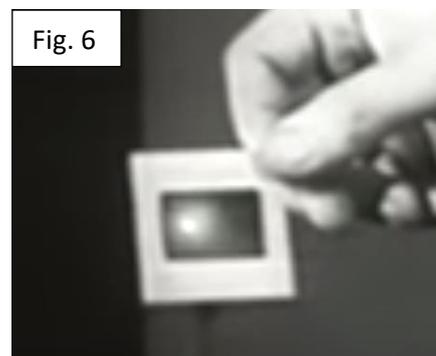
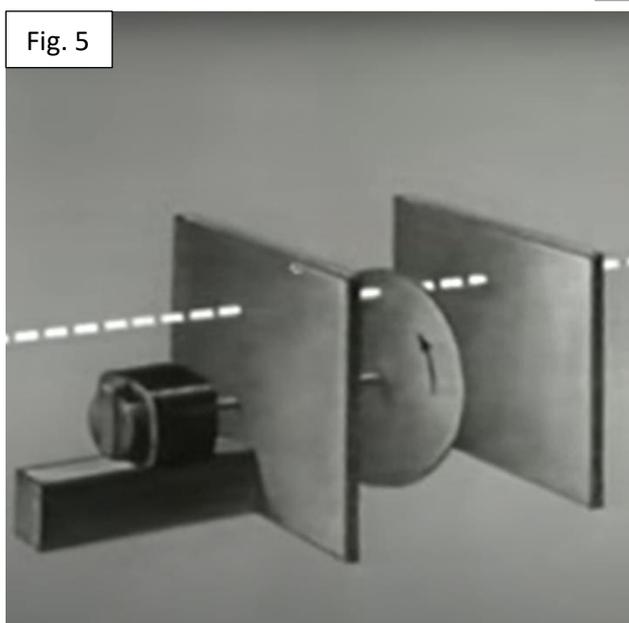


VERIFICA ESISTENZA DEI FOTONI

MATERIALE

- Cellula fotoelettrica [fig.1]
- Fotomoltiplicatore [fig.2]
- Amperometro [fig.3]
- Oscilloscopio [fig.4]
- Per raffreddamento fotomoltiplicatore: ghiaccio secco e alcol
- Lampadina
- Otturatore (disco girevole con piccolo foro) [fig.5]
- Filtri (tre diverse intensità) [fig. 6]



PREMESSA TEORICA

- FOTONE:

Il termine fotone deriva dal greco e fu introdotto per la prima volta da Gilbert Lewis nel 1926. **Il fotone è associato ad ogni radiazione elettromagnetica.** Pur essendo un fenomeno ondulatorio, la radiazione elettromagnetica ha anche una natura quantizzata che le consente di essere descritta come un flusso di fotoni.

Pur non avendo massa, è **influenzato dalla gravità e possiede energia**; nel vuoto si muove alla velocità della luce ($c=300000 \text{ km/s}$ circa), mentre nella materia si comporta in modo diverso e la sua velocità può scendere al di sotto di c .

L'energia dell'onda elettromagnetica emessa è: $E = E_i - E_f$. Dal momento che sia E_i sia E_f possono assumere solo valori ben definiti, l'energia della radiazione elettromagnetica emessa dall'atomo non può avere qualsiasi valore, ma solo quantità discrete, dette quanti di energia: i fotoni. Quindi la materia è in grado di emettere o assorbire energia raggiante solo sotto forma di pacchetti energetici. Einstein calcolò l'energia associata ad ogni fotone e vide che era proporzionale alla frequenza dell'onda elettromagnetica.

