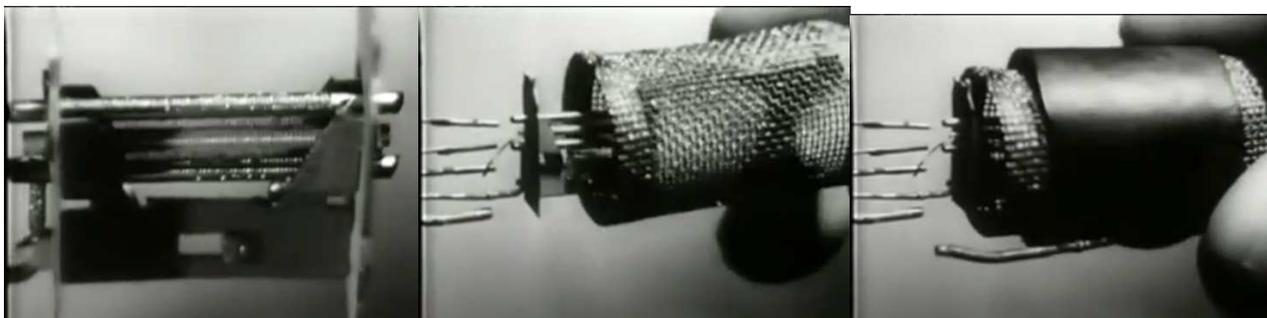


# RELAZIONE DI LABORATORIO SULL'ESPERIENZA DI FRANCK E HERTZ

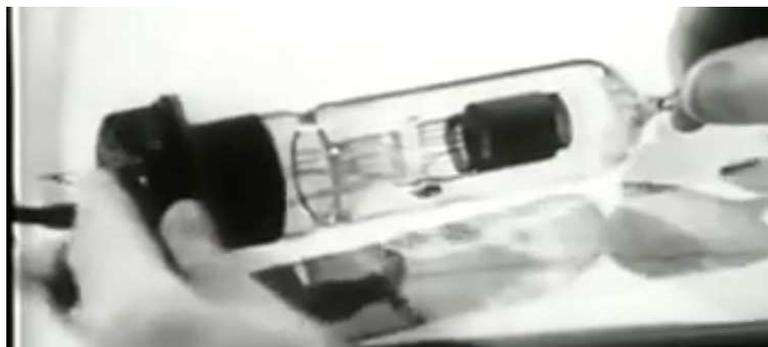
**MATERIALE UTILIZZATO:** disco a ghiaccio secco, pallina da ping pong, tubo a vuoto, amperometro, voltmetro, mercurio.

## *Tubo a vuoto*

Il tubo a vuoto utilizzato contiene tre elettrodi: un catodo cilindrico su cui è avvolto ad elica un filo molto sottile (griglia di controllo), una griglia di accelerazione e un anodo, collegato ad un elettrometro che conterà gli elettroni rilevati. Il catodo è acceso da una batteria a 6V, che farà evaporare elettroni da esso. Sul catodo si avvolge la griglia di controllo, sulla quale è inserita una seconda griglia cilindrica (appunto la griglia di accelerazione) e infine un anodo metallico, concentrico con la seconda griglia.



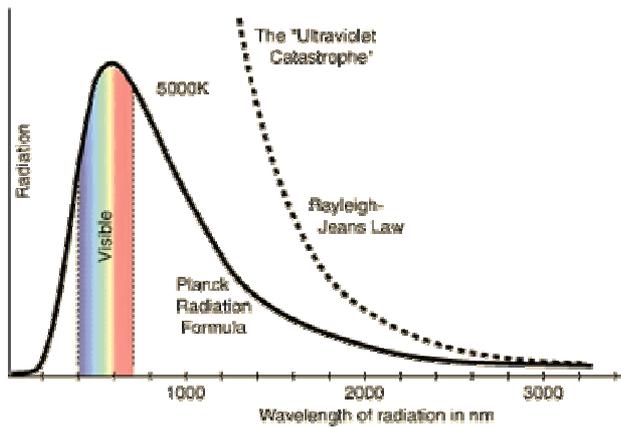
All'interno del tubo vi è anche una grossa goccia di mercurio, elemento che si vuole analizzare nell'esperimento.



