

**NUOVI E VECCHI STRUMENTI
PER INDAGARE I FENOMENI IN NATURA**
Il laboratorio tra tradizione e innovazione

Firenze, 22 – 23 aprile 2026

SEZIONE TESINE TRIENNIO

Terzo classificato

**Dentro lo schermo: come i raggi catodici
hanno svelato la natura della materia**

Studenti

Mazzocco Paolo - Pavan Enrico - Benetton Marco

Toffoli Antonio - Canato Lorenzo

Classe 4A

Istituto di Istruzione Superiore

Liceo scientifico Istituto Don Bosco

Padova (PD)

Docente Coordinatore

Cecchetto Elisabetta

Stimolati dal ritrovamento nel laboratorio della scuola di un vecchio televisore a tubo catodico, gli studenti riproducono gli esperimenti di Crookes e di Thomson su natura e proprietà dei raggi catodici. Seguono con cura i diversi passaggi concettuali utilizzando prevalentemente la strumentazione in dotazione. L'attività svolta, coerente con il tema del concorso, è documentata da una relazione chiara e ordinata che illustra nei dettagli tutti i passaggi del lavoro sperimentale. Interessante la procedura utilizzata per ricavare dai dati il rapporto carica/massa dei raggi catodici.

Il gruppo è composto da cinque studenti di quarta liceo scientifico tradizionale che, non avendo avuto negli anni precedenti molte occasioni di svolgere attività di laboratorio, hanno scelto di mettersi in gioco progettando e realizzando un proprio percorso scientifico.

Fin dall'inizio hanno lavorato con entusiasmo, curiosità e spirito collaborativo. Se inizialmente l'approccio è stato un po' impacciato e molto teorico, in breve tempo hanno acquisito sicurezza e autonomia. Hanno ideato il loro percorso sperimentale, integrando con studio personale gli argomenti di fisica non ancora affrontati in classe. Ogni esperimento è stato costruito passo dopo passo per rispondere alle domande emerse dalle osservazioni precedenti.

Hanno cercato e reperito il materiale necessario non solo nei laboratori scolastici, ma anche attraverso risorse personali o di conoscenti. Dopo ogni osservazione seguiva un confronto critico tra loro, volto a interpretare i fenomeni osservati e a progettare nuove prove sperimentali capaci di confermare o confutare le ipotesi formulate. Hanno costruito molti più esperimenti rispetto a quelli proposti, perché alcuni sono stati tentativi non andati a buon fine. Alla solida preparazione teorica e strategica, tipica di un liceo Scientifico Tradizionale, hanno affiancato il desiderio di crearsi una competenza nell'uso degli strumenti tecnologici, un attento spirito di osservazione e la pazienza di ripetere più volte lo stesso esperimento fino a ottenere configurazioni stabili e risultati misurabili.

Si sono cimentati anche nel cablaggio di un sistema di alimentazione realizzato in laboratorio, poiché troppo costoso da acquistare. Hanno calcolato i valori ottimali per visualizzare un flusso di elettroni, garantendo al contempo la stabilità del sistema per poter effettuare misurazioni attendibili.

Durante tutto il percorso hanno lavorato con atteggiamento positivo, sostenendosi reciprocamente nei momenti di difficoltà. Hanno applicato in modo consapevole la matematica alla risoluzione dei problemi di fisica, sperimentando concretamente che i modelli teorici non sempre si adattano perfettamente alla realtà. Per questo hanno elaborato strategie di calcolo per rendere i modelli ideali più aderenti ai dati sperimentali, utilizzando strumenti tradizionali come carta, penna e calcolatrice, ma anche software come GeoGebra per verificare la correttezza dei risultati.

Hanno sperimentato che a volte le soluzioni arrivano come un'intuizione altre volte è necessario studiare, ricercare e sbagliare.

Questo percorso ha rappresentato per loro una scoperta concreta del legame profondo tra matematica e fisica: due discipline che i ragazzi tendono a considerare separatamente. Hanno compreso come ciò che si studia in classe trovi applicazione nella realtà e come i modelli teorici debbano essere sottoposti a verifica sperimentale.

È stato un viaggio scientifico, affrontato in squadra, che ha mostrato come il lavoro di gruppo permetta di superare le difficoltà e di raggiungere obiettivi significativi.

Ma è stato anche un percorso nella storia della fisica: un'esplorazione dei passaggi teorici e sperimentali che, nel tempo, hanno trasformato un'idea iniziale in un'applicazione concreta. Ripercorrendo le scoperte legate allo studio dell'elettrone e dei raggi catodici, fino agli sviluppi successivi della fisica dell'elettronica, i ragazzi hanno compreso come intuizioni, verifiche sperimentali e modelli matematici abbiano progressivamente portato alla realizzazione di strumenti tecnologici come la televisione.

Hanno così potuto osservare da vicino come la ricerca scientifica non proceda per salti improvvisi, ma attraverso tentativi, errori, correzioni e perfezionamenti successivi, in un dialogo continuo tra teoria ed esperienza.

DENTRO LO SCHERMO: COME I RAGGI CATODICI HANNO SVELATO LA NATURA DELLA MATERIA

INDICE

INTRODUZIONE	p. 1
ESPERIMENTO 1 "SMONTIAMO IL TELEVISORE"	p. 2
ESPERIMENTO 2 "TUBO DI CROOKES"	p. 4
ESPERIMENTO 3 "IL RADIOMETRO DI CROOKES E MOTO DELLE ONDE"	p. 6
ESPERIMENTO 4 "DEVIAZIONE MAGNETICA"	p. 8
ESPERIMENTO 5 "TUBO DI THOMPSON"	p. 9
CONCLUSIONE	p.14
SITOGRAFIA	p.16