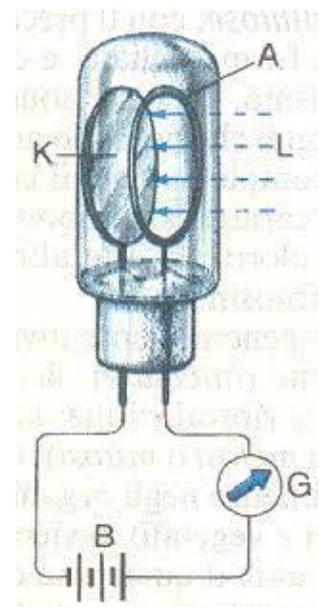
I fotone mostra una duplice natura, sia corpuscolare, sia ondulatoria. L'esperimento dell'**effetto fotoelettrico** (quel fenomeno per cui si ha emissione di elettroni da parte di un corpo colpito da onde elettromagnetiche) suggerisce la natura corpuscolare della luce.

Un elettrone dovrebbe avere, in ogni istante, posizione e velocità ben definite; ma la fisica quantistica ci dice che una precisione in osservazioni di questo tipo non può essere ottenuta, e ci suggerisce che il moto può essere descritto come un'onda. **Il dualismo onda-particella era considerato paradosso fino all'introduzione completa della meccanica quantistica**, che descrisse in maniera unificata i due aspetti. La radiazione si comporta come un'onda quando si propaga nello spazio, mentre si comporta come particella quando interagisce con la materia. Si introducono quindi nuove quantità e notazioni: un'onda elettromagnetica di lunghezza d'onda λ percorre una distanza di c metri ogni secondo. La sua frequenza ν , cioè il numero di oscillazioni in su e giù ogni secondo, si può ottenere dividendo c per la lunghezza d'onda: $\nu = c / \lambda$. Una legge fondamentale della fisica quantistica dice che l'energia E in joule di un fotone di frequenza ν è: $E = h\nu$, dove $h = 6,624 \cdot 10^{-34}$ joule-sec è la "costante di Planck".

- CELLULA FOTOELETTRICA:

è un'ampolla di vetro nella quale è praticato un vuoto spinto per evitare fenomeni di ossidazione. L'ampolla possiede, all'estremità, due elettrodi di metallo terminanti con serrafili a vite e contrassegnati da un "+" e da un "-" che fungono rispettivamente da anodo e da catodo. Una parte della parete interna della cellula è ricoperta da una placca di nichel argentato sulla quale è disposto un sottile strato di metallo che comunica con l'esterno tramite un elettrodo saldato nel vetro, collegato a sua volta al catodo.

La cellula viene inserita in un circuito elettrico collegando il suo polo negativo con quello di una batteria di alcune decine di volt il cui polo positivo viene collegato con l'anodo della cellula stessa. Nel circuito non si ha passaggio di corrente in condizione di oscurità in quanto esso risulta aperto tra la placca e il conduttore; se invece si invia alla placca metallica un fascio di raggi luminosi o ultravioletti o raggi X, con lunghezze d'onda minori di un valore limite, detto soglia fotoelettrica, essa emette, per effetto fotoelettrico, elettroni che, attratti dall'anodo, permettono il

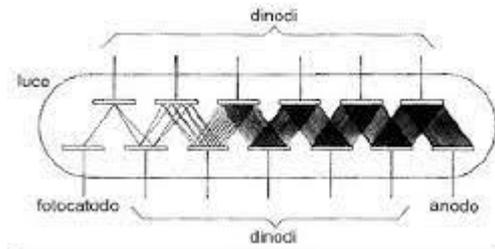


passaggio di corrente. La soglia fotoelettrica è una caratteristica della radiazione e dipende dal tipo di metallo depositato sulla placca. L'intensità della corrente di elettroni cresce al crescere dell'intensità di illuminazione fino a che non si raggiunge la corrente di saturazione.

- FOTOMOLTIPLICATORE

Il fotomoltiplicatore serve ad amplificare la corrente elettrica in risposta a sollecitazioni di natura luminosa. E' costituito da un tubo in vetro al cui interno è stato praticato il vuoto, in cui è presente un anodo e diversi elettrodi che costituiscono i diodi, il funzionamento del fotomoltiplicatore si basa principalmente su due effetti: l'effetto fotoelettrico e l'emissione secondaria (cioè l'elettromoltiplicazione).