**PREMESSA TEORICA:** L'esperienza di Franck e Hertz si colloca in una branca della fisica sviluppata all'inizio del ventesimo secolo, che prese il nome di meccanica quantistica. Vediamo nel dettaglio quale fu il percorso che portò alla sua moderna formulazione.

## *La teoria dei quanti*

La teoria dei quanti ebbe origine dalle osservazioni di Raleigh e Jeans, i quali, studiando lo spettro di corpo nero, si accorsero che le frequenze emesse da quest'ultimo non accennavano affatto a diminuire dopo un punto critico, bensì continuavano ad aumentare a dismisura, dando origine a raggi ultravioletti, raggi X e infine raggi  $\gamma$ .



Questo fenomeno venne successivamente battezzato “catastrofe ultravioletta” (ma era ovviamente impensabile che il modello da essi formulato fosse corretto, altrimenti anche un comune forno da cucina lasciato acceso per qualche minuto in più dovrebbe cominciare ad emettere questo tipo di radiazioni mortali).

Nel 1900, un fisico di nome Max Planck, nel tentativo di spiegare in altro modo la radiazione emessa da un corpo nero, introdusse il concetto di quantizzazione dell’energia; cioè ipotizzò che

la radiazione elettromagnetica potesse scambiare energia con la materia solamente tramite “pacchetti discreti”, multipli di un valore fondamentale detto quanto. Di conseguenza formulò l’equazione:

$$E = hf$$

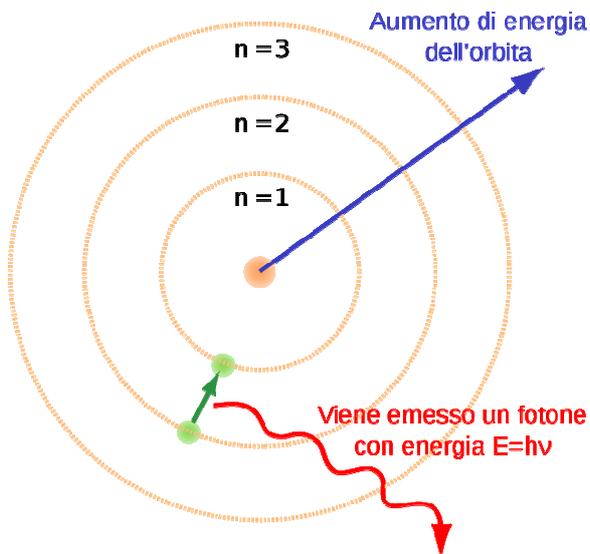
Dove  $h$  è una costante, detta costante di Planck, che corrisponde circa a  $6,626 \cdot 10^{-34}$  Js, e  $f$  è la frequenza della radiazione emessa. La prima conferma dell’esistenza dei quanti venne data pochi anni più tardi, da Albert Einstein che, nel 1905, propose un’interpretazione per un altro fenomeno che non trovava spiegazione secondo le leggi della fisica classica: l’effetto fotoelettrico (su cui si basano le cellule fotovoltaiche, oggi largamente utilizzate all’interno dei pannelli solari). L’effetto fotoelettrico consiste nell’emissione di elettroni da parte di una piastra metallica colpita da radiazione luminosa. L’intensità della corrente dipende da quest’ultima, ma esiste una frequenza minima (detta frequenza di soglia o threshold) al di sotto della quale non si verifica alcuna emissione, indipendentemente dall’intensità della luce incidente. Per spiegare questo fenomeno, Einstein propose a sua volta che la luce viaggiasse sottoforma di quanti, in seguito denominati fotoni, la cui energia è proporzionale alla frequenza secondo la relazione stabilita da Planck. Soltanto quando l’energia di un singolo fotone è maggiore o uguale all’energia che tiene legato l’elettrone all’atomo di metallo, questo viene emesso. Nonostante dovesse trattarsi di un mero artificio volto a rendere più facili i calcoli, la teoria dei quanti risultò efficace nella spiegazione di questi processi e molti altri, tra i quali gli spettri di emissione degli atomi e l’effetto Compton, tant’è che non venne mai più abbandonata e costituisce oggi la base della meccanica quantistica.