INTRODUZIONE

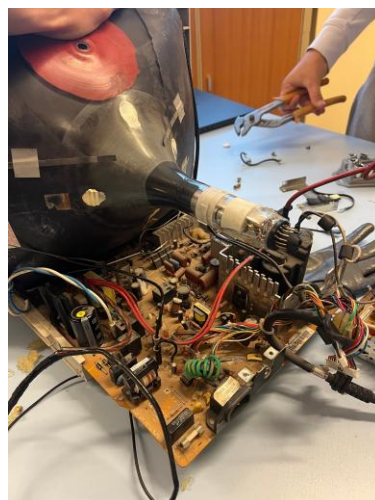
Il nostro progetto è nato in modo del tutto casuale quando, un giorno, nel laboratorio di fisica della scuola abbiamo notato un vecchio televisore a tubo catodico. Spinti dalla curiosità, abbiamo deciso di smontarlo e ci siamo posti una domanda fondamentale: quale principio fisico è alla base del funzionamento di un televisore a tubo catodico? Che cosa accade al suo interno quando viene collegato alla corrente elettrica? Per rispondere a queste domande abbiamo iniziato a studiare il funzionamento del televisore a tubo catodico, scoprendo che esso si basa sull'emissione e sul controllo dei raggi catodici, fasci di particelle cariche che, opportunamente deviati, colpiscono lo schermo producendo immagini visibili grazie al fenomeno della fluorescenza. Da qui è nata una seconda domanda: chi per primo ha studiato i raggi catodici e in quale contesto storico e scientifico sono state formulate le prime ipotesi sulla loro natura? Lo scopo del nostro progetto scientifico è quindi quello di ricostruire la storia dei raggi catodici, cercando di riprodurre gli esperimenti che hanno portato alla comprensione della loro natura fisica. Siamo partiti dagli studi di Sir William Crookes, operanti nella seconda metà del XIX secolo, periodo caratterizzato da un intenso sviluppo della fisica e dell'elettricità. Nel nostro laboratorio è disponibile un tubo di Crookes con croce maltese funzionante, oltre ad alcuni piccoli tubi che abbiamo ipotizzato essere anch'essi tubi di Crookes e che abbiamo quindi testato sperimentalmente. Crookes, chimico e fisico britannico, sviluppò tubi a vuoto per studiare i fenomeni elettrici nei gas rarefatti. Fu lui a coniare il termine *raggi catodici* e a dimostrare alcune delle loro proprietà fondamentali: la propagazione rettilinea, la possibilità di essere bloccati da oggetti solidi e la capacità di provocare fluorescenza quando colpiscono le pareti di vetro del tubo. Tali osservazioni suggerivano una possibile natura corpuscolare dei raggi. Abbiamo cercato di replicare questi esperimenti per comprendere meglio la natura dei raggi catodici e per rispondere a un interrogativo centrale della fisica dell'epoca: i raggi catodici sono onde elettromagnetiche o particelle materiali? Nel tentativo di chiarire questo aspetto abbiamo utilizzato un particolare dispositivo noto come radiometro di Crookes, che permette di osservare gli effetti della radiazione elettromagnetica. In una giornata di sole, utilizzando una lente per focalizzare la luce solare, abbiamo osservato il movimento del mulinello interno, dovuto al trasferimento di quantità di moto della radiazione. Abbiamo replicato l'esperimento utilizzando un laser di due colori diversi e abbiamo osservato che il mulinello iniziava a muoversi lentamente. Questo ci ha permesso di comprendere che anche le onde elettromagnetiche trasferiscono quantità di moto, ma tale effetto non è sufficiente per spiegare il comportamento dei raggi catodici. Un'osservazione decisiva è stata la deviazione dei raggi catodici in presenza di un campo magnetico. Abbiamo quindi verificato se anche un raggio laser subisse una deviazione analoga: il laser non viene deviato dal campo magnetico. Questo risultato sperimentale ci ha permesso di escludere che i raggi catodici siano onde elettromagnetiche, rafforzando l'ipotesi della loro natura corpuscolare. Per approfondire ulteriormente lo studio abbiamo utilizzato il tubo di Thomson, un apparato sperimentale decisamente più complesso, che richiede un'elettronica più avanzata rispetto a quella utilizzata in precedenza. Questo esperimento consente non solo di confermare la natura dei raggi catodici, ma anche di determinare il rapporto carica/massa (e/m) delle particelle che li compongono. Durante questo percorso abbiamo compreso come si sia evoluto il laboratorio scientifico e come siano cambiate le modalità di fare scienza. I primi esperimenti, come quelli di Crookes, erano prevalentemente qualitativi e richiedevano apparati relativamente semplici, ma grande capacità di osservazione, concentrazione e intuito. L'esperimento di Thomson,

invece, ha richiesto molto tempo per la costruzione dell'apparato, il cablaggio dei dispositivi e la corretta impostazione dei generatori di tensione e dei campi elettrici e magnetici.

Abbiamo dovuto modificare più volte le impostazioni sperimentali per ottenere risultati osservabili e studiare attentamente il funzionamento della strumentazione per poterla utilizzare in modo efficace. A differenza degli esperimenti precedenti, questo ha prodotto dati quantitativi, che sono stati successivamente elaborati, permettendoci di concludere il nostro viaggio attraverso la storia dei raggi catodici con un'esperienza di laboratorio completa, dalla fase osservativa a quella di analisi dei dati. Questa esperienza ci ha inoltre permesso di fare esperienza, seppur in maniera molto condensata, dell'evoluzione del laboratorio e della scienza, vedendo come, non solo gli esperimenti, ma anche il processo operativo sia cambiato radicalmente dai tempi di Crookes, passando per i tempi di Thompson, fino ad arrivare ai giorni nostri, che disponiamo di strumenti all'avanguardia che attenuano gli errori sperimentali, rendendo l'esperimento il più preciso possibile.

ESPERIMENTO 1 “ SMONTIAMO IL TELEVISORE”

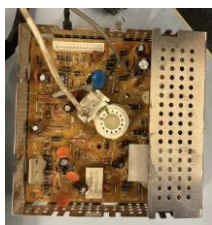
Abbiamo iniziato il nostro lavoro smontando un vecchio televisore a tubo catodico presente nel laboratorio di fisica. Fin da subito insorsero le prime difficoltà: oltre alla grande quantità di polvere, qualcuno prima di noi aveva incollato accuratamente ciascun componente, ogni cavo, in modo che il televisore si presentasse come un unico ammasso di colla. L'operazione è stata svolta con attenzione affinché, nel processo di rimozione della colla, nessun componente venisse danneggiato. Abbiamo rimosso prima la colla e alcuni componenti fissati con l'aiuto di un taglierino. Successivamente abbiamo tolto le fascette che bloccano il circuito elettronico di protezione e cercato di capire come rimuoverlo senza danneggiare i componenti. Una volta scollegati i cavi, siamo riusciti a rimuovere il circuito di protezione. Abbiamo poi separato la bobina centrale dal tubo catodico e infine estratto lo schermo con il tubo catodico dalla struttura esterna in plastica del televisore. Dallo smontaggio del televisore sono emerse le seguenti parti principali:



- Scheda madre



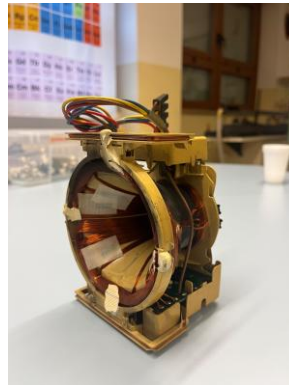
- Circuito elettronico di protezione



- Schermo con tubo catodico



- Bobina centrale



A questo punto ci siamo chiesti a cosa servissero questi componenti e quale fosse il loro ruolo nel funzionamento del televisore.