I fotoni colpiscono attraverso una finestra di ingresso una superficie chiamata fotocatodo, ricoperta di uno strato di materiale che favorisce l'effetto fotoelettrico. A causa di questo effetto vengono emessi degli elettroni, chiamati fotoelettroni che sono focalizzati da un elettrodo verso lo stadio di moltiplicazione.



Questo stadio è costituito da una serie di elettrodi ciascuno caricato ad un potenziale superiore al precedente. Il primo elettrone emesso per effetto fotoelettrico subisce una accelerazione a causa del campo elettrico e acquisisce energia cinetica. Quando l'elettrone colpisce il primo elettrodo del diodo provoca l'emissione secondaria di diversi elettroni di minore energia. La struttura del sistema è progettata in modo che ciascun elettrone emesso da un elettrodo venga accelerato e provoca l'emissione di diversi elettroni dall'elettrodo successivo. Si ha così un fenomeno a cascata per cui un singolo fotone che colpisce il tubo provoca il passaggio di moltissimi elettroni.

ESECUZIONE DELL'ESPERIMENTO E RACCOLTA DATI

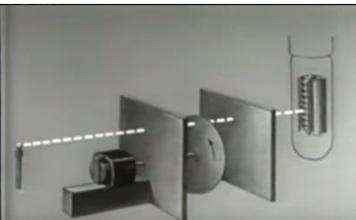
Per provare la natura corpuscolare della luce, è stata usata una cellula fotoelettrica, la quale a contatto con la luce, emette gli elettroni presenti sull'elettrodo. Tuttavia per studiare le particelle della luce è necessaria una luce debole, ma siccome l'intensità di corrente è proporzionale all'intensità della luce che colpisce la cellula fotoelettrica, usando una luce debole anche la corrente sarà debole, per cui sarà necessario amplificarla. Per amplificare la corrente viene usato un fotomoltiplicatore.

Per monitorare la corrente all'interno del fotomoltiplicatore viene usato un microamperometro, il cui compito è appunto quello di rilevare la corrente che entra nel primo stadio e quella raccolta alla fine dal collettore; secondo la teoria la corrente ottenuta dal collettore deve essere 1 milione di volte più intensa di quella iniziale.

Allora si è verificato se quanto detto sia effettivamente vero. Innanzitutto si posiziona la cellula in modo che essa riceva luce, e questo si può verificare semplicemente osservando che l'amperometro segna una certa corrente, ma se si copre la cellula, l'amperometro torna a zero.

Tuttavia la luce usata è troppa rispetto a quella necessaria per studiare i fotoni, per cui si inizia ad abbassare l'intensità luminosa ricevuta dalla cellula banalmente spegnendo delle luci che illuminano la stanza. A questo punto si può leggere dall'amperometro che la corrente rilevata nel primo stadio è di $5 \cdot 10^{-11} \text{A}$. A questo punto si misura la corrente uscente cambiando gli attacchi e collegandoli appunto all'uscita dell'amplificatore; e con la stessa intensità di luce si nota che bisogna abbassare l'amperometro di 6 potenze di 10 per ottenere la stessa corrente iniziale. Se ne conclude che effettivamente l'amplificazione è di circa 1 milione.

A questo punto bisogna verificare lo scopo originario, ovvero se la luce sia o meno composta da particelle. Dunque spostiamo l'uscita del fotomoltiplicatore sull'entrata dell'oscilloscopio; a questo punto si può monitorare l'attività della luce percepita dalla cellula osservando l'oscilloscopio. Se si copre la cellula con una mano e si toglie bruscamente per far passare la luce, si può appunto osservare sull'oscilloscopio gli impulsi che derivano dalla luce. Tuttavia questo rappresenta l'uscita degli elettroni dal collettore, ma non definisce necessariamente che la luce sia formata da particelle. Prima di procedere con l'esperimento bisogna considerare che questo, come tutti gli esperimenti di fisica d'altronde, presenta degli errori sperimentali come ad esempio il fondo, che si può notare ad esempio comprendo il fotomoltiplicatore totalmente con un panno nero e però si notano sull'oscilloscopio degli impulsi a intensità e con una frequenza bassa. Questo errore si può limitare raffreddando il fotomoltiplicatore: si mette l'apparecchio dentro a un cilindro di plastica e si immerge in una ciotola contenente ghiaccio secco e alcol.



