

VEDERE L'INVISIBILE

Lo sguardo dello scienziato dentro le cose.

Firenze, 18-19 aprile 2024

PRIMO CLASSIFICATO
SEZIONE TESINE TRIENNIO

La cerniera invisibile tra la vecchia e la nuova fisica

Studenti

Penso Chiara - Donnizzelli Simone - Vada Jacopo - Zelinskaya Diana - Scalet Edoardo

Classi 4 ESA – 5 E - 5 ESA

Istituto di Istruzione Superiore

Liceo scientifico Alfredo Oriani - Ravenna (RA)

Docente Coordinatore

Mazzola Lucia

La ricerca è coerente con il titolo del concorso. Gli studenti hanno misurato il rapporto tra carica e massa dell'elettrone realizzando con cura un esperimento complesso ispirato alla misura effettuata da J.J. Thomson a fine '800. Non marginale, ma indice di comprensione approfondita, l'introduzione storica, chiara ed esauriente, che ripercorre i passi della ricerca sperimentale e teorica di Thomson. L'esperimento svolto è descritto con rigore metodologico; il risultato è compatibile con il valore di e/m oggi accettato.

La cerniera invisibile tra la vecchia e la nuova fisica

RELAZIONE DEL DOCENTE REFERENTE

Dopo molti anni di assenza, ho deciso di proporre ad alcuni miei studenti di prendere in considerazione la possibilità di partecipare a quest'ultima edizione del convegno "ScienzaAFirenze".

Abbiamo creato un gruppo di otto studenti, di cui quattro di quinta e quattro di quarta anche se solo cinque risultano ufficialmente iscritti.

Il tema del convegno "Vedere l'invisibile" ha entusiasmato tutti, me per prima.

I ragazzi delle due classi sin da subito si sono dimostrati interessati e volenterosi a collaborare insieme, affiancati dal mio aiuto e da quello del tecnico di laboratorio.

Ma cosa "volevamo" vedere? Cosa "potevamo" vedere?

Per vedere l'invisibile occorre prima "immaginare" e mi è piaciuto far riflettere i ragazzi attraverso la lettura di un paragrafo tratto da "La fisica di Feynman" dal titolo "L'immaginazione scientifica".

Come affermava Feynman:

"...Si deve avere l'immaginazione di pensare a qualcosa che non è mai stato visto prima e di cui mai si è mai sentito parlare. Nello stesso tempo i pensieri sono per così dire costretti in una camicia di forza, limitati dalle condizioni che derivano dalla conoscenza di come la natura realmente è...".

Come docente ho deciso di accogliere e approfondire la curiosità degli studenti verso la scoperta dell'elettrone, grazie al celebre esperimento di J.J.Thomson del 1897, in cui riuscì a misurare il rapporto della carica e la massa delle particelle costituenti i raggi catodici.

Come ripetere l'esperimento? Certo avevamo il tubo a fascio filiforme e le bobine di Helmholtz, ma l'intero apparato si trovava esposto all'interno di una vetrina, proprio di fronte al portone di ingresso della nostra scuola, con la scritta "guasto".

L'insistenza e l'ostinazione dei ragazzi ha convinto il tecnico di laboratorio a riesumare il dispositivo e a metterlo a disposizione degli studenti e, anche se non è stato facile ripristinarne la funzionalità, alla fine ce l'ha fatta.

Non dimenticherò mai la felicità dei ragazzi quando hanno avuto la possibilità non solo di "visualizzare" il moto di un fascio di elettroni e di vedere dal vivo immagini che avevano visto solo sui libri o in rete, ma la possibilità concreta di misurare il rapporto tra la carica e la massa dell'elettrone, misurando cioè qualcosa di invisibile.

I ragazzi di quarta hanno voluto saperne di più e, grazie all'aiuto degli studenti di quinta, si sono addentrati in una parte del programma che non hanno ancora trattato spinti dalla curiosità, dall'entusiasmo e dalla voglia di conoscere.

Non è stato facile raccogliere le misure. Il fascio era molto debole e per visualizzarlo era necessario

oscurare completamente il laboratorio. Non appena si visualizzava il diametro voluto i ragazzi prendevano le misure di tensione e di corrente illuminando gli strumenti con i loro telefonini.

Nonostante le difficoltà abbiamo condotto molte misure mediante le quali siamo arrivati a calcolare, con un'approssimazione che noi riteniamo buona, il rapporto tra carica e massa dell'elettrone, ed è stato bello visualizzare fasci invisibili di elettroni.

La cerniera invisibile tra la vecchia e la nuova fisica

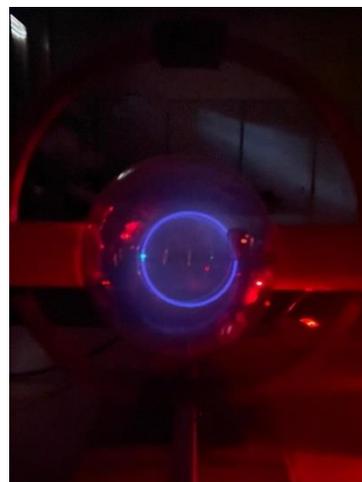
INDICE

<i>INTRODUZIONE</i>	<i>1</i>
<i>CENNI STORICI</i>	<i>2</i>
<i>ESPERIMENTO DI THOMSON</i>	<i>5</i>
<i>IL NOSTRO ESPERIMENTO</i>	<i>6</i>
<i>APPARATO SPERIMENTALE</i>	<i>6</i>
<i>BOBINE DI HELMHOLTZ (dettagli)</i>	<i>7</i>
<i>DEDUZIONE DELLA FORMULA CHE FORNISCE e/m</i>	<i>8</i>
<i>RILEVAMENTO ED ELABORAZIONE DATI</i>	<i>9</i>
<i>DISCUSSIONE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI</i>	<i>14</i>
<i>BIBLIOGRAFIA</i>	<i>15</i>

INTRODUZIONE

L'idea di svolgere questa tesina è nata dalla curiosità che negli anni noi studenti abbiamo rivolto ad uno strano strumento, complesso, esposto nelle vetrine della nostra scuola: il tubo a fascio filiforme e le bobine di Helmholtz. Il nostro interesse è stato subito arrestato da una targhetta con scritto "guasto". Tuttavia, il nostro animo è stato risollevato dall'arrivo di un nuovo tecnico che ha riconosciuto le potenzialità del dispositivo e ci ha aiutato a trasformare quello che era un "oggetto da esposizione", in uno strumento vincente.