### ***La nascita della meccanica quantistica***

Nel 1913, il fisico danese Niels Bohr, propose un nuovo modello di atomo, che non somigliava né a quello di Thomson (tipicamente detto “plumcake”, per il modo in cui secondo Thomson erano disposti gli elettroni ed i protoni, uniche particelle cariche, all’interno di questo, elettricamente neutro), né tanto meno a quello planetario ipotizzato da Rutherford, in cui gli elettroni (caricati negativamente) ruotavano esternamente al nucleo (caricato positivamente), come tanti satelliti di un pianeta. Nel nuovo modello di Bohr, l’atomo era costituito da “livelli energetici”, e cioè da orbite circolari poste intorno al nucleo, ognuna con un proprio valore di energia. In questo modo Bohr fu in grado di calcolare i livelli energetici dell’atomo di idrogeno, dimostrando che in questo sistema un elettrone non può assumere qualsiasi valore di energia, ma assumerà solamente quelli indicati dal numero intero  $n$ , secondo la formula:

$$E_n = \frac{E_0}{n^2}$$

Dove  $E_0$  rappresenta il livello energetico fondamentale, corrispondente ad un valore di circa -13,36eV.



Di conseguenza, gli elettroni possono spostarsi soltanto su queste orbite stazionarie, oppure da un'orbita all'altra. In particolare, per spostarsi da un'orbita più interna ad una più esterna (e quindi più energetica), l'atomo deve trovarsi in uno stadio eccitato: è necessario che si fornisca energia. Ma nella situazione inversa (quando l'elettrone diseccitato torna sul livello energetico più basso) esso emette la differenza di energia sotto forma di onda elettromagnetica, secondo la formula:

$$E = \frac{E_0}{m^2} - \frac{E_0}{n^2}$$

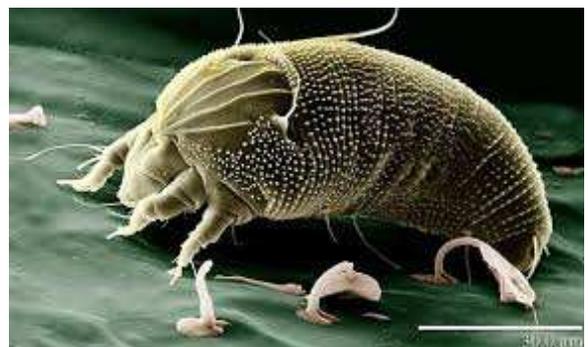
È proprio a questo punto che si inserisce l'esperienza di Franck e Hertz, i quali verificarono sperimentalmente l'esistenza di livelli energetici all'interno dell'atomo. L'esperimento confermò il modello di Bohr e valse ai due il premio Nobel per la fisica nel 1925.

Restava tuttavia da chiarire come mai l'elettrone potesse percorrere solo alcune specifiche traiettorie chiuse. Nel 1924 il fisico francese Louis de Broglie ipotizzò che l'elettrone, oltre ad essere un corpuscolo, avesse anche un comportamento ondulatorio che si manifesta ad esempio in fenomeni di interferenza. In particolare, egli affermò che ad ogni particella potesse essere associata un'"onda di materia" di lunghezza d'onda  $\lambda$ , detta "lunghezza d'onda di De Broglie", pari a:

$$\lambda_{DB} = \frac{h}{p}$$

dove  $h$  è la costante di Planck e  $p$  è la quantità di moto. In questo modo la legge di quantizzazione imposta da Bohr poteva essere interpretata semplicemente come la condizione di onde stazionarie, equivalenti alle onde che si sviluppano sulla corda vibrante di un violino (la funzione d'onda è stata descritta da Schrödinger con l'equazione che porta il suo nome). In ogni caso, l'ipotesi di De Broglie fu confermata sperimentalmente un anno più tardi da Davidsson e Germer. I due fecero passare un fascio di elettroni attraverso un cristallo e raccolsero i risultati su di una lastra fotografica. Ottennero una figura di diffrazione caratterizzata da frange alternativamente luminose e buie, caratteristica dei fenomeni ondulatori. Un'importante applicazione della scoperta di De Broglie è il microscopio elettronico, che sfrutta fasci di elettroni focalizzati da lenti elettromagnetiche per ottenere un ingrandimento maggiore, permettendoci di osservare nel dettaglio anche organismi minuscoli quali acari, virus e batteri.

La formulazione finale della meccanica quantistica avvenne ad opera di tre figure fondamentali: Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg e Paul Dirac. La meccanica di Schrödinger, derivata direttamente dalle constatazioni di De Broglie, divenne nota come meccanica ondulatoria; quelle di Heisenberg e Dirac, relativamente più complicate, sarebbero passate alla storia rispettivamente come meccanica delle matrici e degli operatori.



## ***Gli orbitali atomici e Il gatto di Schrödinger***

Schrödinger fu il primo ad introdurre il concetto di probabilità in fisica, asserendo che la sua equazione non fornisse le orbite degli elettroni in senso classico, bensì determinasse quali fossero le orbite più probabili occupate dall'elettrone. Fu definita in questo modo una regione di spazio, detta orbitale atomico, che rappresenta la regione all'interno della quale è più probabile trovare l'elettrone, in accordo con il principio di indeterminazione formulato da Heisenberg: non si può conoscere con la stessa precisione la posizione e la velocità di una particella quantistica. Per fare un esempio si pensi ad una palla da basket, lanciata con gran forza da un ragazzo contro il muro di una palestra. Ci aspetteremmo che la palla rimbalzi sul muro e torni indietro verso il ragazzo, poiché nella nostra esperienza il fenomeno si è ripetuto sempre uguale. Ma con la sua equazione Schrödinger ci dice che la palla potrebbe rimbalzare sul muro, così come potrebbe penetrarlo, se l'onda di materia da essa generata venisse trasmessa da quest'ultimo. Il motivo per cui nessuno ha potuto osservare un simile comportamento nella palla da basket è che la probabilità che la sua onda di materia venga riflessa è di molto maggiore della probabilità che essa venga trasmessa dal muro. Appunto per le insignificanti probabilità che ciò avvenga, Schrödinger evidenziò come la meccanica quantistica risultasse poco utile e fornisse anzi risultati paradossali se applicata a sistemi macroscopici. Per fare ciò si servì di un esperimento mentale, da lui ideato nel 1935 e passato alla storia come "paradosso del gatto di Schrödinger".



La condizione sperimentale è semplice da descrivere, anche se ne esistono varie versioni. Supponiamo di avere un gatto chiuso in una scatola dove un meccanismo (col quale il gatto non può ovviamente interferire) può fare o non fare da grilletto all'emissione di un gas velenoso. Per entrambe le situazioni la probabilità è esattamente del 50%. Secondo Schrödinger, visto che è impossibile sapere, prima di aprire la scatola, se il gas sia stato rilasciato o meno, fintanto che la scatola rimane chiusa il gatto si trova in uno stato indeterminato; è perciò sia vivo che morto. Solo aprendo la scatola questa "sovrapposizione di stati" si risolverà totalmente in un modo o to-

talmente nell'altro (ovvero solo aprendo la scatola la funzione d'onda collassa su uno dei due stati). Ciò che determina il collasso della funzione d'onda è l'interazione tra il sistema e l'osservatore. Nonostante il paradosso non sia ancora stato risolto, riportiamo le due interpretazioni di maggior rilievo.