A questo punto può iniziare il "vero" esperimento. Consideriamo una sorgente di luce artificiale, un oscuratore, ovvero un disco nero con un piccolo foro; ogni volta che il disco fa un giro, questo foro coincide con uno delle stesse dimensioni sulla piastra e in quell'istante passa la luce. Il disco viene fatto girare da un micromotore.

L'esperimento inizia facendo partire i due fori allineati, in questo modo l'amperometro segna il valore massimo, il quale tuttavia è troppo per il tipo di esperimento che stiamo facendo, per cui è necessario ridurre l'intensità luminosa; ma prima di fare questo viene inserito uno schermo che elimini la luce diffusa e viene poi inserito un filtro che riduce l'intensità luminosa di fattore da 1 a 100, ma prima segniamo il valore di corrente iniziale ($3 \cdot 10^{-4} \text{A}$) e poi quello successivo all'inserimento del primo filtro ($4 \cdot 10^{-6} \text{A}$). Dopodiché aggiungiamo un secondo filtro, dello stesso tipo del primo, e osserviamo che la corrente si è abbassata a $5 \cdot 10^{-8} \text{A}$. A questo punto concludiamo la prima parte di esperimento inserendo anche il terzo filtro, con il quale la sensibilità è talmente alta che l'indicatore dell'oscilloscopio non è in grado di segnare un valore preciso, ma approssimativamente si può dire che la corrente sia di $3 \cdot 10^{-10} \text{A}$. La corrente rivelata è quella uscente dal fotomoltiplicatore, per cui quella che entra sarà di circa $3 \cdot 10^{-16} \text{A}$, ovvero 1 elettrone in 2 millesimi di secondi. Se la luce fosse sfusa, bisognerebbe aspettare tutti e due i millesimi di secondi per ottenere un elettrone, se invece è "distribuita" in particelle, si può rilevare un elettrone appena l'otturatore viene aperto.

Allora concludiamo l'esperimento. Dopo aver tolto i filtri, aver avviato nuovamente il micromotore e sincronizzato la traccia dell'oscilloscopio catodico con la rotazione del disco, così da poter vedere

l'impulso del periodo di apertura sempre nello stesso punto, si calcola il periodo dell'impulso luminoso; per fare ciò basta semplicemente misurare il foro del disco (5 millesimi di secondi); viene accorciata la traccia così da poter vedere l'impulso più chiaramente. A questo punto si possono reintrodurre i filtri uno alla volta, in modo tale da poter vedere l'effetto degli elettroni più chiaramente. Però solo inserendo il secondo filtro si iniziano a distinguere i singoli impulsi.



Tuttavia è solo inserendo il terzo filtro che l'intensità luminosa è così bassa da poter osservare 1 elettrone ogni 2 millesimi di secondi in media, per cui può capitare di vederne solo 1 o anche di più. Inoltre non solo si vede un impulso in meno di 5 millesimi di secondi, ma anche appena si apre l'otturatore. Per cui si prova a bloccare alcuni impulsi, in maniera totalmente casuale, e si misura il momento in cui è capitato. Più volte l'impulso è capitato a 6 microsecondi dopo che l'otturatore si è aperto.