Frequentando il Liceo Scientifico, la matematica e la fisica sono all'ordine del giorno, eppure sono discipline che non ci hanno insegnato solamente ad affrontare la realtà in maniera pragmatica e razionale, ma ci hanno fornito i mezzi necessari per "maneggiare" queste conoscenze e andare oltre... Non a caso, Thomson ha superato i limiti del reale cercando di addentrarsi in una dimensione "invisibile" in cui poter esaminare i "corpuscoli" e scoprire la loro natura. Infatti, come ricorda il celebre Faraday "la bellezza della scienza è che può rivelare ciò che è invisibile agli occhi umani": questa è la frase che abbiamo scelto per descrivere al meglio il nostro percorso poiché, di fronte all'iniziale scetticismo, ci siamo lasciati trasportare dallo stupore alla vista della scia fluorescente lasciata da particelle invisibili, impercettibili, dagli elettroni.



CENNI STORICI



Tra il febbraio e l'ottobre del 1897 Joseph John Thomson comunicava pubblicamente, a più riprese, i risultati delle sue ultime ricerche sui raggi catodici: questi erano costituiti da particelle materiali subatomiche di carica negativa, da lui chiamate «corpuscoli». Tali corpuscoli vennero successivamente identificati col nome di elettroni e J. J. Thomson, che proprio per queste ricerche fu insignito del premio Nobel nel 1906, passò alla storia come il loro scopritore.

Oggi la parola «elettrone» denota una particella subatomica dotata di un'unità di carica negativa (pari a circa $1,6 \cdot 10^{-19}$ coulomb), avente una massa circa 2000 volte più piccola della massa dell'atomo di idrogeno e uno spin avente un momento angolare intrinseco pari a $1/2$. La scoperta dell'elettrone è un processo che si è protratto per almeno sessant'anni: dai lavori pionieristici dell'ultimo decennio del 1800 fino alla formulazione consistente dell'elettrodinamica quantistica nei primi anni cinquanta. In che senso allora si parla di «scoperta dell'elettrone» e la si colloca proprio nel 1897? Questa domanda appare tanto più problematica se si pensa che, già molto prima dei

lavori di Thomson, si faceva riferimento alle nozioni di «ione», «atomo», «molecola», «particella», «corpuscolo» di elettricità, che alla fine confluirono all'interno dell'unica nozione di elettrone.

Si suole far risalire il concetto di “quantità definita di elettricità” a G. J. Stoney, il quale - durante il congresso annuale della British Association for the Advancement of Science svoltosi a Belfast nel 1874 - rifacendosi esplicitamente ai lavori di Michael Faraday dei primi anni del 1840, concludeva che *“la Natura, ci fornisce nel fenomeno dell'elettrolisi, l'evidenza di una singola definita quantità di elettricità che è indipendente dai particolari corpi sui quali agisce”*. Sullo stesso argomento tornava H. von Helmholtz con maggiore autorevolezza e, nella sua famosa Faraday Lecture del 1881 asseriva che *“il risultato più stupefacente della legge dell'elettrolisi di Faraday consiste nel fatto che, se si accetta che le sostanze sono composte di atomi, anche l'elettricità deve essere divisa in definite porzioni elementari che si comportano come atomi di elettricità”*.

Ma sarebbe errato concludere che Stoney e von Helmholtz siano stati i primi a prendere in considerazione l'idea di una struttura discreta dell'elettricità da cui sarebbe derivata la nozione di elettrone. Entrambi gli autori, infatti, si rifacevano agli studi di Faraday sull'elettrolisi e von Helmholtz aveva più volte fatto riferimento alla teoria dei fenomeni elettrici e magnetici basata sulla nozione di carica elettrica discreta e di corrente elettrica come moto di cariche, elaborata da Weber a partire dal 1846.

Mentre Faraday era fautore di una interazione elettromagnetica che si trasmetteva in un continuo, la teoria di Weber esprimeva le interazioni tra cariche elettriche discrete sotto forma di una forza fondamentale agente a distanza.

Se quindi siamo portati a concludere che Faraday e Weber furono gli antesignani della nozione di elettrone, è necessario sottolineare la profonda diversità delle loro rispettive concezioni, diversità che, grazie alla grande influenza che le idee di Faraday e Weber esercitarono rispettivamente in Gran Bretagna e in Germania, si sostanziò nella contrapposizione tra elettrodinamica britannica ed elettrodinamica tedesca. Questa contrapposizione si basava su due diversi approcci all'elettrodinamica, quello tedesco basato sull'azione a distanza (istantanea o ritardata) e quello britannico in cui l'idea di azione a distanza veniva sostituita da quella di azione contigua, mediata da un etere immateriale (o, come diremmo oggi, dal campo).

In questo contesto i due settori da cui arrivarono le maggiori sollecitazioni furono quello relativo alla scoperta di diverse forme di “radiazione” e quello relativo alle ricerche spettroscopiche, grazie all'opera di J. J. Thomson, W. Kaufmann, J. E. Wiechert e P. Zeeman. Già Faraday si era accorto che quando una scarica elettrica attraversava un gas rarefatto si producevano nuovi fenomeni. I limiti della tecnologia sperimentale a sua disposizione, in particolare

la mancanza di dispositivi che producessero un buon livello di vuoto, gli avevano però impedito di compiere indagini soddisfacenti in questo settore.

Molti esperimenti relativi all'interazione tra elettricità e materia erano stati condotti osservando i fenomeni associati al passaggio della corrente elettrica nei gas rarefatti. Il gas veniva racchiuso in un tubo trasparente, alle cui estremità erano fissate due placche metalliche, chiamate elettrodi. Una placca (catodo) era collegata al polo negativo di un generatore e l'altra (anodo) al polo positivo. Già prima del 1850 era noto il fatto che il flusso di elettricità in un gas abbastanza rarefatto provocava emissione di luce.

Ulteriori osservazioni sulla scarica nei gas rarefatti furono rese possibili grazie all'invenzione di pompe capaci di migliorare la qualità del vuoto e alla creazione di tubi di vetro di opportuna forma, chiamati tubi di Crookes dal nome del fisico inglese W. Crookes.

I lavori pionieristici di J. Plücker e W. Hittorf, sviluppati in seguito da E. Goldstein, C. Varley e W. Crookes, determinarono chiaramente alcune delle proprietà fondamentali di quelli che Goldstein nel 1879 chiamava "**raggi catodici**": un "quarto stato della materia" come scriveva Crookes nel 1880.

Non era chiaro se i raggi catodici fossero un fenomeno di tipo ondulatorio, e quindi riconducibile a qualche processo avente luogo nell'etere, o se invece la loro natura fosse corpuscolare.