Abbiamo cercato sul web e brevemente abbiamo compreso che la “Scheda madre” è il circuito principale del televisore. Si occupa di elaborare il segnale elettrico e di controllare il funzionamento delle varie parti del dispositivo. Il “Circuito elettronico di protezione” serve a proteggere il televisore da sovratensioni e a garantire un funzionamento sicuro dell’apparato. Lo “Schermo con tubo catodico” è la parte fondamentale del televisore. All’interno del tubo vengono prodotti i raggi catodici, che colpiscono lo schermo rivestito di materiale fluorescente, generando le immagini. La “Bobina centrale” crea campi magnetici che permettono di deviare il fascio di raggi catodici, consentendo la scansione dello schermo e quindi la formazione dell’immagine.

Ci siamo chiesti se fosse possibile collegare direttamente il nostro tubo catodico a un generatore di tensione per osservarne il funzionamento “in modo diretto”, senza passare attraverso l’elettronica del televisore. Tuttavia, da una ricerca in letteratura tecnica e nei manuali di sicurezza è emerso che tale operazione può essere **molto pericolosa** e non può essere eseguita senza adeguate precauzioni. Il motivo principale è che i tubi catodici richiedono tensioni estremamente elevate per accelerare gli elettroni dal catodo verso lo schermo: tipicamente nell’ordine di decine di migliaia di volt (fino a $30 \div 50$ kV o più a seconda della dimensione del tubo) per ottenere un fascio di elettroni con energia sufficiente a produrre fluorescenza sullo schermo. Queste tensioni sono molto superiori a quelle di una normale presa di rete, e possono causare scosse elettriche gravemente pericolose o addirittura fatali se si entra in contatto diretto con i terminali sotto tensione o con componenti non adeguatamente isolati. Inoltre, anche quando il tubo è stato spento e scollegato dalla rete, alcuni componenti come il tubo stesso e i condensatori dell’alimentatore possono mantenere cariche ad alta tensione per giorni, costituendo un serio rischio di scossa se non vengono prima scaricati correttamente con strumenti e procedure adeguati.

Un ulteriore pericolo legato alla manipolazione dei tubi catodici è la possibilità di implosione: poiché il tubo è evacuato a vuoto, una rottura accidentale del vetro può causare un collasso improvviso della struttura, con proiezione di schegge di vetro ad alta energia. Anche le componenti interne possono essere tossiche (ad esempio, vetro al piombo e fosfori sulla superficie interna).

Per questi motivi, sperimentazioni che coinvolgono l'applicazione diretta di alta tensione a un tubo catodico devono essere eseguite solo con adeguata strumentazione, dispositivi di isolamento, strumenti di misura specifici e sotto la supervisione di personale esperto, rispettando le norme di sicurezza elettrica. Collegare direttamente un tubo catodico a un generatore di tensione senza tali precauzioni può causare scosse, cortocircuiti, danni alla strumentazione e rischi fisici gravi.

Proprio per questi motivi abbiamo scelto di iniziare lo studio dei raggi catodici ripercorrendo gli esperimenti storici che ne hanno permesso la scoperta e la comprensione, partendo dal tubo di Crookes, uno strumento fondamentale che consente di osservare in modo diretto e controllato i fenomeni legati ai raggi catodici, senza ricorrere alle elevate tensioni e alla complessità elettronica richieste da un tubo catodico moderno. Il nostro viaggio alla scoperta della dei raggi catodici e della loro storia era appena iniziato.

ESPERIMENTO 2 “ TUBO DI CROOKES”

INTRODUZIONE STORICA

Il modello più famoso del tubo di Crookes è quello che presenta una piccola croce metallica, solitamente di alluminio, posta tra il catodo e la parete fluorescente del tubo. Questo dispositivo fu utilizzato da William Crookes alla fine dell'Ottocento per studiare il comportamento delle scariche elettriche nei gas rarefatti e per indagare la natura dei raggi catodici. Quando il tubo è in funzione, la croce proietta un'ombra netta sulla parete fluorescente opposta. Questo fenomeno rappresenta una prova fondamentale del fatto che i raggi catodici si propagano in linea retta dal catodo verso l'anodo e possono essere bloccati da oggetti solidi.

STRUTTURA SPERIMENTALE

Il tubo di Crookes utilizzato nel nostro esperimento è costituito da:

- un bulbo di vetro con vuoto, con una pressione residua molto bassa (dell'ordine di 10^{-4} – 10^{-6} atm);
- due elettrodi metallici:
il catodo (polo negativo), da cui hanno origine i raggi catodici; l'anodo (polo positivo);
- una croce metallica, montata su un supporto isolante e collocata tra il catodo e la parete del tubo;
- un rivestimento fluorescente sulla parete opposta alla croce, che emette luce quando viene colpito dai raggi catodici (nel nostro caso di colore verdastro).



MATERIALE USATO

Tubo di Crookes con croce metallica

Generatore di alta tensione (portata massima 25 kV, sensibilità 10 V)

Cavi di collegamento isolati

PROCEDIMENTO

Abbiamo collegato il polo negativo del generatore alla parte posteriore del tubo (catodo, detta "coda") e il polo positivo a una delle "pinne" laterali (anodo). Collegati i cavi al generatore, abbiamo aumentato gradualmente la differenza di potenziale, in modo che fosse visibile un fascio azzurro. Abbiamo ripetuto l'esperimento più volte, variando la differenza di potenziale e osservando attentamente i cambiamenti nel comportamento del fascio.

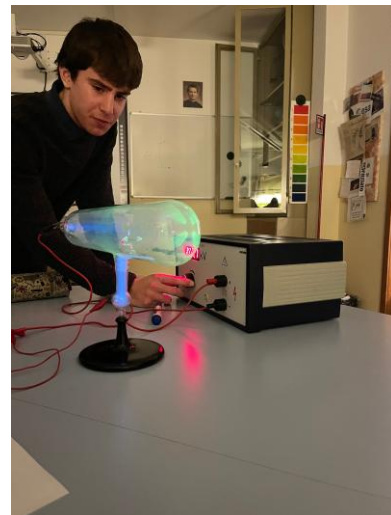
DATI RACCOLTI

Durante il funzionamento del tubo di Crookes abbiamo osservato che raggiunto il valore di 1,8KV dall'alimentatore, all'interno del tubo si forma un fascio di colore azzurro che si origina dal catodo e raggiunge la parte inferiore del tubo, all'anodo. Inoltre abbiamo constatato come aumentando la differenza di potenziale aumenti anche l'intensità luminosa del fascio, ma non il colore. Oltre a ciò, in corrispondenza della croce metallica compare una luminescenza verde sulla parete del tubo dove si osserva l'ombra ben definita della croce.

Queste osservazioni ci hanno portato a porci alcune domande sulla natura del fascio: perché il fascio è di colore blu? Perché il fascio emana luce di colore verde dopo che passa per la croce? Perché c'è l'ombra della croce?