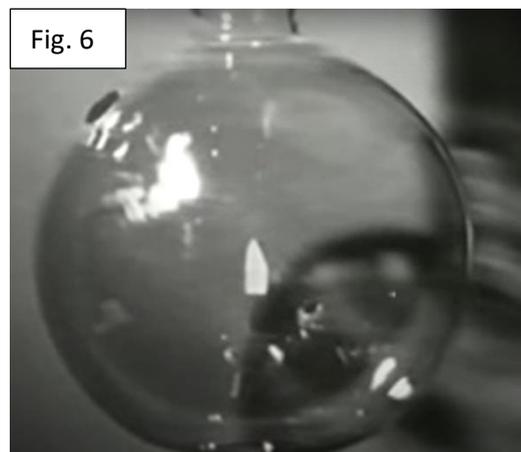
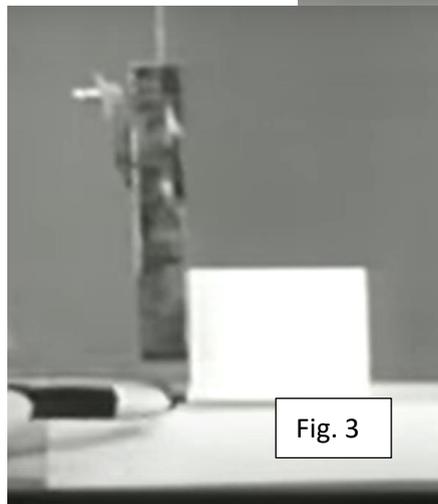
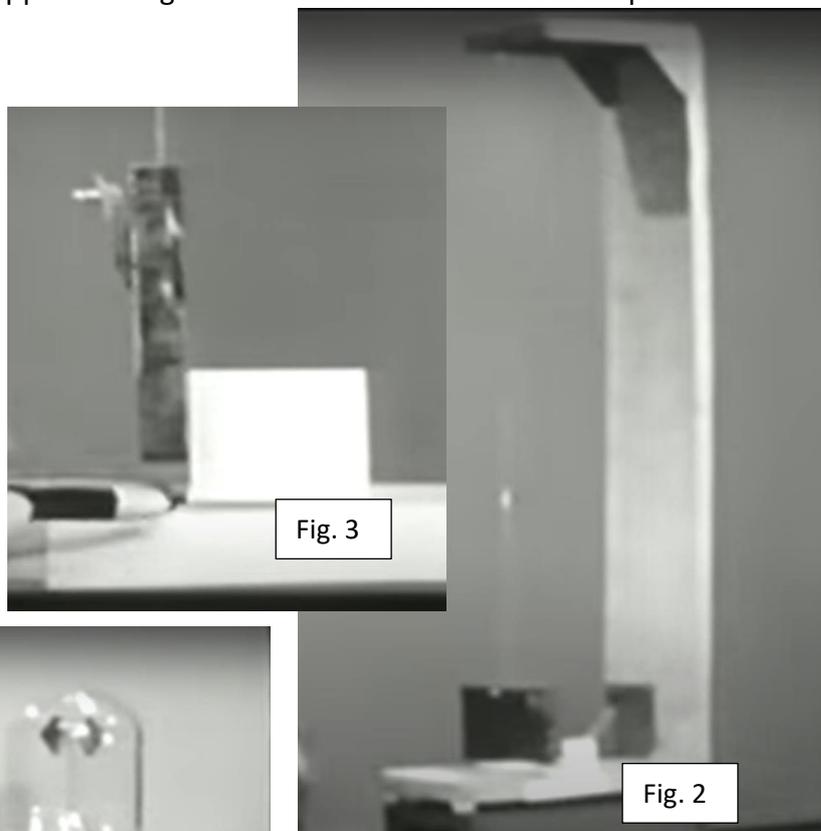
CONCLUSIONI

Detto ciò, nonostante la presenza di alcuni errori sperimentali, come il fondo, che pure è stato limitato raffreddando il fotomoltiplicatore, si può affermare che effettivamente la luce eroga la sua energia in particelle.