Quello che invece sarebbe apparso via via più chiaro, tra il 1880 e il 1890, era la sempre maggiore contiguità tra il lavoro dei fisici e quello dei chimici. Scriveva Thomson nel 1894: "*Penso che gli esperimenti precedenti [sulle scariche di elettricità attraverso i gas, N.d.A.] siano sufficienti a mostrare le strette analogie esistenti tra i fenomeni della combinazione chimica e quelli della scarica elettrica, e fanno sperare che lo studio del passaggio dell'elettricità attraverso i gas possa essere il mezzo per far luce sul meccanismo della combinazione chimica. **Il lavoro dei chimici e dei fisici può essere paragonato a quello di due gruppi di ingegneri che scavano una galleria da due estremi opposti. Non si sono ancora incontrati, ma sono arrivati così vicini da poter sentire il rumore degli avanzamenti gli uni degli altri***".

Una stretta relazione tra chimica e fisica emergeva anche dalle ricerche spettroscopiche a partire dalla fine degli anni cinquanta. L'ipotesi che la luce emessa o assorbita secondo una precisa successione di lunghezze d'onda, tipica di ogni materiale, dovesse in qualche modo essere connessa con l'ipotesi di una struttura atomica della materia venne via via affermandosi nella seconda metà dell'Ottocento. Grazie alla costante crescita delle tecnologie ottiche, la grande varietà degli spettri via via osservati sembrava un sempre più chiaro indizio a favore non solo della struttura atomica della materia, ma anche del fatto che l'atomo non fosse l'oggetto indivisibile che il suo nome stava a significare.

Era noto che se una particella carica in moto su una traiettoria rettilinea, per esempio lungo l'asse x , passava attraverso un campo magnetico uniforme diretto lungo l'asse y , la traiettoria subiva una deflessione nella direzione dell'asse z , di verso positivo o negativo a seconda del segno della carica e del verso del campo. Ripetendo la stessa esperienza con un campo elettrostatico diretto lungo l'asse z , la traiettoria subiva una deflessione nella direzione z , di verso positivo o negativo a seconda del segno della carica e del verso del campo.

In questo senso, la proprietà dei raggi catodici di essere deflessi da parte di un campo magnetico sembrava essere una chiara indicazione a sostegno della teoria particellare e aveva portato Varley a ipotizzare che le particelle dei raggi catodici trasportassero una carica elettrica negativa. Su questa congettura era tornato nel 1879 W. Crookes interpretando i raggi catodici come molecole del gas residuo nei tubi, che acquistavano carica negativa nei loro urti con il catodo, venendo poi da questo respinte ad alta velocità. Ma nel 1883 Hertz, mostrando che i raggi catodici non venivano deflessi da un campo elettrostatico, metteva in crisi l'interpretazione particellare. D'altra parte, Hertz nel 1891 realizzava esperimenti, ripresi e sviluppati da Lenard nel 1893 e nel 1894, nei quali i raggi catodici attraversavano sottili lamine d'oro: l'attraversamento di materia solida da parte dei raggi catodici sembrava un'ulteriore riprova che questi non fossero altro che onde di piccola lunghezza d'onda.

Nonostante che gli esperimenti di Hertz e Lenard avessero il sapore di esperimenti cruciali in favore della natura ondulatoria dei raggi, le ricerche aventi come riferimento il modello particellare continuarono. Tra il 1883 e il 1895 la fenomenologia della scarica attraverso i gas fu sistematicamente analizzata e ulteriori varianti delle congetture

di Varley e di Crookes vennero prese via via in considerazione. Una prima, nuova evidenza indiretta in favore dell'interpretazione particellare venne dalle misure di J. J. Thomson nel 1894 sulla velocità dei raggi catodici. Un'onda nell'etere avrebbe dovuto propagarsi alla velocità della luce, mentre la velocità dei raggi catodici risultava sempre inferiore.

Fu però un giovane fisico francese, Jean Perrin a eseguire i primi esperimenti che segnarono la vera svolta a favore dell'interpretazione particellare. Perrin, nell'introduzione al suo articolo si rifaceva esplicitamente alla congettura di Crookes e riportava i risultati di Hertz e Lenard giudicandoli non conclusivi. I "proiettili catodici", affermava Perrin, possono differire dalle molecole per dimensione e velocità in modo da poter attraversare una parete impermeabile alle molecole. Quindi prima di rifiutare la teoria dell'emissione particellare bisognava assicurarsi che i raggi catodici non fossero elettrizzati. L'apparato sperimentale da lui approntato evidenziava invece che i raggi catodici erano portatori di carica negativa.

Se le esperienze di Thomson e Perrin aprivano un nuovo capitolo della controversia sulla natura dei raggi catodici, negli stessi anni due nuove scoperte dovevano rivoluzionare la fisica delle radiazioni, aumentando l'impressione dell'inadeguatezza dei quadri teorici a disposizione. Verso la fine del 1895 veniva pubblicato l'articolo di *Röntgen* sulla scoperta dei raggi X, e nei primi mesi del 1896 Becquerel osservava per la prima volta la radiazione emessa da un sale di uranio.

Fu proprio in questo contesto che avvenne la scoperta dell'elettrone. La scoperta dei raggi X stimolò notevolmente il lavoro teorico e sperimentale intorno ai fenomeni legati alle scariche nei gas, su cui Thomson lavorava da più di dieci anni. In particolare, la capacità dei raggi X di ionizzare i gas permise a Thomson, tra il 1896 e i primi mesi del 1897 di chiarire i rapporti tra radiazione e conducibilità nei gas.

Dopo un primo lavoro comunicato l'8 febbraio del 1897, e un secondo, discusso il 30 aprile, il suo lavoro finale, scritto in agosto e pubblicato a ottobre dello stesso anno, conteneva la sintesi sperimentale e teorica che è giustamente nota come la "scoperta dell'elettrone". In questo articolo Thomson, dopo aver sintetizzato la controversia sui raggi catodici, dimostrava puntualmente i limiti dell'esperimento di Hertz. Inoltre, dal fatto che il rapporto e/m rimanesse costante qualunque fosse il gas attraversato dalla scarica, Thomson concludeva che *"la maniera più semplice e diretta per spiegare questi fatti si trova nella visione della costituzione degli elementi chimici accettata da molti chimici, e cioè che gli atomi dei diversi elementi chimici sono aggregati differenti di atomi dello stesso genere"*.

Nello stesso anno Wiechert e Kaufmann trovarono, con esperienze simili a quelle di Thomson, uno stesso valore per il rapporto e/m . Ma, per ragioni diverse, entrambi non arrivarono immediatamente a interpretare le nuove particelle come costituenti l'atomo.

E' questo il caso di scoperta simultanea il cui merito va a chi è riuscito a trovare l'interpretazione vincente del fenomeno osservato e Thomson ha saputo "vedere l'invisibile".