OSSERVAZIONI

I fenomeni osservati possono essere spiegati considerando ciò che accade all'interno del tubo: il raggio catodico emesso dal catodo (per effetto dell'elevata differenza di potenziale applicata) viene deviato verso l'anodo (polo negativo) dal campo elettrico presente nel tubo. Poiché all'interno del tubo la pressione del gas è molto bassa, i raggi subiscono pochissime collisioni e si muovono praticamente in linea retta. Quando colpiscono il rivestimento fluorescente del tubo, cedono parte della loro energia cinetica agli atomi del materiale, che si eccitano ed emettono luce visibile (fluorescenza), di colore verdastro. Il colore verdastro è dovuto, dopo aver eseguito un'attenta ricerca, alla presenza dell'argon sotto forma di gas nell'involucro di vetro antistante alla croce. La croce metallica intercetta parte del fascio e blocca il suo passaggio, proiettando un'ombra netta sulla parete fluorescente.



Questo fenomeno può fornirci ulteriori informazioni sull'origine dei raggi catodici: si può infatti escludere la natura ondulatoria dei raggi. Se i raggi catodici fossero delle onde si verificherebbe il fenomeno della diffrazione. Si può escludere la natura ondulatoria dei raggi catodici, il che ci porta a supporre che i raggi catodici siano di natura corpuscolare, questo spiegherebbe l'ombra e la mancanza di diffrazione. Grazie a questa interpretazione fisica è possibile rispondere ad alcune delle domande iniziali: il fascio azzurro è legato all'interazione dei corpuscoli con il gas residuo nel tubo, mentre la luce verde è dovuta alla fluorescenza dell'argon presente nel rivestimento colpito dalle particelle.

INTERPRETAZIONE FISICA-STORICA

All'epoca di Crookes non era ancora chiaro se i raggi catodici fossero:

- onde elettromagnetiche, secondo l'ipotesi sostenuta da Hertz e Lenard;
- oppure flussi di particelle materiali, come ipotizzato da Crookes.

L'esperimento della croce fornì un'evidenza importante a favore della natura corpuscolare: un'ombra netta non si formerebbe se i raggi fossero onde, che tendono a diffrangere. Inoltre, in alcuni esperimenti la croce, se montata su un supporto mobile, veniva spinta, mostrando che i raggi possiedono quantità di moto.

A questo punto sorge un'altra domanda: ma solo i corpuscoli possiedono quantità di moto? Il fatto che venga trasferita quantità di moto ci dice inequivocabilmente che i raggi catodici sono particelle?

ESPERIMENTO 3 “IL RADIOMETRO DI CROOKES E LA QUANTITA' DI MOTO DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE”

SCOPO DELL'ESPERIMENTO

Lo scopo di questo terzo esperimento è di rispondere alla domanda che ci siamo posti soprastante: solo i corpuscoli possiedono quantità di moto? Con questo esperimento si va dunque a verificare se le onde elettromagnetiche sono in grado di trasferire quantità di moto, e confrontare questo effetto con quanto osservato nel tubo di Crookes.

PRIMA PARTE “Radiometro e luce solare”

MATERIALE USATO

Radiometro di Crookes, lente convergente e luce solare.

APPARATO SPERIMENTALE

Il radiometro di Crookes è costituito da un bulbo di vetro parzialmente evacuato al cui interno è presente un mulinello con palette annerite da un



lato e riflettenti dall'altro. Il dispositivo permette di osservare gli effetti della radiazione elettromagnetica sulla materia.

PROCEDIMENTO

In una giornata di sole abbiamo posizionato il radiometro in modo che fosse colpito dalla luce solare. Utilizzando una lente convergente abbiamo focalizzato i raggi solari sul mulinello interno.

DATI RACCOLTI E OSSERVAZIONI

Non appena abbiamo impostato l'esperimento e focalizzato i raggi solari verso le palette del mulinello, il mulinello ha iniziato a ruotare molto velocemente. Abbiamo potuto constatare come la velocità di rotazione aumenti quando la luce è maggiormente concentrata sulle palette, se infatti non si utilizza una lente per concentrare i raggi, il mulinello ruota a velocità molto più ridotte rispetto a quando i raggi sono focalizzati.

SECONDA PARTE “Radiometro e LASER”

MATERIALE USATO

Radiometro di Crookes, laser rosso (lunghezza d'onda = **650 nm**) e laser verde (lunghezza d'onda = **532 nm**)

PROCEDIMENTO

Abbiamo ripetuto l'esperimento precedente sostituendo la luce solare (dunque in una stanza buia dove non ci fosse contaminazione solare) con due laser di diversa lunghezza d'onda per poter studiare meglio come varia la velocità di rotazione del mulinello. Prima abbiamo utilizzato un laser rosso, poi un laser verde, mantenendo il fascio diretto verso il radiometro.

DATI RACCOLTI E OSSERVAZIONI

Durante l'esecuzione dell'esperimento abbiamo potuto osservare due importanti fenomeni: utilizzando il laser rosso (di lunghezza d'onda maggiore) il mulinello ha iniziato a muoversi, ma molto lentamente. Utilizzando il laser di colore verde, invece, che ha lunghezza d'onda inferiore rispetto al laser di colore rosso, il mulinello si muoveva più velocemente, ma comunque ad una velocità di gran lunga ridotta rispetto a quella osservata con la luce solare.

CONCLUSIONI

Da questi esperimenti abbiamo concluso che anche le onde elettromagnetiche trasportano quantità di moto, che può essere trasferita al mulinello del radiometro in modo simile a quanto avviene negli urti elastici. Abbiamo inoltre osservato che la quantità di moto trasportata dalla radiazione dipende dalla lunghezza d'onda: a lunghezze d'onda maggiori corrisponde una quantità di moto minore. Questo spiega perché il laser verde (lunghezza d'onda più corta) produce un effetto maggiore rispetto al laser rosso e perché la luce solare, che comprende

tutte le lunghezze d'onda, produce un effetto di gran lunga maggiore rispetto a quello osservato con i due laser.

ESPERIMENTO 4 “DEVIAZIONE MAGNETICA”

SCOPO DELL'ESPERIMENTO

Dato che con l'esperimento 3 siamo giunti alla conclusione che non sono solo i corpuscoli ad avere la capacità di trasferire quantità di moto ma che anche le onde elettromagnetiche possiedono la stessa proprietà, con questo esperimento si è andati a verificare se i raggi catodici e le onde elettromagnetiche (laser) risentissero dell'azione di un campo magnetico. In caso una delle due non risentisse del campo magnetico, avremmo un criterio obiettivo e osservabile sul quale basarci per poter determinare la natura dei raggi catodici.

MATERIALE UTILIZZATO

Laser rosso (lunghezza d'onda = 650nm), laser verde (lunghezza d'onda = 532nm), Tubo di Crookes, generatore di alta tensione e magneti permanenti

PROCEDIMENTO

Abbiamo inizialmente posizionato un magnete lungo il percorso dei fasci laser, prima quello rosso e poi quello verde, osservando il comportamento del fascio mentre il magnete veniva avvicinato e spostato in diverse posizioni. Successivamente abbiamo prodotto i raggi catodici all'interno del tubo di Crookes collegandolo al generatore di alta tensione. Una volta reso visibile il fascio, abbiamo posizionato uno o più magneti lungo il suo percorso, spostandoli lentamente e osservando attentamente le variazioni nella traiettoria del fascio.

