eff}}$  della Eq. (6) nella Eq.(5) la espressione finale per  $a$  risulta essere:

(7)

$$a = \sqrt{\left( \frac{b}{2p} \right)^2 + \frac{9\eta v_c}{2g\rho}} - \frac{b}{2p}$$

Sostituendo Eq. (4), (5) e (6) in (3) otteniamo

(8)

$$q = 6\pi \sqrt{\frac{9\eta^3}{2g\rho \left(1 + \frac{b}{pa}\right)^3}} (v_c + v_s) \sqrt{v_c}$$

L'intensità del campo elettrico è dato da  $E = V/d$ , dove  $V$  è la differenza di potenziale tra la piastre parallele separate da una distanza  $d$ .  $E$ ,  $V$  e  $d$  sono espresse nello stesso sistema di misura. Se  $E$  è in unità elettrostatica,  $V$  è espresso in Volt e  $d$  in centimetri, usando la relazione:

$$(9) \quad E(\text{e.s.u.}) = \frac{V(\text{volts})}{300d(\text{cm})} .$$

Sostituendo le Eq.(7) e (8) nella Eq. (6) e ordinando i termini otteniamo:

$$q = \left[ 400\pi d \left( \frac{1}{g\rho} \left[ \frac{9\eta}{2} \right]^3 \right)^{1/2} \right] \times \left[ \left( \frac{1}{1+b/pa} \right)^{3/2} \right] \times \left[ \frac{(v_c + v_s)\sqrt{v_c}}{V} \right]$$

I termini nella prima parentesi quadra devono essere determinati una sola volta per un apparato particolare. Il secondo termine deve essere determinato per ogni goccia, mentre il terzo set di parentesi va calcolato per ogni cambio di carica nella goccia.

La definizione dei simboli usati, con le loro unità di misura in Eq.(9) sono:

$q$  – carica, in u.e.s. della goccia,

$d$  – separazione delle piastre del condensatore, in cm,

$\rho$  – densità dell'olio in gm/cm<sup>3</sup>,

$g$  – accelerazione della gravità in cm/s<sup>2</sup>,

$\eta$  – viscosità dell'aria in poise (dyn s/cm<sup>2</sup>),

$b$  – costante, uguale a  $6.17 \times 10^{-4}$  (cm di mercurio) (cm),

$p$  – pressione barometrica in cm di mercurio,

$a$  – raggio della goccia in cm, calcolato secondo Eq.(5),

$v_c$  – velocità di caduta in cm/s,

$v_s$  – velocità di salita in cm/s,

$V$  – differenza di potenziale tra le piastre del capacitore in volt.

Il valore oggi accettato per la carica dell'elettrone è di:

$e = 4.803 \times 10^{-10}$  u.e.s. oppure  $1.60 \times 10^{-19}$  coulomb.