Anche Zeeman e Lorentz avevano ricavato il valore di e/m . Ma Zeeman e Lorentz non fornirono nessuna interpretazione del valore trovato. Oltre a Lorentz, anche Joseph Larmor aveva esposto tra il 1894 e il 1897, un primo abbozzo di una teoria generale dei fenomeni elettrici e magnetici basata su cariche elettriche discrete associate agli atomi materiali. Molti erano i punti di contatto tra queste teorie, anche se Larmor, a differenza di Lorentz, vedeva gli "elettroni" (un termine che utilizza già nel 1894) come particolari concentrazioni di energia nell'etere la cui massa apparente era tutta di origine elettromagnetica. Sia la teoria di Lorentz sia quella di Larmor erano rivolte, in quegli anni, prima di tutto a chiarire i rapporti tra la teoria elettromagnetica di Maxwell-Hertz e l'esistenza di portatori di carica elettrica che si muovevano nell'etere. L'idea di una materia contenente cariche elettriche era essenzialmente funzionale alla spiegazione delle interazioni tra materia e onde elettromagnetiche, mentre il problema della struttura dell'atomo, che in breve sarebbe diventato uno dei temi centrali, veniva relegato in secondo piano.

Al contrario, Thomson, perseguendo un programma di riunificazione della chimica alla fisica, era particolarmente interessato agli atomi e alla loro natura chimica e considerava il "corpuscolo elettrico" dotato di massa come l'elemento universale costitutivo degli atomi chimici.

La caparbia difesa di Thomson del termine «corpuscolo» - da lui usato anche nel 1906 nella sua comunicazione per il conferimento del premio Nobel - contro il termine «elettrone» è, paradossalmente, la conferma della sua scoperta sperimentale, la difesa cioè dell'idea di aver scoperto la particella fondamentale costituente l'atomo e non «semplicemente» l'elettrone immateriale di Larmor.

ESPERIMENTO DI THOMSON

In un tubo a vuoto, i raggi provenienti dal catodo C attraversavano una fenditura A praticata nell'anodo; dopo essere passati per una seconda fenditura B, che serviva da collimatore, viaggiavano (nella direzione x) tra due placche parallele di alluminio M ed N di lunghezza l.

I raggi giungevano, infine, all'estremità del tubo e producevano una ben definita macchiolina fosforescente la cui posizione veniva rilevata su una scala millimetrata. Connettendo le placche M e N con i terminali di una batteria, si produceva un campo elettrico **E** in direzione z.

A seconda del tipo di esperienze si poteva avere, nella stessa regione delle placche, un campo magnetico **B** in direzione y. **E** e **B** provocavano deflessioni dei raggi nella direzione z di segno opposto. Indicata con **v** la velocità dei raggi, il tempo di attraversamento della regione di lunghezza l dove si potevano avere le deflessioni era l/v.

Posto, inizialmente, $E \neq 0$ e $B = 0$, la velocità v_E nella direzione di E era data da $v_E = \frac{eEl}{mv}$, e l'angolo θ di deflessione dei raggi quando lasciavano la regione in cui agiva il campo era

$$\theta = \frac{v_E}{v} = \frac{eEl}{mv^2}.$$

Supposto, invece, $B \neq 0$ e $E = 0$, la velocità v_B , lungo z era data da $v_B = \frac{eBl}{m}$ e l'angolo ϕ di deflessione dei raggi quando lasciavano la regione in cui agiva il campo era

$$\phi = \frac{v_B}{v} = \frac{eBl}{mv}. \quad \text{Si otteneva quindi: } v = \frac{\phi}{\theta} \cdot \frac{E}{B} \quad \text{e} \quad \frac{e}{m} = \frac{\phi^2 E}{B^2 l \theta}$$

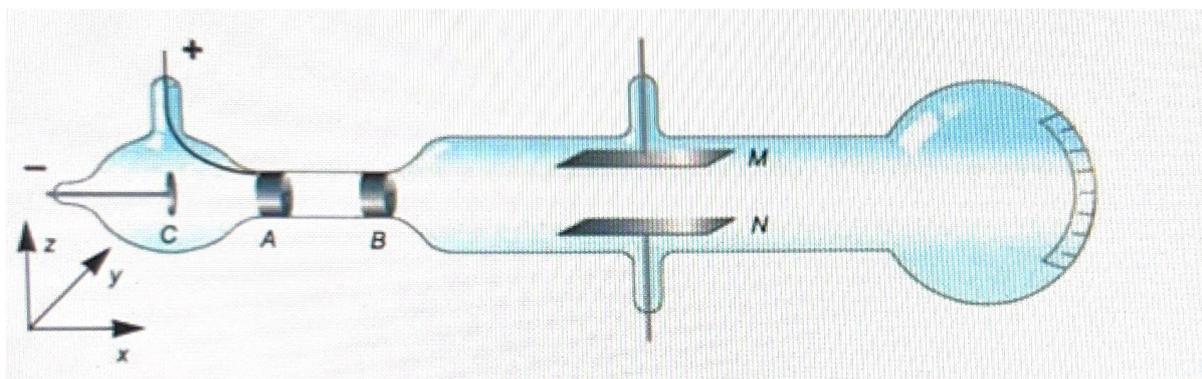
Fissato E si poteva far variare B in modo da annullare la deflessione totale, nel qual caso $\phi = \theta$ e:

$$v = \frac{E}{B} \quad \text{e} \quad \frac{m}{e} = \frac{B^2 l}{\theta E}$$

Noti pertanto B ed E, dalla misura di θ si ricava $\frac{e}{m}$.

Thomson determinò così il rapporto carica/massa della particella responsabile dei raggi catodici che, misurata con i moderni acceleratori, corrisponde a $1,758820174 \cdot 10^{11} C/kg$.

Con questa prova sperimentale e con altre (utilizzando i gas), Thomson poté dimostrare, in maniera incontrovertibile, che i raggi catodici non erano composti da frammenti ionici di atomi, ma da particelle universali contenute da tutti gli elementi, alle quali venne dato il nome di elettroni (proposto nel 1874 dall'irlandese G.J. Stoney).



Analogamente a come fece Thomson, anche noi abbiamo voluto provare a ricavare il rapporto carica/massa, quanto più vicino possibile al suo valore corretto.

IL NOSTRO ESPERIMENTO

APPARATO SPERIMENTALE

- 2 alimentatori marca "Phywe 7532" di portata 250v e modello Bremi BRS 33
- Alimentatore Bremi BRS 33 (per alimentare le bobine di Helmholtz e generare il campo magnetico)
- Alimentatore "Phywe 7532" di portata 250 V (in grado di fornire la tensione di riscaldamento e anche la tensione anodica)
- 2 multimetri digitali marca: Amprobe, modello: AM-520-eur, portata:600 V collegati agli alimentatori; un multimetro è in modalità voltmetro ed ha sensibilità pari a 0,1 V mentre l'altro è in modalità amperometro ed ha sensibilità 0,001 A
- Tubo elettronico modello Phywe 6959
- Cavi per i collegamenti

Questo apparato è costituito da due parti: un tubo a fascio filiforme e due bobine di Helmholtz per la produzione di un campo magnetico omogeneo.