DATI RACCOLTI E OSSERVAZIONI

In questa fase dell'esperimento abbiamo notato come i fasci laser, sia quello rosso che quello verde, non subiscono alcuna deviazione in presenza del campo magnetico, indipendentemente dalla posizione del magnete. I raggi catodici, invece, vengono chiaramente deviati dal campo magnetico, deformando non solo l'ombra della croce proiettata sul fondo ma anche la fluorescenza verde attorno all'ombra della croce. Più nello specifico abbiamo osservato che la deviazione del fascio catodico cambia verso e intensità al variare della posizione e dell'orientamento del magnete. Spostando il magnete lungo il tubo, la curvatura del fascio segue il movimento del magnete stesso.

Invertendo i poli del magnete, la direzione della deviazione del fascio si inverte.

CONCLUSIONE

Queste osservazioni indicano che i raggi catodici risentono della forza magnetica, che agisce solo su particelle cariche in movimento. Poiché i raggi catodici subiscono una deviazione in presenza di un campo magnetico, mentre i laser non ne sono influenzati, possiamo escludere che i raggi catodici siano onde elettromagnetiche. Il loro comportamento è invece compatibile

con quello di un fascio di particelle cariche. Considerando inoltre che i raggi catodici sono prodotti dal catodo e vengono attratti dall'anodo, possiamo concludere che essi sono costituiti da particelle cariche negativamente.

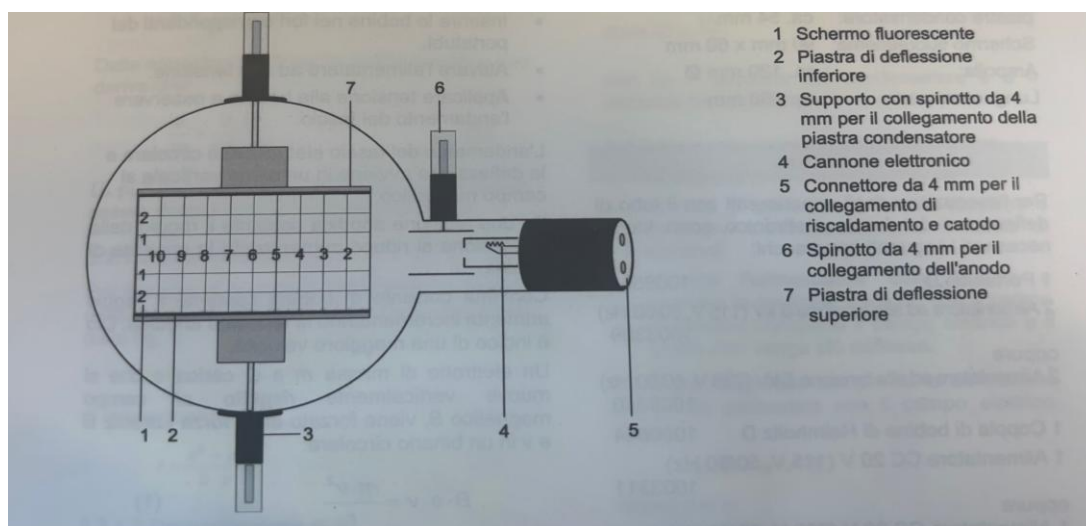
La deviazione magnetica fornisce una conferma qualitativa della natura corpuscolare e carica dei raggi catodici. Per ottenere una verifica quantitativa e determinare una proprietà fondamentale delle particelle che li compongono è però necessario un apparato sperimentale più sofisticato.

Per questo motivo, nel passo successivo del nostro lavoro, abbiamo introdotto l'esperimento di Thomson, che utilizza un sistema di campi elettrici (tramite un condensatore) e campi magnetici per studiare in modo controllato la traiettoria dei raggi catodici e determinare il rapporto carica/massa, arrivando così all'identificazione dell'elettrone.

ESPERIMENTO 5 "TUBO DI THOMPSON"

Per comprendere meglio la natura dei raggi catodici, abbiamo studiato l'esperimento di J. J. Thomson. L'esperimento consiste nel produrre un fascio di raggi catodici che si muove di moto rettilineo uniforme e nell'applicare un campo elettrico perpendicolare alla direzione del moto, tramite due piastre di un condensatore collegate a una differenza di potenziale. Il campo elettrico si forma tra le piastre e ha direzione dalla piastra positiva a quella negativa. Osserviamo quindi la traiettoria dei raggi.

DESCRIZIONE DELL'APPARATO



Il tubo di Thomson (o tubo a raggi catodici) è costituito da: un tubo di vetro sottovuoto, per evitare urti tra i raggi con le molecole d'aria.

Un catodo (elettrodo negativo), che emette i raggi quando viene riscaldato o sottoposto a forte differenza di potenziale.

Un anodo (elettrodo positivo), che accelera e collima il fascio

Un sistema di deflessione, costituito da piastre elettriche che permettono di applicare campi elettrici.

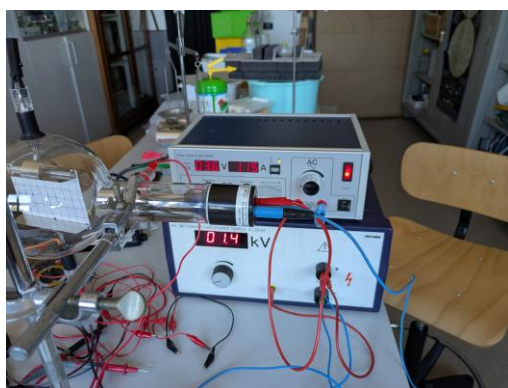
Uno schermo fluorescente, che emette luce nel punto in cui il fascio di elettroni lo colpisce,

rendendo visibile la traiettoria, sostenuto da un reticolo graduato in cm, ruotato di 15° rispetto all'asse del fascio.

CABLAGGIO DEL TUBO

Per l'esecuzione dell'esperimento sono necessari secondo il manuale fornito con il tubo i seguenti apparecchi: un portatubo, due alimentatori ad alta tensione da 5kV, una coppia di bobine di Helmholtz D e un alimentatore apposito per queste ultime.

Non essendo in possesso di tutto il materiale suggerito, abbiamo adattato l'esperimento per poter indagare la natura dei raggi, utilizzando i dispositivi presenti in laboratorio: invece del del portatubo abbiamo utilizzato un porta provette trovato in laboratorio, e abbiamo utilizzato



un alimentatore in corrente continua e uno in corrente alternata in sostituzione dell'alimentatore integrato suggerito dal costruttore. Abbiamo cablato il sistema in modo da produrre il fascio visibile e stabile: il generatore a tensione alternata permette di generare il fascio di e renderlo stabile, mentre l'alimentatore ad alta tensione lo accelera e ci permette di regolarne l'intensità.

