

Corso di Fisica moderna di base

Modulo 1: Elementi di Struttura della Materia

ATTENZIONE: LE SEGUENTI PAGINE SONO INTESE COME UNO SCHEMATICO RIASSUNTO DI QUANTO TRATTATO IN AULA, NON PRETENDONO DI ESSERE ESAURIENTI O SOSTITUTIVE ALLE LEZIONI STESSE

0 Generalità

Calendario del modulo “Elementi di struttura della materia”

Novembre	21	28		
Dicembre	5	12	14 giovedì?	19

Orario dei martedì: 15-16.15 16.30-17.30
equivalenti ad un credito di 3 ore

È richiesta la firma di presenza!

Argomenti

Massa e carica: balistica particelle cariche

Raggi canale, raggi catodici
q/m elettrone di Thomson ($E \perp B$)
q/m raggi canale ($E // B$) Isotopi
Millikan, misura di e^-

Spettroscopia e struttura atomica: Corpo nero

Kirchhoff - Prime definizioni
Stefan Boltzmann
Wien (legge spostamento, legge corpo nero)
Rayleigh Jeans
Planck

Appendice: cenni sulla statistica di Maxwell - Boltzmann

Interazione radiazione materia (e primi accenni dualismo onda corpuscolo)

Fotoelettrico (1887 Hertz-1905 Einstein-1913 Millikan)
Compton (1923)
Produzione di coppie

Modelli atomici

Atomo di Thomson (1898)
Scattering Rutherford (1911)
Spettroscopia

Appendice: cenni sulla Relatività ristretta

Atomo di Bohr (1913) (e segue dualismo onda-corpuscolo).

Postulati (st. stazionari, em e ass tra stati q.izzati, mom angolare q.izzato)
Serie spettrali, numero quantico principale
Esp di Franck e Hertz (1914, ma riconoscimento valore nel '19)
 λ di de Broglie (1924)
Davisson-Germer experiment (1927)
principio di indeterminazione di Heisenberg (1927)
Il principio di corrispondenza

Numeri quantici.

Momento angolare, l
momento magnetico, m
Spin, m_s
Momento angolare totale j
Esper. di Stern e Gerlach (successive interpretazioni risultati)

1 Contesto e scariche nei gas

1.1 *Situazione della fisica alla fine dell'Ottocento*

La fisica può vantarsi di aver raggiunto un bagaglio consolidato e ben organizzato di strumenti e conoscenze, in diversi campi. Esempi:

Elettromagnetismo (Equazioni di Maxwell – Trattato 1873), Termodinamica (Statistica, ipotesi atomica/molecolare), Meccanica, Ottica...

In realtà esistono dei problemi interni alle teorie, che, proprio perché queste si sono dimostrate valide, meritano di essere risolti. Inoltre, il continuo sviluppo tecnologico (che porta a nuovi strumenti o a un decisivo miglioramento di quelli già in uso) ci permette di ampliare l'orizzonte esplorativo dei fenomeni, consentendo di effettuare nuove scoperte e di individuare fenomeni inattesi, talvolta problematici da inserire nel quadro teorico "classico".

Es. 1 Radiometro di Crookes

- Crookes 1875 (crede di dimostrare pressione di radiazione, ma il vuoto non è sufficientemente spinto: quello che si osserva in realtà è un moto delle particelle del gas in cui il mulinello è immerso)
- Lebedev, Nichols et Hull 1901 (grazie ad apparati più sofisticati, convincono la comunità scientifica dei propri risultati)

Si verifica l'esistenza della pressione di radiazione -vedi per es.

<http://math.ucr.edu/home/baez/physics/General/LightMill/light-mill.html>

Anche una radiazione, non solo una particella dotata di massa, può compiere un lavoro! Viene meno uno dei criteri che permettevano di decidere sulla natura di un tipo di raggi (ad esempio Stokes, nel 1898, sosteneva che, poiché i raggi catodici erano in grado di azionare un mulinello, allora erano formati da particelle massive)