VERIFICA SPERIMENTALE DELLA PRESSIONE DELLA LUCE

MATERIALE

- Faro con fascio di luce (abbastanza focalizzato) [fig.1]
- Piastra d'acciaio appesa a un filo cosparsa da grasso su una parte [fig.2]
- Foglietto di carta piegato (segnalino) [fig.3]
- Radiometro di Crookes [fig.4]
- Radiometro "fatto in casa" (composto da barometro elettrico, pompa elettronica, sfera d'acciaio) [fig.5]
- Filo d'acciaio sottilissimo con appeso un foglietto di alluminio contenuto in ampolla di vetro con vuoto [fig.6]



PREMESSA TEORICA

La luce viene associata a uno sciame di particelle, come se fossero delle pallottole sempre in movimento. Come delle pallottole la luce dovrebbe essere capace di imprimere una pressione di spostare, anche se impercettibilmente, un altro corpo. Per dimostrare quella che venne chiamata pressione di radiazione Crookes elaborò uno strumento chiamato radiometro di Crookes

Radiometro di Crookes:

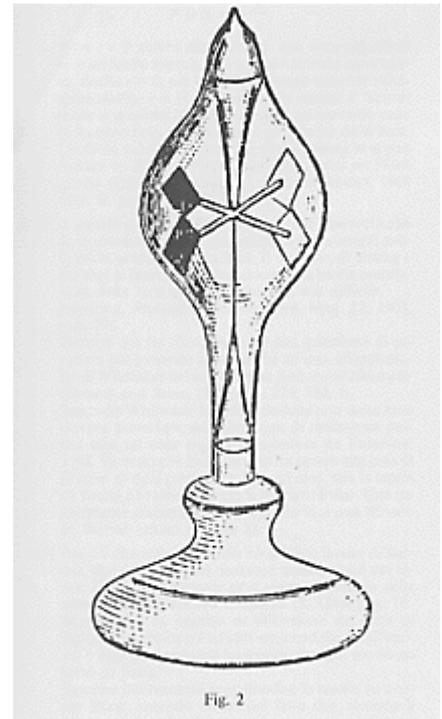
Nel 1874 W. Crookes pubblica il saggio "Attrazione e repulsione risultanti dalla radiazione. Crookes afferma di essere riuscito a mostrare l'esistenza della pressione di radiazione con un apparato, il radiometro, da lui costruito. Si tratta di questo: delle palette molto leggere, una faccia delle quali è stata annerita mentre l'altra è argentata, sono fissate ad un piccolo cono di vetro. Quest'ultimo è sospeso su una punta sottile, in modo che il sistema possa ruotare liberamente. Il tutto è chiuso in un recipiente di vetro in cui è stato fatto il vuoto (con dei residui di gas). Quando della luce è diretta verso le palette, esse si mettono a ruotare.

O. Reynolds, nel 1875, mise in dubbio le conclusioni di Crookes, alle quali sembravano aderire tutti i maggiori studiosi dell'epoca. Secondo Reynolds il movimento delle palette del radiometro era dovuto al diverso effetto del riscaldamento sulle molecole di gas che si trovano vicine alle facce argentate ed annerite delle palette. Il fenomeno si realizzava solo quando c'era un piccolo numero di molecole residue nel contenitore.

In seguito fu Shuster che sospese l'intero radiometro ad un filo sottile, in modo che l'intero apparato fosse libero di ruotare. Se l'effetto era originato dall'interazione tra le palette ed il gas, per il terzo principio della dinamica le molecole di gas dovevano muoversi in direzione opposta a quella delle palette; conseguentemente l'intero radiometro doveva ruotare in direzione opposta a quella delle palette. Viceversa, se l'effetto era dovuto alla pressione di radiazione, la reazione si sarebbe dovuta esercitare sulla radiazione uscente dal radiometro; conseguentemente l'intero radiometro doveva ruotare nella stessa direzione delle palette. L'esperienza mostrò una debole rotazione del sistema in direzione opposta a quella delle palette: l'effetto non era dovuto alla pressione di radiazione.

Nel 1887 H. Hertz mostra sperimentalmente l'esistenza delle onde elettromagnetiche predette da Maxwell. Mostra inoltre, insieme ai lavori di A. Righi, che esse si comportano come la luce nell'ottica ordinaria. Sembra che ormai non ci siano più dubbi sulle teorie di Maxwell. In questo momento si fanno più intensi i tentativi di cercare quella pressione di radiazione che è ulteriore conseguenza della teoria di Maxwell.