La traiettoria del fascio prodotto è una retta orizzontale. Inoltre non avendo le bobine di Helmholtz abbiamo utilizzato una coppia di magneti per cercare di riprodurre la deflessione magnetica

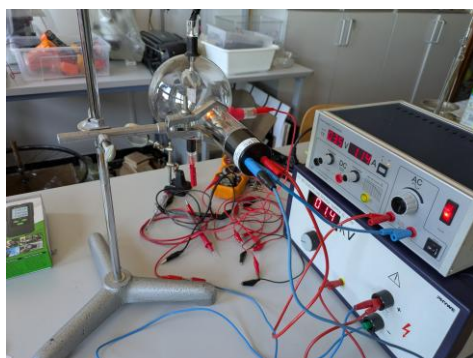
del fascio.

Per generare il campo elettrico nel quale far viaggiare il fascio abbiamo inizialmente utilizzato un generatore a bassa tensione, ma non abbiamo osservato nessuna variazione nella traiettoria. Quindi abbiamo sdoppiato i cavi del generatore ad alta tensione per alimentare contemporaneamente sia il tubo che il condensatore.

ESPERIMENTO E ANALISI DELLE CRITICITÀ: IL PROBLEMA DEL CAMPO ELETTRICO E L'ERRORE SULL'EQUAZIONE DELLA TRAIETTORIA

A questo punto studiando la deflessione del raggio all'interno del campo elettrico abbiamo avuto la conferma che le particelle che costituiscono il fascio siano cariche negative, per comprendere se tali particelle siano elettroni abbiamo pensato di calcolare il rapporto carica/massa per confrontarlo con il valore caratteristico degli elettroni

Si è posto però il problema di come calcolare il campo elettrico prodotto all'interno del



condensatore, perché utilizzando alte tensioni la relazione $E = \Delta V/d$, dove ΔV è la differenza di potenziale e d è la distanza delle armature, non è valida. All'interno del condensatore il campo elettrico è direttamente proporzionale alla differenza di potenziale applicata alle armature fino a quando le armature non sono completamente cariche. Raggiunto il massimo valore di carica delle armature anche se si aumenta la differenza di potenziale, il campo elettrico non aumenta. Il problema pareva insormontabile: se si diminuisce la

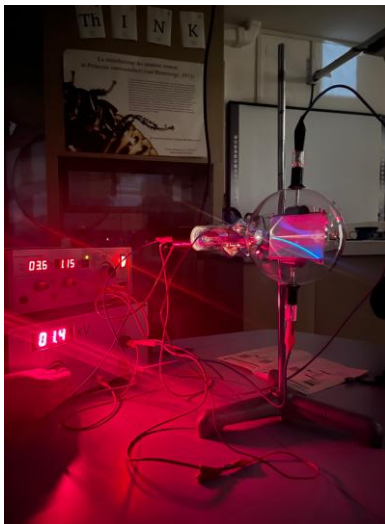
tensione non si visualizza il fascio, se si aumenta la tensione e si rende stabile il fascio non siamo in grado di calcolare il campo elettrico. La soluzione a questo problema è arrivata in modo inaspettato quando abbiamo provato a calcolare l'equazione che descrive la traiettoria: il fascio sottoposto al campo elettrico generato dal condensatore viene deflesso e la traiettoria visualizzata nello schermo fluorescente è una parabola. Utilizzando i punti visualizzati sullo schermo fluorescente è possibile scrivere l'equazione della traiettoria.

Abbiamo cercato quindi di determinare la traiettoria teorica per poi utilizzare le coordinate della curva reale.

Abbiamo cercato di isolare il rapporto q/m utilizzando la conservazione dell'energia per determinare la velocità di emissione delle particelle. Conoscendo infatti la differenza di potenziale applicata ai capi del tubo e che quindi accelera le particelle è possibile determinare l'energia cinetica di uscita delle particelle e quindi la loro velocità di emissione.

$$Em_i = Em_f$$

$$q\Delta V = \frac{1}{2}mv^2 \quad v = \sqrt{\frac{2q\Delta V}{m}}$$



L'equazione della traiettoria si determina esplicitando il moto della particella lungo la direzione orizzontale e quella verticale. In particolare orizzontalmente non agendo nessuna forza il moto sarà rettilineo uniforme, mentre lungo la direzione verticale agisce il campo elettrico presente all'interno del condensatore con una forza diretta verso l'alto o verso il basso a seconda della carica positiva o negativa presente sull'armatura superiore e inferiore. Agirebbe anche la forza gravitazionale che consideriamo trascurabile.

$$\begin{cases} x = v \cdot t \\ y = \frac{1}{2}at^2 \end{cases}$$

Queste sono le equazioni del moto considerando un sistema di riferimento che ha l'origine nel punto di emissione degli elettroni e considerando quindi la velocità verticale iniziale pari a 0.

$$\begin{cases} t = \frac{x}{v} \\ y = \frac{1}{2}a \frac{x^2}{v^2} \end{cases}$$

Sostituendo la velocità ottenuta con l'equazione della conservazione dell'energia e considerando che la forza elettrica è $F=qE$

$$ma = qE$$

$$y = \frac{1}{2} \frac{q}{m} E \frac{x^2}{v^2} = \frac{1}{2} \frac{q}{m} E \cdot x^2 \cdot \frac{m}{2q\Delta V} = \frac{1}{4} \frac{Ex^2}{\Delta V}$$

Abbiamo ottenuto in effetti l'equazione di una parabola, ma il rapporto q/m si è semplificato. Tuttavia in quest'equazione è possibile isolare il campo elettrico e utilizzando i valori della curva teorica calcolare il valore del campo elettrico. In maniera inaspettata siamo riusciti quindi a trovare una modalità per determinare il campo elettrico all'interno del condensatore.

$$E = \frac{4y \times \Delta V}{x^2}$$

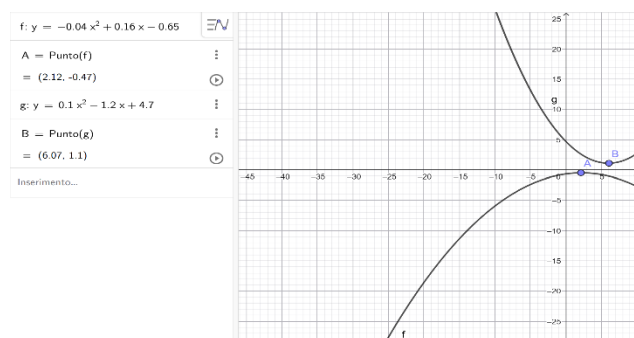
In via teorica siamo ora in grado di determinare il campo elettrico ma per riuscire a calcolare il rapporto q/m dovevamo trovare un modo per calcolare la velocità delle particelle all'interno del condensatore. Abbiamo deciso di sfruttare il campo magnetico generato da due magneti

posizionati in modo da rendere la traiettoria nuovamente rettilinea. Abbiamo posizionato i magneti in modo che la traiettoria da parabolica tornasse rettilinea. Abbiamo misurato il campo magnetico attraverso l'utilizzo di un magnetometro. Il moto rettilineo uniforme delle particelle per il primo principio della dinamica è dovuto al fatto che la somma delle forze agenti è nulla, quindi forza elettrica e forza magnetica si equilibrano. Abbiamo impostato l'equazione $qE=qvB$, da cui risulta $v=E/B$. Calcolata in questo modo la velocità, è possibile utilizzare l'equazione della traiettoria parabolica per determinare q/m .