Es. 2 Spettro elettromagnetico

Si passa dall'immagine di un insieme di differenti tipi di radiazioni (es. visibile [$\sim 4000\text{-}7000 \text{ \AA}$, con $\text{\AA} = 10^{-8} \text{ cm} = 10^{-10} \text{ m}$], calorica [infrarosso], attinica [ultravioletto]) ad un unico "spettro elettromagnetico". Inizialmente l'unificazione dello spettro è sostenuta teoricamente, ma nella pratica si fatica ad accettare l'ipotesi, anche per il fatto che le diverse "zone" dello spettro sono indagate con mezzi sperimentali diversi. L'osservazione o meno di effetti di interferenza, finché l'ottica si occupa solo dello spettro visibile, mi permette di decidere sulla natura ondulatoria di una radiazione. Se invece non ho più limiti su lunghezza d'onda o frequenza, posso solo chiedermi, se non osservo interferenza, se il fenomeno non è di tipo ondulatorio, oppure se il mio apparato non è sufficientemente sensibile. Problema che si presenta con la scoperta, nel 1895, dei raggi x.

Esistono quindi alcuni problemi nel decidere se una determinata radiazione è composta da onde o particelle, anche in ambito strettamente classico. In questo tipo di ricerche i diversi tipi di "nuove" radiazioni, osservate per la prima volta da esperimenti con tubi in pressione, appaiono una palestra decisiva. Tanto che uno dei protagonisti di queste ricerche, J.J. Thomson, affermava:

"There is no other branch of physics which affords us so promising an opportunity of penetrating the secret of electricity." J.J. Thomson, 1893

I raggi catodici e la "scoperta" dell'elettrone

Gli esperimenti sui raggi catodici (osservati a partire dal 1858) furono emblematici di questo periodo di incertezza su come decidere della natura della radiazione.

Nel 1897 gli accurati esperimenti di Thomson permettono di definire i raggi catodici come un insieme di particelle cariche, a cui verrà dato poi il nome di elettroni; ma l'introduzione del concetto, e in seguito del nome "elettrone", vede coinvolti diversi scienziati, in ambiti anche diversi:

- 1874 convegno British Association "unità elettrica" di Stoney (lo battezza elettrone nel 1891-94)
- 1881 Helmholtz "atomi di elettricità"
- 1897 JJ Thomson

Sulla possibile natura dei raggi catodici, ondulatoria o corpuscolare, in quegli anni (il periodo più intenso del dibattito risale agli anni 1895/1897) si fronteggiavano due schieramenti:

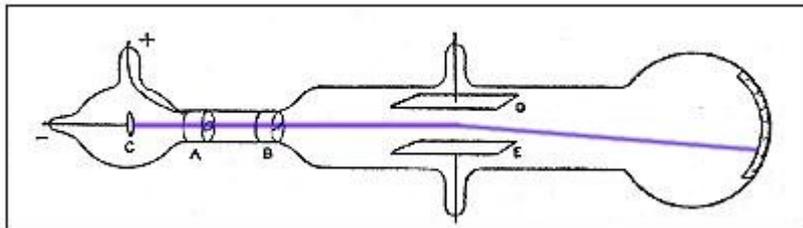
- Corrente che caldeggia l'ipotesi ondulatoria, tra cui Hertz
- Corrente che caldeggia l'ipotesi corpuscolare, tra cui Perrin

Sempre in quegli anni, ad aumentare la "confusione", si registrano nuove scoperte, a volte di "onde", a volte di "particelle", esempio:

- Roentgen osserva i raggi x
- Bequerel osserva radiazioni emesse da Sali di Uranio

1.2 L'esperienza di Thomson per lo studio dei raggi catodici

Nota: i raggi catodici prendono questo nome perché “partono” dal catodo, l'elettrodo positivo, e si osservano dietro all'anodo. Se si applica un campo elettrico o magnetico nella zona delle placche E, D, si osserva una deflessione del raggio.



- 1) Per selezionare la velocità, applichiamo contemporaneamente un campo **E** elettrico e un campo **B** magnetico, perpendicolari tra loro e alla direzione dei raggi, che deflettono perciò verticalmente le particelle cariche:

$$F = q E$$

$$F = q v \times B \quad \text{forza di Lorentz}$$

Le due forze sono parallele, entrambi nella direzione z.

Per ogni valore fissato di B e E, non sono deflesse solo le particelle che si spostano lungo l'asse x, con velocità in modulo:

$$v = E/B$$

Il sistema di riferimento è scelto in modo che asse z // E, asse x // v, e scelgo l'origine degli assi in modo che

$$z_0 = 0$$

Le particelle collimate hanno inoltre

$$v(z_0) = 0$$

Quindi la particella non è ferma, ma non ha componenti verticali nella velocità.