Dopo un lavoro durato ben tre anni fu il fisico russo Lebedev che riuscì a fornire una esperienza che mostrava inequivocabilmente l'esistenza di una pressione di radiazione. Le tecniche sperimentali si erano sempre più affinate, si disponeva di sorgenti luminose sempre più



potenti, era stata realizzata la pompa da vuoto al mercurio che spingeva a vuoti precedentemente impensabili. Sta di fatto che Lebedev riuscì nell'impresa della quale comunicò i risultati nel 1899 e pubblicò il resoconto nel 1901 sulla prestigiosa *Annalen der Physik*.

L'esperienza di Lebedev può essere descritta molto in breve nel modo seguente. Dentro un contenitore di vetro a forma sferica era sospesa, ad un sottile filo di vetro, un'asticciola orizzontale alla cui estremità era fissato un disco (diametro 5 mm) di un dato materiale (platino, alluminio, nickel). Nel contenitore veniva fatto un vuoto molto spinto e la luce di una lampada ad arco era inviata, dopo opportuna focalizzazione, sul piccolo disco. In queste condizioni, il disco risultava spinto, di un poco, indietro. L'effetto era visualizzabile e misurabile attraverso la deformazione del filo di vetro che sosteneva il disco. Una volta spostato, il disco, almeno finché su di esso continuava a cadere la luce, rimaneva in quella posizione; una volta eliminata la sorgente di radiazione, esso tornava al suo posto iniziale. La misura di questo spostamento permise a Lebedev di risalire alla pressione di radiazione che, nei limiti degli errori sperimentali, risultava in perfetto accordo con i dati teorici di Maxwell.

Seguirono altre esperienze nei primi anni del '900 che avvallarono la veridicità delle teorie secondo cui la luce ha una pressione.

ESECUZIONE DELL'ESPERIMENTO E RACCOLTA DATI

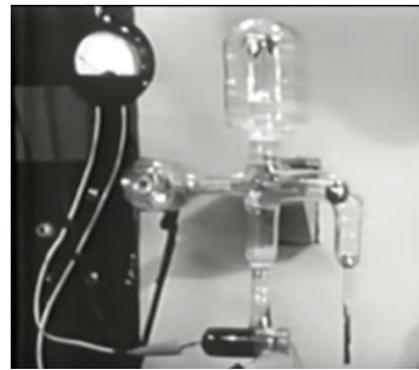
Con questa esperienza si vuole dimostrare l'esistenza della pressione della luce, per cui si inizia con l'esperienza più semplice che esista: si consideri uno specchietto posizionato verticalmente, in piedi su un lato, e si illumina con la luce di un proiettore di automobile da 20watt. Se si tiene la luce riflessa sul tavolo davanti allo specchietto, questo non cade, a differenza ad esempio se ci soffiama sopra; per cui la pressione della luce deve essere un fenomeno molto sensibile.

Allora consideriamo uno strumento fatto apposta per misurare la pressione della luce, il radiometro di Crookes; questo è formato da una ampolla contenente circa il vuoto (questo coincide circa a 1 milionesimo di atmosfera) e un mulinello con quattro pale, con un lato chiaro e uno scuro, appoggiate su una puntina sottile. Secondo Crookes il suo strumento funzionava perché la luce che colpisce il lato nero delle palette viene assorbita, mentre quando colpisce la parte chiara viene riflessa, di conseguenza ci sarà una spinta maggiore dalla parte bianca.