$$\frac{q}{m} = \frac{2yE}{B^2 \cdot x^2}$$

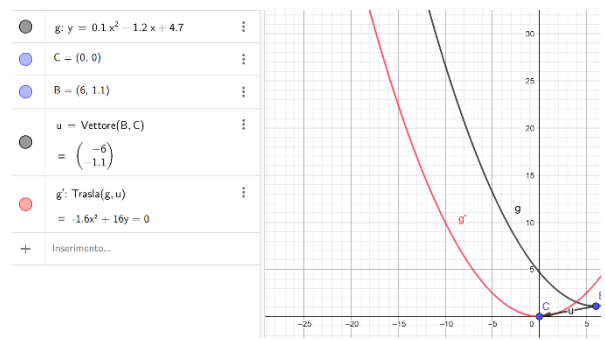
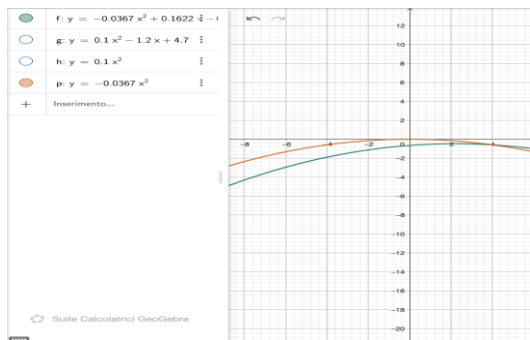
A questo punto si è imposto un altro problema.

Nella parte ideale dell'esperimento abbiamo dato per scontato che il fascio luminoso che esce dal tubo arrivi direttamente nel condensatore, e che quindi lo zero della scala graduata coincida con la posizione iniziale del fascio. Ci siamo però accorti che la scala graduata non è completamente allineata con il fascio né coincide con il foro di uscita del fascio: questo ha creato una differenza tra l'equazione ideale che avevamo calcolato e quella reale costruita con i punti evidenziati nello schermo. Per cercare di minimizzare l'errore abbiamo inizialmente diminuito da 1,5 KV a 1,2KV la differenza di potenziale applicata al tubo catodico e quindi alle armature, ma sebbene il fascio fosse più stabile, l'equazione ottenuta non variava in maniera percettibile rispetto a quella precedente. Abbiamo quindi invertito la polarità del campo in modo da invertire la deviazione del fascio ed ottenere così una seconda parabola con la concavità verso l'alto, abbiamo utilizzato la differenza di potenziale di 1,2KV per utilizzare un fascio più stabile. Confrontando le due equazioni ottenute abbiamo stimato l'errore delle nostre misure dovuto al disallineamento del fascio rispetto all'asse x della griglia: abbiamo determinato la semidisposizione delle coordinate y del vertice: $\Delta_y = \frac{|y_1 - y_2|}{2} = \frac{1,1 + 0,47}{2} = 0,78cm$.



Questo risultato non ci aiuta a migliorare le nostre misurazioni ma evidenzia la presenza di un errore sistematico: questo proprio perché la scala graduata non era perfettamente allineata con il fascio e inoltre l'origine del nostro sistema di riferimento non coincideva con il punto di emissione del fascio.

Abbiamo deciso di traslare le parabole per far coincidere il vertice della nostra parabola reale con l'origine degli assi cartesiani. Abbiamo effettuato i calcoli utilizzando la parabola con la concavità rivolta verso il basso ma il risultato ottenuto differiva dal valore sperimentale di un ordine di grandezza. Probabilmente la differenza di potenziale utilizzata nei nostri calcoli non era corretta. Abbiamo utilizzato il valore di 1,5KV perché il fascio era più intenso e questo facilitava la presa dei dati, ma era anche molto instabile. Abbiamo quindi traslato la seconda curva ottenuta con una differenza di potenziale di 1,2KV e molto più stabile della precedente. I calcoli ottenuti in questo modo ci permettono di ottenere un valore molto più vicino al valore sperimentale. La traslazione della curva è stata effettuata a mano e successivamente confermata utilizzando Geogebra.



Di seguito i nostri calcoli:

Equazione parabola rivolta verso il basso: $y = -0,0367x^2 + 0,1622x - 0,652$
 $V(2.21\text{cm}, -0.80\text{cm})$

Equazione parabola traslata: $y = -0,0367x^2$

Campo elettrico (E) della prima parabola:

$$E = \frac{4 \times (-0,0053\text{m}) \times 1500\text{V}}{(0,0379\text{m})^2} = \frac{0,0212 \times 1500 \text{ V}}{0,0379^2 \text{ m}} = \frac{31,8}{0,00143641 \text{ m}} = -22138,5 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

Campo magnetico prima parabola: $B = 1,9 \times 10^{-4}\text{T}$

Rapporto q/m ricavato dalla conservazione dell'energia utilizzando la prima parabola:

$$\frac{q}{m} = \frac{2yE}{B^2 \cdot x^2} = \frac{2 \cdot (0,0053\text{m}) \cdot (22138,5\text{V})}{(1,9 \cdot 10^{-4}\text{T})^2 \cdot (0,0379\text{m})^2} = 4,5 \cdot 10^{12} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

Equazione parabola rivolta verso l'alto: $y = 0,1x^2 - 1,2x + 4,7$ $V(6 \text{ cm}, 1.1 \text{ cm})$

Equazione parabola traslata: $y = 0,1x^2$

Campo elettrico (E) della seconda parabola: $E = \frac{4y \times \Delta V}{x^2} = \frac{4 \times (0,001\text{m}) \times 1200\text{V}}{(0,01\text{m})^2} = 48\,000 \frac{\text{V}}{\text{m}}$

Campo magnetico seconda parabola: $B = 2,5 \cdot 10^{-3}\text{T}$

Rapporto q/m ricavato dalla conservazione dell'energia utilizzando la seconda parabola:

$$\frac{q}{m} = \frac{2yE}{B^2 \cdot x^2} = \frac{2 \cdot (0,001) \cdot (48000) \text{ C}}{(2,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (0,01)^2 \text{ kg}} = 1,536 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