Il tubo è costituito da una sfera di vetro nel cui interno è contenuto un cannone elettronico ed è riempito di gas raro a bassa pressione.

Le bobine di Helmholtz sono costituite ognuna da 154 spire, avvolte su due anelli di raggio 20 centimetri e posti parallelamente, alla distanza di 20 centimetri.

Il tubo a fascio filiforme può essere utilizzato unitamente ad una coppia di bobine di Helmholtz per esaminare la deviazione subita dai raggi elettronici immersi in campi magnetici omogenei. Abbiamo utilizzato questo apparato sperimentale per la determinazione della carica specifica e/m degli elettroni, quando la loro traiettoria, inizialmente rettilinea, viene deviata nel campo magnetico omogeneo prodotto dalla coppia di bobine di Helmholtz.

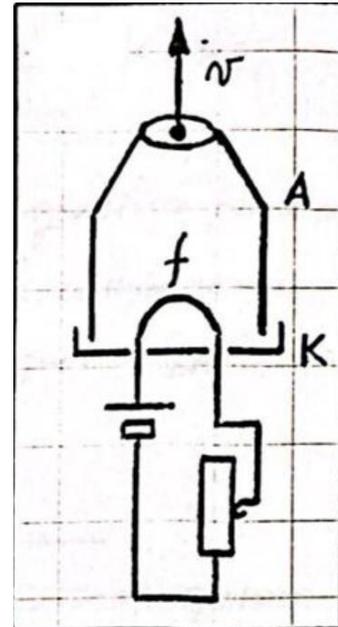
Il tubo a fascio filiforme contiene al suo interno:

- Un catodo (K) che emette elettroni per effetto termoelettronico, essendo riscaldato da apposita resistenza (f).
- Un anodo (A) necessario a captare gli elettroni emessi da catodo
- Una griglia che serve ad “amplificare” il segnale

Dal catodo, riscaldato dal filamento, fuoriescono elettroni che vengono attirati dall’anodo ed accelerati dalla differenza di potenziale V_{A-K} esistente fra catodo e anodo.

L’anodo, a forma di “camino”, permette l’uscita degli elettroni secondo la direzione degli assi del camino.

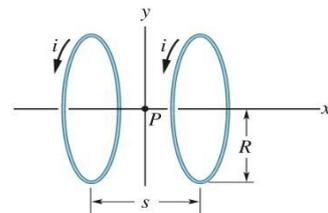
Il pennello elettronico entra così nell’ampolla in cui è presente un gas raro a bassa pressione. Gli elettroni nel loro tragitto vengono in collisione con le molecole del gas ionizzandole (per urto), cosicché la traiettoria del fascio si rende visibile a causa della luminosità prodotta dalla ricombinazione degli atomi ionizzati.



L’ampolla di vetro è posta tra le bobine di Helmholtz.

BOBINE DI HELMHOLTZ (dettagli)

Si tratta di due bobine aventi lo stesso numero di spire, disposte coassialmente a una distanza pari al loro raggio, come rappresentato in figura. Le bobine sono percorse dalla stessa corrente i . Tali bobine generano un campo quasi uniforme in un intorno di P.



Introduciamo un sistema di riferimento in cui l’asse x coincida con l’asse delle due bobine, abbia origine in P e sia diretto verso destra. Il campo B (in un punto qualsiasi dell’asse) risulta dalla sovrapposizione dei campi B_1 e B_2 generati dalle singole bobine.

In un punto A dell’asse, di coordinata x , i campi B_1 e B_2 risultano paralleli e concordi con l’asse x , visto il verso delle correnti nelle bobine

$$B_1 = \frac{\mu_0 i R^2 N}{2 \sqrt{\left[R^2 + \left(\frac{R}{2} + x \right)^2 \right]^3}} \quad B_2 = \frac{\mu_0 i R^2 N}{2 \sqrt{\left[R^2 + \left(\frac{R}{2} - x \right)^2 \right]^3}}$$

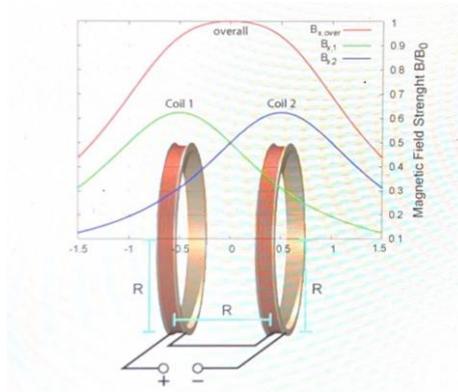
e quindi il campo complessivo B risulta parallelo e concorde con l’asse x e di intensità

$$B(x) = B_1 + B_2 = \frac{N\mu_0 I}{2R} \left(\left[1 + \left(\frac{1}{2} + \frac{x}{R} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} + \left[1 + \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{R} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} \right)$$

Nel punto P di coordinata $x = 0$ si ha

$$B(0) = \frac{N\mu_0 I}{R\left(\frac{5}{4}\right)^2} \quad (1)$$

Come si può vedere dal grafico, tali bobine generano un campo quasi uniforme in un intorno di P.



DEDUZIONE DELLA FORMULA CHE FORNISCE e/m

Occorre rilevare che quando la traiettoria descritta da una carica è circolare (a causa di un campo magnetico B), la forza di Lorentz $\vec{F}_L = q \vec{v} \times \vec{B}$ deve uguagliare la forza centripeta, ossia:

$$q v B = m \frac{v^2}{r} \quad (2)$$

Dalla (2) si ricava
$$\frac{q}{m} = \frac{v}{r B} \quad (3)$$

ma r e B sono misurabili sperimentalmente, mentre v non lo è (perlomeno non con questa esperienza).

Per misurare e/m occorre un'altra equazione. Possiamo utilizzare il sempre valido Principio di conservazione dell'energia. Ricordiamo che le energie in gioco sono:

Energia elettrostatica = qV ; Energia cinetica = $\frac{1}{2} m v^2$ dove:

- V = differenza di potenziale (=Tensione) anodica V_{A-K}
- m = massa dell'elettrone
- v = velocità dell'elettrone
- $q=e$ = carica dell'elettrone.