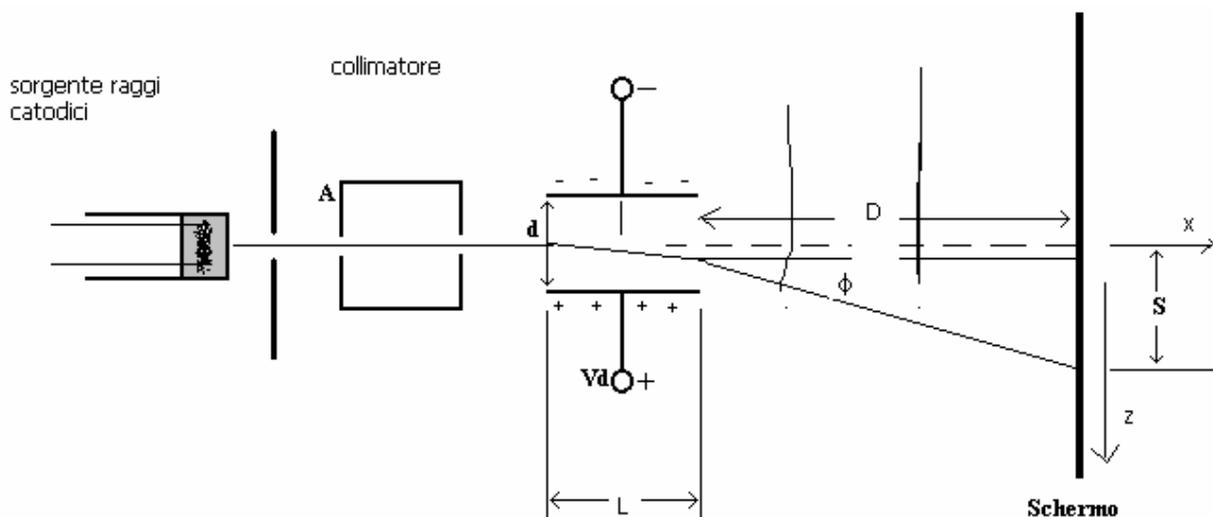


Figura 1 Apparato per la misura di q/m con i raggi catodici

2) spengo B, ho solo campo elettrico E, nella zona delle piastre, L

Il moto nella direzione z è accelerato uniforme, nella direzione x è uniforme.

Nella direzione z ho accelerazione costante: $a_z = qE/m$

Nella direzione x ho velocità costante: $v_x = x/t$

Da cui ricavo:
$$z = \frac{1}{2} \frac{qE}{m} t^2$$

sostituisco $t = x/v_x$

e ottengo
$$z = \frac{1}{2} \frac{qE}{m} \left(\frac{x}{v_x} \right)^2$$
 Equazione 1

Avrò che la deviazione S è composta da due deviazioni diverse:

una, ad andamento parabolico come prescritto dall'equazione precedente, all'interno del campo elettrico (delle piastre, di L)

$$z_1 = \frac{1}{2} \frac{qE}{m} \left(\frac{L}{v_x} \right)^2$$

una, rettilinea perché non risente più del campo elettrico, dall'uscita dalle piastre fino allo schermo:

$$z_2 = R \operatorname{tg} \Phi$$

ma $\operatorname{tg} \Phi = (dz/dx)$ calcolata in $x = L$

derivo l'Equazione 1 e sostituisco $x = L$.

si ottiene
$$z_2 = \frac{q}{m} \frac{ELD}{v_x^2}$$

allora la deviazione totale $S = z_1 + z_2 = \frac{qE}{mv_x^2} L \left(\frac{1}{2} L + D \right)$ **Equazione 2**

$$\text{da cui } \frac{q}{m} = 2 \frac{Sv^2}{EL(L + 2D)}$$

avendo sulla destra tutte quantità note, posso derivare, dalla misura di z, il valore di q/m

Il risultato lasciava perplessi: circa 1/1000 del valore q/m ricavato (con metodi elettrochimici) per l'atomo di idrogeno, il più leggero. Queste particelle dovevano avere o una carica enorme, o una massa piccolissimo.