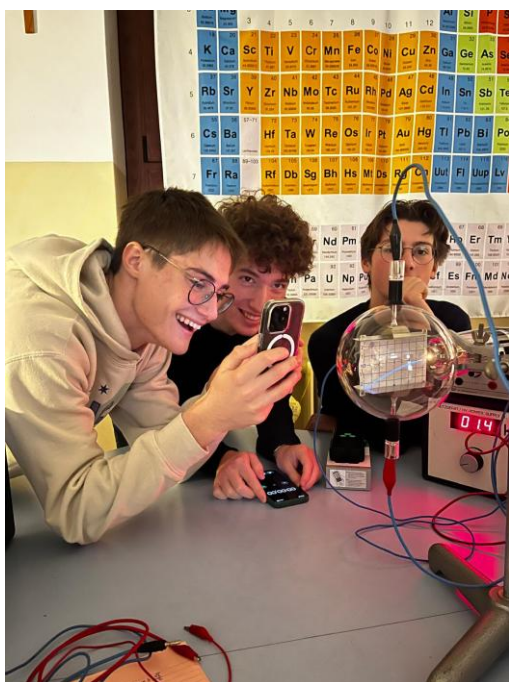
Questo secondo valore si avvicina molto al valore teorico, anche se siamo consci della presenza di molti errori legati alla natura dell'apparato sperimentale.

CONCLUSIONE

Confrontando il valore q/m ottenuto dai nostri calcoli con quelli noti delle particelle siamo riusciti a capire di quali corpuscoli fossero composti i raggi catodici: elettroni. Avevamo già constatato la polarità negativa dei corpuscoli semplicemente osservando l'andamento dei raggi dal catodo all'anodo (si veda esperimento di Crookes), ma solo grazie all'esperimento quantitativo di Thompson siamo riusciti ad identificare questi corpuscoli come elettroni.

Dunque con questo ultimo esperimento abbiamo concluso il nostro viaggio alla scoperta dei raggi catodici, passando per le varie epoche della scienza. Siamo partiti da qualcosa di moderno, un televisore a tubi catodici, trovato per caso in laboratorio, e siamo finiti a ripetere

i primi esperimenti che studiavano proprio quei raggi che avrebbero poi avuto un ruolo importante nello sviluppo tecnologico. Alla scoperta di questi raggi abbiamo fatto esperienza di due modi di fare scienza diversi, differenziati semplicemente dall'avanguardia tecnologica che si è sviluppata negli anni: il modo qualitativo di Crookes, dove bisogna essere spinti da un'innata curiosità e da un ineccepibile spirito di osservazione per poter arrivare a delle conclusioni scientifiche; e il modo quantitativo di Thompson, dove grazie a tecnologie più sviluppate si riescono a condurre studi più confacenti al "metodo galileiano" e dunque utilizzando l'universale linguaggio della matematica per poter descrivere quei raggi. Noi che abbiamo avuto la possibilità di provare entrambi i modi, ci sembrano in realtà complementari: se con Crookes si è fatto uno studio "grezzo" dei raggi catodici, potendo arrivare alla conclusione massima che i raggi catodici sono di natura corpuscolare, di carica negativa e che risentono del campo magnetico; con Thompson questo studio viene meglio definito studiando matematicamente i raggi, potendo arrivare a raccogliere dati come la curvatura della loro deviazione rispetto ad un determinato campo elettrico, fino ad arrivare a calcolare il loro rapporto carica/massa che ci permette di identificare i raggi catodici come flusso di elettroni. Solo con un'apparecchiatura più complicata, come quella di Thompson, con più cablaggi è possibile studiare così nel dettaglio i raggi, qualcosa che fisicamente Crookes non poteva fare per il mancato ausilio della tecnologia. Questo ci porta ad una riflessione sull'importanza e sull'evoluzione tecnologica del laboratorio negli anni, partendo da Crookes per arrivare fino ai giorni nostri. A volte infatti la nostra mente viaggia più veloce delle nostre effettive capacità tecnologiche: esemplare è la convinzione di Einstein che esistessero le onde gravitazionali ma che non fossero sperimentalmente dimostrabili, ed effettivamente non furono dimostrabili fino al 2016 quando un interferometro negli USA (Ligo) non è riuscito a intercettare queste onde gravitazionali. Portando la questione su un piano filosofico, è corretto pensare che l'uomo possa arrivare a conoscere ogni cosa, l'unica cosa che lo frena è la sua capacità tecnologica; dunque se qualcosa non è comprensibile o studiabile adesso è solo perché non possediamo le tecnologie necessarie. Non è infatti trascurabile l'enorme progresso tecnologico dai tempi di Thompson ai giorni nostri, anche per condurre questi esperimenti storici noi abbiamo potuto fare affidamento su tecnologie che né Crookes né Thompson avevano a disposizione: banalmente anche un computer per poter visualizzare le curvature delle parabole da noi calcolate o un tubo di Thompson che fosse "standardizzato" e che dunque fosse il più preciso possibile. Anche noi abbiamo avuto delle limitazioni dal punto di vista tecnologico, se così non fosse stato il nostro studio dei raggi catodici poteva andare molto più a fondo, ma solo la tecnologia ci impedisce di proseguire ulteriormente il nostro viaggio alla scoperta dei raggi catodici.



In conclusione, tramite lo studio dei raggi catodici abbiamo potuto fare un viaggio nella storia della scienza, partendo dagli esperimenti del primo '900 di Crookes. Questo studio è stato un viaggio lungo, durato mesi, dove ci siamo fatti trascinare dalla curiosità e l'adrenalina che la curiosità porta con sé quando si scopre qualcosa di nuovo, nel nostro caso non nuovo per il mondo ma nuovo per noi. Nonostante il nostro laboratorio fosse più sviluppato tecnologicamente rispetto a quello di Crookes e di Thompson anche noi abbiamo avuto le nostre difficoltà: momenti in cui eravamo sul punto di abbandonare quell'esperimento perché troppo complicato, momenti in cui i calcoli non tornano, momenti in cui semplicemente non capivamo quello a cui stavamo assistendo; ma tutto questo fa parte del viaggio che è stato soprattutto contornato di curiosità, di risate e di mutua assistenza, perché quello che ha reso il nostro viaggio ancora più bello è il fatto che è stato fatto insieme.

SITOGRAFIA

newworldencyclopedia.org/2Grokikipedia/2

newworldencyclopedia.org/1

https://journals.viamedica.pl/nowotwory_journal_of_oncology/article/view/NJO.2017.0013/41329

#463 [TELEVISORE a TUBO CATODICO SMONTIAMOLO SUBITO! — YOUTUBE](#)

<https://www.britannica.com/biography/Jean-Perrin>

-

<https://www.amazon.it/3B-Scientific-U18554-Tubo-Perrin/dp/B07D3L8KQC>

BIBLIOGRAFIA

Bocci, Malegori, Milanese, Toglia "FISICA: I colori dell'Universo" 4°
Anno Dea Scuola
Fabbri, Masini "FTE green 2" Sei editrice