L'elettrone, nel tragitto catodo (K) e anodo (A), acquisisce energia cinetica a spese del campo elettrico esistente tra catodo e anodo. Deve quindi essere:

$$q V = \frac{1}{2} m v^2 \quad (4)$$

Combinando la (3) e la (4) si ottiene:

$$\frac{q}{m} = \frac{2 V}{r^2 B^2} \quad (5)$$

Sostituendo la (1) nella (5) e indicando con c la quantità:

$$c = \frac{N \mu_0}{R \left(\frac{5}{4}\right)^{\frac{3}{2}}} = \frac{154 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2}}{0,20 \text{ m} \cdot \left(\frac{5}{4}\right)^{\frac{3}{2}}} = 6,923657 \cdot 10^{-4} \frac{T}{A}$$

si ottiene
$$\frac{q}{m} = \frac{2V}{c^2 I^2 r^2} \quad (6)$$

RILEVAMENTO ED ELABORAZIONE DATI

Abbiamo eseguito misure dirette di tensione e corrente e ricavato indirettamente il valore di e/m . Abbiamo associato come errore alla tensione e alla corrente, misurate con i multimetri, l'ultimo digit non nullo. Per quanto riguarda il raggio dell'orbita descritta dagli elettroni abbiamo sfruttato il dispositivo di misura incorporato nel tubo. Il costruttore assicura che sul raggio abbiamo un errore percentuale inferiore all'1% in quanto, quando gli elettroni, muovendosi di moto circolare, urtano una delle astine verticali che delimitano il diametro del fascio e che sono inserite all'interno del tubo, avviene emissione di luce (essendo le astine ricoperte di materiale fluorescente).

Abbiamo eseguito dieci misure per ogni valore del raggio che era possibile ottenere, cioè 5 cm, 4 cm, 3 cm e 2 cm e infine abbiamo fatto un'ultima raccolta di misure mantenendo la tensione costante a 250 Volt. Si allegano le tabelle di raccolta dati.

Con Excel abbiamo elaborato i grafici relativi alle misure eseguite.

Per ogni misura eseguita abbiamo espresso I^2 in funzione di V .

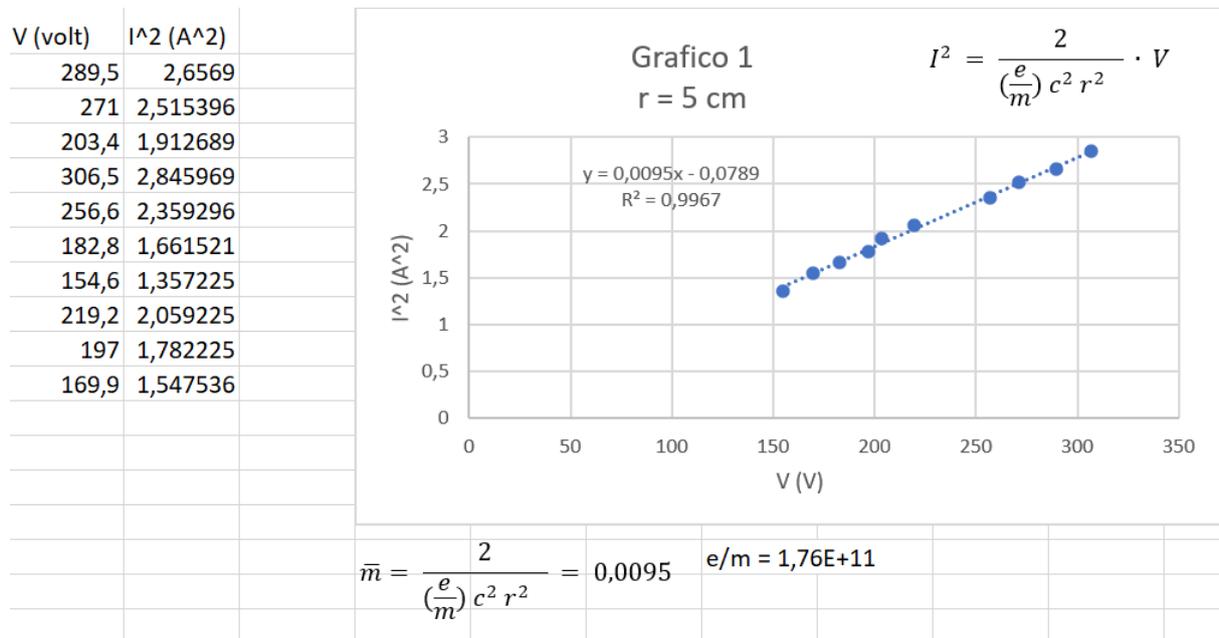
$$I^2 = \frac{2}{\left(\frac{e}{m}\right) c^2 r^2} \cdot V$$

Ottenendo le equazioni delle rette di regressione lineare indicate nelle tabelle. Dai valori dei coefficienti angolari, che abbiamo indicato con \bar{m} , abbiamo ricavato successivamente i valori di $\frac{e}{m}$.

Seguono le tabelle di raccolta dati e i grafici:

Raggio 5 cm

V (volt)	\mathcal{E}_v	I (A)	\mathcal{E}_i	r (m)	\mathcal{E}_r	e/m (C/kg)	$\mathcal{E}(e/m)$	$\Delta(e/m)$
289,5	0,000345	1,630	0,000613	0,0500		0,01	1,82E+11	0,021572
271,0	0,000369	1,586	0,000631	0,0500		0,01	1,80E+11	0,021630
203,4	0,000492	1,383	0,000723	0,0500		0,01	1,77E+11	0,021938
306,5	0,000326	1,687	0,000593	0,0500		0,01	1,80E+11	0,021512
256,6	0,000390	1,536	0,000651	0,0500		0,01	1,82E+11	0,021692
182,8	0,000547	1,289	0,000776	0,0500		0,01	1,84E+11	0,022099
154,6	0,000647	1,165	0,000858	0,0500		0,01	1,90E+11	0,022364
219,2	0,000456	1,435	0,000697	0,0500		0,01	1,78E+11	0,021850
197,0	0,000508	1,335	0,000749	0,0500		0,01	1,84E+11	0,022006
169,9	0,000589	1,244	0,000804	0,0500		0,01	1,83E+11	0,022196
					VALORE MEDIO		1,82E+11	
					MAX		1,90E+11	
					MIN		1,77E+11	
					SEMIDISPERSIONE		6,31E+09	
								$\langle e/m \rangle = (1,82 \pm 0,06)E+11$ C/kg