Nelle premesse si diceva che si considera la luce come uno sciame di pallottole, per cui osservando il comportamento delle pallottole, si dovrebbe dedurre di conseguenza quello delle particelle della luce. Si consideri una piastra di acciaio appesa ad un filo, questa è coperta da grasso nell'angolo superiore destro, mentre quello inferiore sempre destro è pulito. Si posiziona un foglietto di carta dietro alla piastra e si segna il punto di inizio; di conseguenza sparando prima sull'angolo sporco di grasso e poi su quello pulito, si può confrontare di quanto la piastra si muove in ognuno dei due casi. Di conseguenza quando la pallottola colpisce l'angolo pulito, essa viene riflessa e l'angolo di apertura è maggiore, rispetto a quando la pallottola colpisce il grasso, la cui energia viene in parte assorbita. Questo era proprio quello che Crookes era convinto succedesse nel suo radiometro. Tuttavia se si osserva con maggiore attenzione il radiometro, le palette girano nel senso di quelle nere che seguono quelle lucide, cioè nel senso opposto a quello definito dalla teoria.

Allora, per osservare meglio il fenomeno proviamo a usare una sorta di radiometro fatto in casa. Esso è costituito da un barometro elettronico, una pompa elettronica, sopra alla quale è posta

una sfera d'acciaio; spostando la sfera, con l'ausilio di un magnete, nella parte superiore del tubo di vetro, si apre il tubo inferiore e questo permette alla pompa di estrarre il gas dal radiometro, così da ottenere all'interno una pressione di circa 4 milionesimi di atmosfera. A questo punto si prova a proiettare la luce, dello stesso proiettore d'automobile usato all'inizio, e si nota che appunto le pale girano. Ora però 4 milionesimi di atmosfera sono relativamente tanti, per cui si procede a spostare la sfera d'acciaio per migliorare il vuoto, e si procede proiettando nuovamente la luce su di esso. Si nota ora che le palette non girano minimamente. Questo ci spiega il motivo per cui le pale girano nel senso opposto rispetto a quello che si aspettava Crookes: è la pressione del gas interno a muovere le pale.



Il nostro obiettivo era però verificare la pressione della luce, non del gas. Di conseguenza abbiamo bisogno di uno strumento notevolmente più sensibile, rispetto a quelli usati in precedenza durante questa esperienza. Consideriamo un filo molto sottile, tirato in alto da quarzo fuso. Appeso al suo estremo inferiore vi è attaccato un foglietto di alluminio; questo è contenuto in una ampolla di vetro, al cui interno vi è un vuoto migliore rispetto a quelli considerati in precedenza. In basso il sistema è collegato a una pompa elettronica. Con questo strumento inoltre si vuole eliminare quanto possibile gli errori sperimentali più significativi: in primo luogo l'attrito, infatti il foglietto è attaccato esclusivamente a un filo che tra l'altro ha diametro di 1 decimo di quello di un capello umano; in secondo luogo con questo sistema si vogliono limitare al massimo i problemi legati alla presenza del gas, infatti la paletta è così sottile che la temperatura sulle due facce è la stessa in un

tempo brevissimo; le facce di essa inoltre sono entrambe lucide, per cui non c'è differenza nel loro riscaldamento; infine è stato eliminato in modo talmente tanto accurato il gas presente, che quella minima percentuale risulta trascurabile. A questo punto si può procedere con l'ultimo esperimento: prendiamo sempre lo stesso proiettore da 20watt e lo puntiamo intensamente su una faccia intera del foglietto, si può notare che non succede nulla e il movimento di essa è molto limitato. Se invece si prova a illuminare solo l'estremo destro del foglietto, possiamo notare che questo gira; quando la faccia torna dritta verso di noi si punta nuovamente la luce solo sull'estremo destro, così da spingere sempre dallo stesso lato. Spingere, perché appunto il foglietto riesce a girare grazie alla pressione della luce.



CONCLUSIONI

In conclusione, questo esperimento non serve solo a verificare la pressione della luce, ma anche a calcolarla, infatti se si misurano le oscillazioni (ovvero il numero di spinte che servono per far arrivare il foglietto a una certa ampiezza), conoscendo la massa e le grandezze della paletta, si può appunto calcolare la pressione della luce in maniera diretta. Essa risulterà, nel nostro caso, con la luce di una lampada da 20watt di 10^{-9} atmosfere.