Could anything at first sight seem more impractical than a body which is so small that its mass is an insignificant fraction of the mass of an atom of hydrogen? --which itself is so small that a crowd of these atoms equal in number to the population of the whole

world would be too small to have been detected by any means then known to science."
J.J. Thomson, a proposito della propria misura di q/m

Poteva qualcosa sembrare a prima vista meno "pratico" di un corpo di massa insignificante rispetto a quella di un atomo di idrogeno? Il quale è a sua volta tanto piccolo che un numero di tali atomi pari all'intera popolazione mondiale non sarebbe rilevabile in nessun modo noto alla scienza...

La comunità scientifica, grazie a questo esperimento, prende atto del fatto che i raggi catodici sono costituiti da particelle cariche, di carica negativa. Si noti però che nel 1937, il figlio di J.J. Thomson – George Paget Thomson - vinse il premio Nobel per aver dimostrato che gli elettroni possiedono anche una natura ondulatoria.

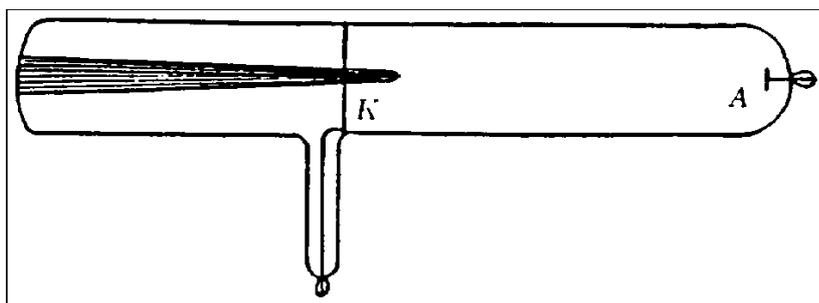
Articolo originale di J.J.Thomson

<http://web.lemoyne.edu/~GIUNTA/thomson1897.html>

Animazioni e materiale per didattica

<http://www.sciencemuseum.org.uk/on-line/electron/section2/index.asp>

1.3 Raggi canale e isotopi



I raggi anodici (o raggi canale) furono osservati per la prima volta durante alcuni esperimenti realizzati nel 1886 dallo scienziato tedesco Eugen Goldstein, in cui utilizzava un tubo a scarica con catodi (K) perforati. Sembravano viaggiare attraverso questi buchi (canali) del catodo, in direzione opposta ai "raggi catodici". Goldstein chiamò questi raggi "Kanalstrahlen" - raggi canale. Nel 1907 uno studio, effettuato ancora una volta da J.J. Thomson, che analizzava come questi "raggi" venivano deflessi in un campo magnetico, rivelò che le particelle che formavano questi raggi non avevano tutte la stessa massa, ma a seconda dei casi la loro massa variava.

Questa volta i campi **B** ed **E** sono paralleli, nella direzione **z**, mentre il fascio collimato percorre la direzione **x** e devia nella direzione **z** per effetto di **E**, nella direzione **y** per effetto di **B**.

– Considero solo **E**

Come visto prima, **E** induce una deviazione:

Equazione 2
$$z_E = \frac{qE}{mv_x^2} L \left(\frac{1}{2} L + D \right)$$

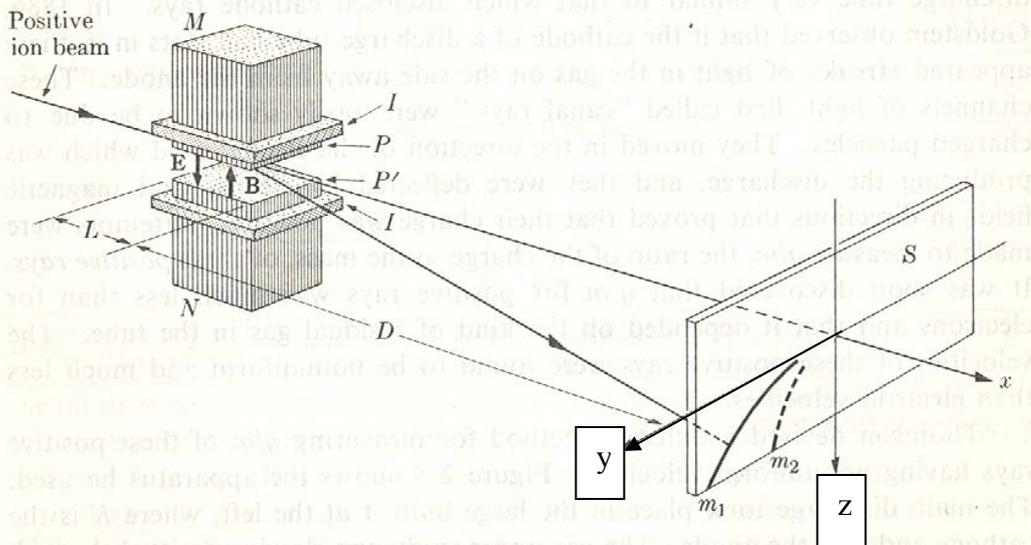


Fig. 2-10 Formation of positive-ray parabolas.

Figura 2 Apparato per la misura di q/m con i raggi canale

– Considero solo B

In generale, l'effetto del campo magnetico su una carica in moto è quello di curvare il raggio, con una traiettoria circolare di raggio ricavabile dall'espressione della forza:

$$m \frac{v^2}{R} = qvB$$

da cui:

$$R = \frac{mv}{qB}$$

L'equazione del cerchio sul piano xy , scelta l'origine nell'ingresso del dispositivo, si scrive:

$$(y - y_0)^2 + (x - x_0)^2 = R^2$$

$$x_0 = 0$$

$$y_0 = -R$$

$$(y + R)^2 + x^2 = R^2$$

$$R = -\frac{x^2 + y^2}{2y}$$

Poiché la deviazione in direzione y è minima rispetto alla distanza percorsa nella direzione x , posso approssimare l'arco di cerchio con un arco di parabola:

$$R = -\frac{x^2 + y^2}{2y} \approx -\frac{x^2}{2y}$$

Da cui
$$y_B = -\frac{qBx^2}{2mv_x}$$

Procedendo, nella stessa maniera del caso dei raggi catodici, a sommare i contributi (all'interno del dispositivo e fuori, fino allo schermo [$y=y_1 + y_2$]) si ricava:

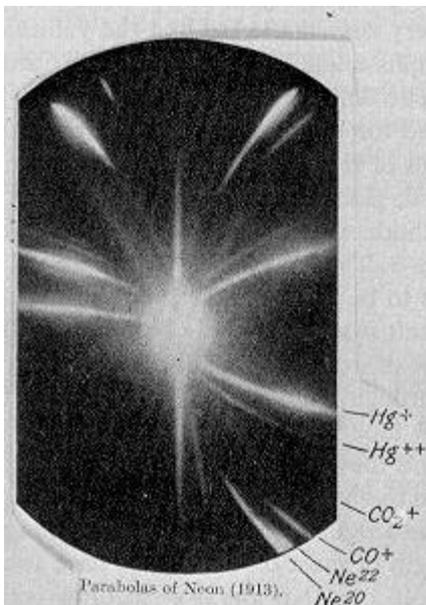
Equazione 3
$$y_B = -\frac{qB}{mv_x} L \left(\frac{1}{2}L + D \right)$$

Combinando le equazioni 2 e 3 (elevo al quadrato la 3 e sostituisco v^2 con il valore che di v^2 si ottiene dalla 2), si ottiene una parabola:

$$z = \frac{mE}{qB^2} \frac{1}{L \left(\frac{1}{2}L + D \right)} y^2$$

Con gli esperimenti sui raggi canale, nel 1898 W. Wien determinò il valore di q/m per l'Idrogeno, trovando un valore consistente con quelli ricavati da esperimenti sull'elettrolisi.

Al variare delle velocità, a pari q/m sto su una stessa parabola. Diverse parabole sono relative a masse differenti ► Alle diverse parabole corrispondono diversi ISOTOPI



Due ISOTOPI hanno lo stesso numero atomico, ma un diverso numero di massa. Contengono lo stesso numero di elettroni e di protoni, ma un diverso numero di neutroni.

In particolare, nel corso dei suoi esperimenti sui raggi canale, nel 1913 Thomson fotografò due parabole, corrispondenti a due isotopi del Neon, rispettivamente di numero di massa 20 e 22.