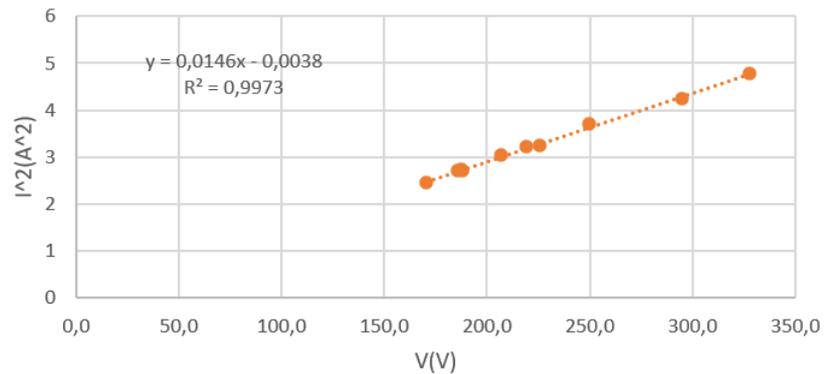
Raggio 4 cm

V (volt)	ϵ_v	I (A)	ϵ_i	r (m)	ϵ_r	e/m (C/kg)	$\epsilon(e/m)$	$\Delta(e/m)$	
187,2	0,000534	1,656	0,000604	0,0400		0,01	1,78E+11	0,021742	3,87E+09
206,9	0,000483	1,744	0,000573	0,0400		0,01	1,77E+11	0,021630	3,84E+09
327,8	0,000305	2,188	0,000457	0,0400		0,01	1,79E+11	0,021219	3,79E+09
249,9	0,0004	1,926	0,000519	0,0400		0,01	1,76E+11	0,021439	3,77E+09
170,4	0,000587	1,566	0,000639	0,0400		0,01	1,81E+11	0,021864	3,96E+09
219,2	0,000456	1,794	0,000557	0,0400		0,01	1,78E+11	0,021571	3,83E+09
187,9	0,000532	1,645	0,000608	0,0400		0,01	1,81E+11	0,021748	3,94E+09
225,7	0,000443	1,801	0,000555	0,0400		0,01	1,81E+11	0,021554	3,91E+09
185,5	0,000539	1,646	0,000608	0,0400		0,01	1,79E+11	0,021754	3,88E+09
295,1	0,000339	2,060	0,000485	0,0400		0,01	1,81E+11	0,021310	3,86E+09
					VALORE MEDIO		1,79E+11		
					MAX		1,81E+11		
					MIN		1,76E+11		
					SEMIDISPERSIONE		2,89E+09		<e/m> = (1,79 ± 0,03)E+11 (C/kg)

V (volt)	I ² (A ²)
187,2	2,742336
206,9	3,041536
327,8	4,787344
249,9	3,709476
170,4	2,452356
219,2	3,218436
187,9	2,706025
225,7	3,243601
185,5	2,709316
295,1	4,2436

Grafico 2
r = 4 cm

$$I^2 = \frac{2}{\left(\frac{e}{m}\right) c^2 r^2} \cdot V$$



$$\bar{m} = \frac{2}{\left(\frac{e}{m}\right) c^2 r^2} = 0,0146 \quad e/m = 1,79E+11$$

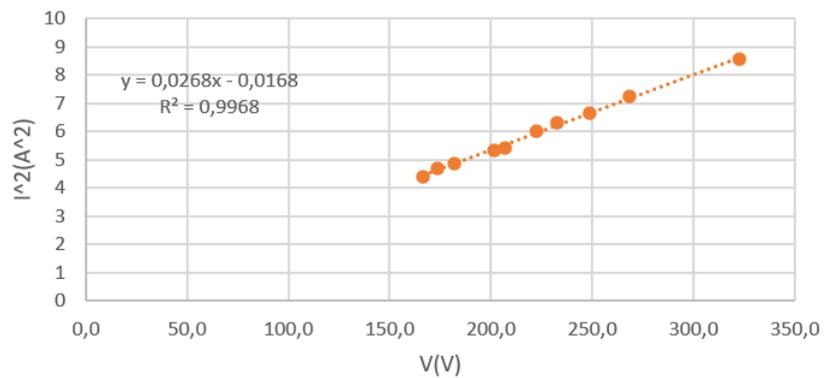
Raggio 3 cm

V (volt)	ϵ_v	I (A)	ϵ_i	r (m)	ϵ_r	e/m (C/kg)	$\epsilon(e/m)$	$\Delta(e/m)$
268,2	0,000373	2,691	0,000372	0,0300	0,01	1,72E+11	0,021116	3,63E+09
182,1	0,000549	2,208	0,000453	0,0300	0,01	1,73E+11	0,021455	3,71E+09
232,5	0,000430	2,516	0,000397	0,0300	0,01	1,70E+11	0,021225	3,61E+09
173,8	0,000575	2,166	0,000462	0,0300	0,01	1,72E+11	0,021499	3,69E+09
166,4	0,000601	2,094	0,000478	0,0300	0,01	1,76E+11	0,021556	3,79E+09
322,6	0,000310	2,925	0,000342	0,0300	0,01	1,75E+11	0,020994	3,67E+09
248,6	0,000402	2,578	0,000388	0,0300	0,01	1,73E+11	0,021178	3,67E+09
207,0	0,000483	2,330	0,000429	0,0300	0,01	1,77E+11	0,021341	3,77E+09
222,6	0,000449	2,452	0,000408	0,0300	0,01	1,72E+11	0,021265	3,65E+09
201,6	0,000496	2,308	0,000433	0,0300	0,01	1,75E+11	0,021363	3,75E+09
					VALORE MEDIO	1,73E+11		
					MAX	1,77E+11		
					MIN	1,70E+11		
					SEMIDISPERSIONE	3,25E+09		$\langle e/m \rangle = (1,73 \pm 0,03)E+11$ (C/kg)

V (volt)	I ² (A ²)
268,2	7,241481
182,1	4,875264
232,5	6,330256
173,8	4,691556
166,4	4,384836
322,6	8,555625
248,6	6,646084
207,0	5,4289
222,6	6,012304
201,6	5,326864

Grafico 3
r = 3 cm

$$I^2 = \frac{2}{\left(\frac{e}{m}\right) c^2 r^2} \cdot V$$

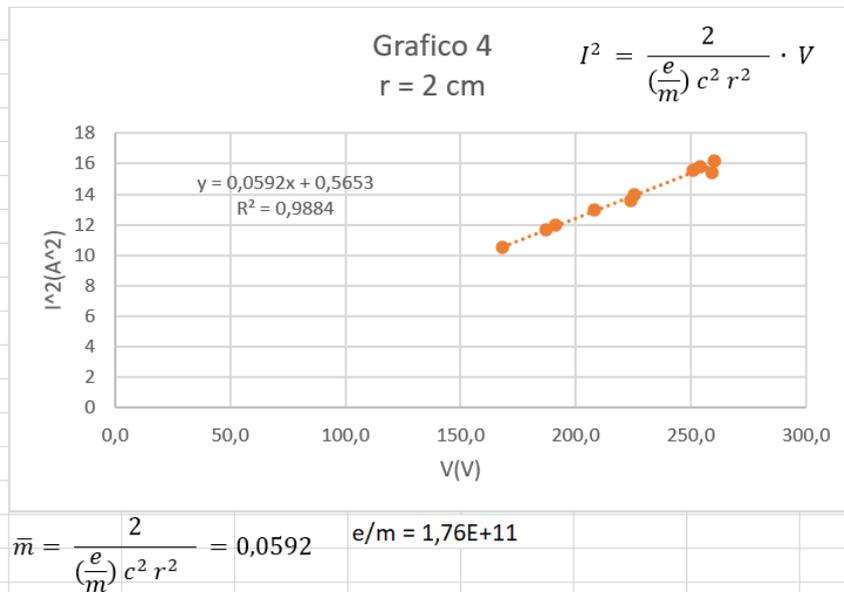


$$\bar{m} = \frac{2}{\left(\frac{e}{m}\right) c^2 r^2} = 0,0268 \quad e/m = 1,73E+11$$

Raggio 2 cm

V (volt)	ϵ_v	I (A)	ϵ_i	r (m)	ϵ_r	e/m (C/kg)	$\epsilon(e/m)$	$\Delta(e/m)$
259,3	0,000386	3,930	0,000254	0,0200	0,01	1,75E+11	0,020895	3,66E+09
207,8	0,000481	3,599	0,000278	0,0200	0,01	1,67E+11	0,021037	3,52E+09
260,2	0,000384	4,025	0,000248	0,0200	0,01	1,68E+11	0,020881	3,50E+09
187,3	0,000534	3,410	0,000293	0,0200	0,01	1,68E+11	0,02112	3,55E+09
225,6	0,000443	3,739	0,000267	0,0200	0,01	1,68E+11	0,020978	3,53E+09
250,7	0,000399	3,950	0,000253	0,0200	0,01	1,68E+11	0,020905	3,50E+09
191,4	0,000522	3,458	0,000289	0,0200	0,01	1,67E+11	0,021101	3,52E+09
168,4	0,000594	3,244	0,000308	0,0200	0,01	1,67E+11	0,021210	3,54E+09
254,0	0,000394	3,971	0,000252	0,0200	0,01	1,68E+11	0,020897	3,51E+09
224,0	0,000446	3,688	0,000271	0,0200	0,01	1,72E+11	0,020989	3,61E+09
						VALORE MEDIO	1,69E+11	
						MAX	1,75E+11	
						MIN	1,67E+11	
						SEMIDISPERSIONE	4,10E+09	$\langle e/m \rangle = (1,69 \pm 0,04)E+11$ (C/kg)

V (volt)	I ² (A ²)
259,3	15,4449
207,8	12,952801
260,2	16,200625
187,3	11,6281
225,6	13,980121
250,7	15,6025
191,4	11,957764
168,4	10,523536
254,0	15,768841
224,0	13,601344



Tensione 250 V

V(volt)	\mathcal{E}_v	r (m)	\mathcal{E}_r	I (A)	\mathcal{E}_i	e/m (C/kg)	$\mathcal{E}(e/m)$	$\Delta(e/m)$
250,0	0,004	0,0500	0,002	1,532		0,01 1,77763E+11	0,028	4,98E+09
250,0	0,004	0,0400	0,003	1,888		0,01 1,82884E+11	0,029	5,30E+09
250,0	0,004	0,0300	0,003	2,592		0,01 1,72499E+11	0,031	5,29E+09
250,0	0,004	0,0200	0,005	3,852		0,01 1,75738E+11	0,034	5,98E+09
					VALORE MEDIO	1,77221E+11		
					MAX	1,82884E+11		
					MIN	1,72499E+11		
					SEMIDISPERSIONE	5,19E+09		$\langle e/m \rangle = (1,77 \pm 0,05)E+11$ C/kg

DISCUSSIONE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

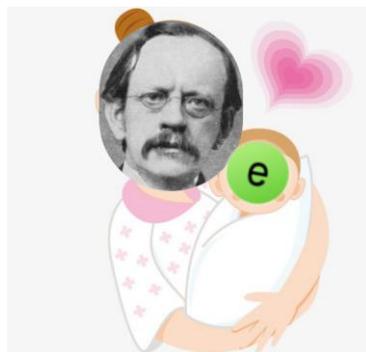
Non è stato facile raccogliere le misure. Il fascio era molto debole e per visualizzarlo si è reso necessario oscurare completamente il laboratorio.

Non appena si illuminava una delle astine verticali, a conferma della correttezza del diametro cercato, dovevamo attendere che si stabilizzassero i multimetri e prendere le misure di tensione e di corrente illuminando gli strumenti con i nostri telefonini. Spesso il fascio si scostava dall'astina e bisognava riposizionarlo nuovamente con pazienza e mano ferma.

I valori ottenuti per e/m si adattano abbastanza bene al valore $1,758820174 \cdot 10^{11} C/kg$ e il valore di R^2 prossimo a 1 è indice del buon adattamento della funzione di fit ai dati. Alcuni valori si discostano probabilmente perché il campo magnetico non è perfettamente uniforme. Questo causa sicuramente errori sistematici nelle misure. Contiamo di eseguire nuove raccolte di misure nelle prossime settimane. Ad esempio vogliamo scoprire cosa succede mantenendo costante la corrente.

Il nostro percorso alla ricerca dell'invisibile è stato incredibilmente stimolante e pieno di scoperte sorprendenti sul mondo della fisica. Partecipare al convegno ScienzeAFirenze è stata anche una grande opportunità per approcciare alle attività laboratoriali come mai avevamo fatto fino ad ora, assumendo ruoli di responsabilità nella presa diretta delle misurazioni e nella gestione dei dati. Inoltre, abbiamo avuto modo di ampliare i nostri studi, non solo attraverso le innumerevoli ricerche per portare a termine questa tesina, ma anche condividendo tra di noi conoscenze e capacità differenti, dettate dalla frequentazione di corsi di studio altrettanto diversi.

La scoperta dell'elettrone costituisce un punto di svolta cruciale nella storia della fisica, aprendo la strada a una nuova comprensione della struttura fondamentale della materia e delle leggi che la governano. Attraverso un'analisi approfondita del contesto storico, delle teorie e delle scoperte scientifiche dell'epoca, emerge chiaramente il ruolo centrale che questa scoperta ha giocato nel plasmare il panorama scientifico e tecnologico moderno.



BIBLIOGRAFIA

- Giulio Peruzzi _Alle origini della fisica del XX secolo: la scoperta dell'elettrone
Le Scienze n.351, novembre 1997
- E. Segré _ Personaggi e scoperte della fisica contemporanea_ Mondadori Milano 1996
- FERRER S., Arthur Schuster, i J. Thomson, and the Discovery of the Electron in «Historical Studies in the Physical Sciences», 20/1, pp. 33-41, 1989
- John R. Taylor _ Introduzione all'analisi degli errori_ Lo studio delle incertezze nelle misure fisiche_ seconda edizione_ Zanichelli