Negli anni seguenti (a partire dal 1918) un allievo di Thomson (Francis Aston) perfezionerà l'apparato fino ad ottenere un efficiente SPETTROMETRO DI MASSA.

Nel 1920 Aston dimostrò che tutti gli elementi hanno valori di massa atomica che sono multipli di un valore fisso, oggi scelto come 1/12 della massa atomica del carbonio ^{12}C

(valore che definisce l'unità di massa atomica $u = 1,66053886 \times 10^{-27}$ kg)

Materiale didattico

http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/massspectrograph/massspectrograph1_1.htm

1.4 Millikan e la carica dell'elettrone

Una gocciolina d'olio che cade nell'aria risente della forza peso, dovuta alla propria massa, e dell'effetto frenante legato all'attrito dell'aria, così che raggiunge presto una velocità limite costante, la velocità di regime.

Millikan, ionizzando con una sorgente di raggi x l'aria della camera dove venivano spruzzate le goccioline d'olio, osservava che alcune gocce si caricavano a loro volta, prima di cadere nella parte inferiore dell'apparato (vedi Figura 3) Qui egli applica una d.d.p., ottenendo un campo elettrico che ulteriormente frena la caduta delle goccioline. La velocità limite quindi cambia.

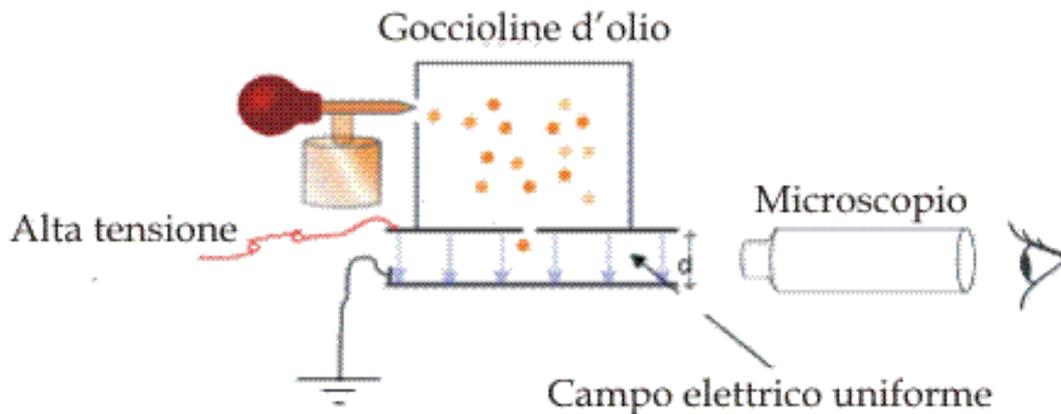


Figura 3: schema per l'esperienza di Millikan volta alla misura di e.

Le goccioline risentono così:

dell'attrito → forza di Stokes $F = 6\pi\eta av$

della forza peso = $\frac{4}{3}\pi\rho a^3 g$

della forza elettrica = qE

NOTA

- a è il raggio della particella
- ρ la densità
- la massa di una particella d'olio è $\rho V = \rho \frac{4}{3}\pi a^3$,
- η è il coefficiente di attrito

se $E = 0$ $\frac{4}{3}\pi a^3 \rho g = 6\pi\eta a v_0$ **Equazione 4**

Se $E \neq 0$ $\frac{4}{3}\pi a^3 \rho g + qE = 6\pi\eta a v_1$ **Equazione 5**

Sottraendo la eq.4 dalla 5: $qE = 6\pi\eta a (v_1 - v_0)$

Mentre trovo il raggio a dalla 4:

$$a = \sqrt{\frac{9}{2} \frac{\eta v_0}{\rho g}}$$

Posso ora risolvere per la carica q :

$$q = 6\pi\eta^{3/2}(v_1 - v_0) \sqrt{\frac{9}{2} \frac{v_0}{\rho g} \frac{1}{E}}$$

Poiché tutte le quantità sono note, e le due velocità di regime osservabili, posso calcolare il valore di q . Effettuando le misure su centinaia di gocce, Millikan osservò che tutti i valori di q erano multipli interi di un valore, che veniva ad assumere il ruolo di unità di carica fondamentale, pari alla carica dell'elettrone.

Il valore ottenuto nel 1909 non si scostava molto da quello moderno, pari a $-1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Articolo originale:

http://prola.aps.org/abstract/PRI/v32/i4/p349_1

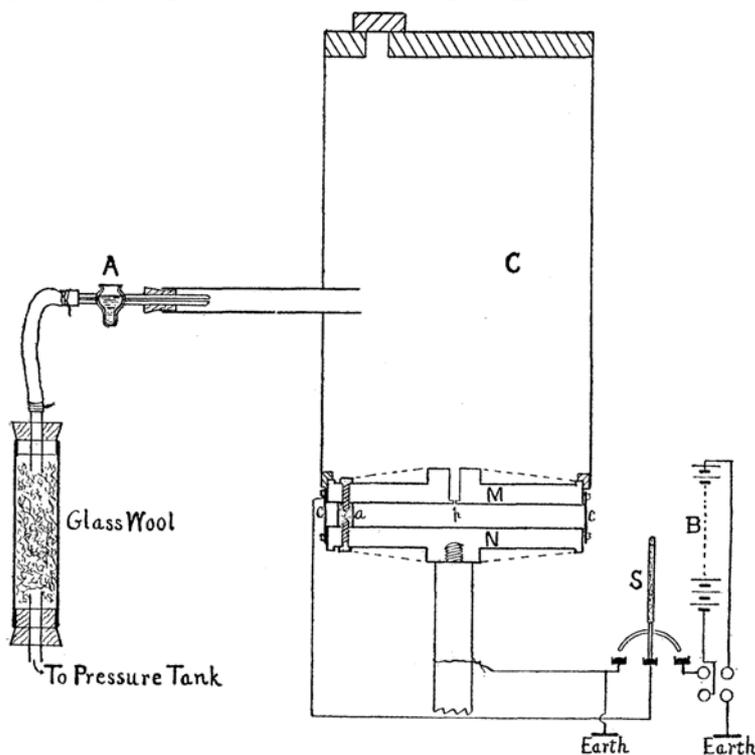


Fig. 1.

Figura 4, l'illustrazione originale dell'esperimento di Millikan

Bibliografia della lezione

Per 1.2 e 1.3: Enge-Wehr_Richrds, *Introduction to atomic physics*, Addison Wesley, cap. 2

Per 1.4: Richtmyer-Kennard-Cooper, *Introduction to modern Physics*, TMH, 1976.

Scheda sintetica sull'elettrone

Classificazione	
Particella elementare	
<ul style="list-style-type: none"> • Fermione <ul style="list-style-type: none"> ○ Leptone 	
Caratteristiche	
Carica elettrica:	$-1,602 \times 10^{-19}$ coulomb
Massa a riposo:	$9,109 \times 10^{-31}$ kg (0,511 MeV/c ²)
Raggio classico r :	$\frac{q_e^2}{4m_e c^2 \pi \epsilon_0}$ ossia 2.81794×10^{-15} m
Spin:	1/2
Carica di colore:	Nessuna
Interazioni:	Gravità forza elettromagnetica forza nucleare debole

Prime Appendici

The Electromagnetic Spectrum			
Wave	λ	f	E
AM radio	10^2 m	1 MHz	10^9 eV
FM, TV	1 m	100 MHz	10^7 eV
Radar	0.1 m	1000 MHz	10^6 eV
Microwaves	10^{-2} m	10^{10} Hz	10^5 eV
Infrared	10^{-5} m	10^{13} Hz	10^2 eV
Visible light	10^{-7} m	10^{15} Hz	1 eV
Ultraviolet	10^{-8} m	10^{16} Hz	10 eV
X rays	10^{-10} m	10^{18} Hz	1 keV
Gamma rays	10^{-13} m	10^{21} Hz	1 MeV

Simbolo	Nome della quantità	Nome	Unità	Unità fondamentali
I	Corrente	ampère (unità fondam. SI)	A	$A = W/V = C/s$
q	Carica elettrica	coulomb	C	$A \cdot s$
V	Differenza di potenziale	volt	V	$J/C = kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
B	Campo magnetico	tesla	T	$kg \cdot s^{-1} \cdot C^{-1} = kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
E	Campo elettrico			$V \cdot m^{-1} = N \cdot C^{-1}$