1. L'interpretazione di Copenhagen (Copenhagener geißt): formulata sulla base degli studi di Bohr, asserisce che non si possano verificare nello stesso esperimento il comportamento corpuscolare e ondulatorio delle particelle.
2. L'ipotesi multimondi: formulata da Hugh Everett, John Wheeler e Bryce DeWitt, ipotizza l'esistenza di una funzione d'onda universale. In questo modo entrambe le situazioni in cui il gatto è vivo e in cui il gatto è morto sono realizzate. L'osservatore però non può rendersene conto in quanto anch'esso fa parte di uno dei possibili stati dell'universo (uno dei possibili mondi).

## ESECUZIONE DELL'ESPERIENZA:

Non avendo a disposizione il materiale adatto per replicare questa esperienza nel nostro laboratorio scolastico, riportiamo quanto appreso da un video, il cui URL è:

<https://www.youtube.com/watch?v=Ma7z6qzpikU>

Avendo introdotto il concetto di quanto nella premessa teorica, possiamo ora domandarci se sia possibile produrre stati energetici con mezzi che non coinvolgano i fotoni; ad esempio realizzare degli urti tra atomi di mercurio ed elettroni di energia nota, in modo tale che l'atomo, assorbendo energia, possa passare da un livello energetico ad un altro.

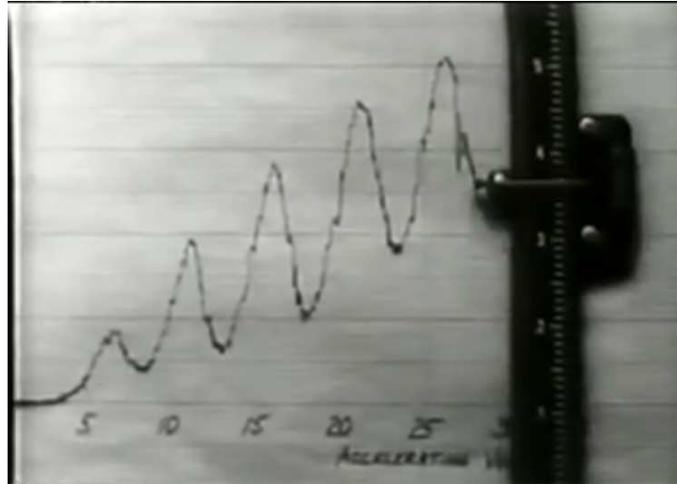
Per rispondere a questa domanda dobbiamo prima fare una considerazione sul tipo di urto che vogliamo realizzare. Il professore utilizza un disco a ghiaccio secco e una pallina da ping pong, anche se la proporzione tra le loro dimensioni è radicalmente diversa da quella di particelle reali. Lanciamo la pallina da ping pong e notiamo che questa torna indietro con la stessa energia con cui l'abbiamo lasciata. Il disco rimane fermo, quindi non è stata trasmessa alcuna energia all'atomo di mercurio. L'urto avvenuto è perciò un urto elastico. Se però cambiamo il modello, aggiungendovi un anello sostenuto da bacchetta, in modo che sia lasciato libero di oscillare, e tiriamo la pallina nello stesso modo, vediamo che questa volta parte della sua energia viene trasferita all'anello, ed essa torna indietro più lentamente.



Abbiamo ottenuto un urto anelastico. Ci aspettiamo quindi, nella nostra esperienza, che l'elettrone abbia lo stesso comportamento della pallina, cioè subisca un urto elastico se lento, mentre se riuscissimo ad accelerarlo fino alla giusta velocità, cioè se riuscissimo a fornirgli il giusto "pacchetto di energia", l'urto sarebbe anelastico, con cessione di energia dall'elettrone al mercurio. Inseriamo allora il tubo a vuoto in una stufa, che lo scalderà fino ad una temperatura di  $160^{\circ}\text{C}$ , dimodoché la goccia di mercurio possa evaporare e diffondersi sotto forma di gas in tutto il tubo, condensarsi sulle parti fredde e riscendere giù verso la goccia.

L'accelerazione degli elettroni potrà essere controllata e regolata tramite una tensione variabile; inoltre, faremo in modo che soltanto gli elettroni con energia superiore a 1 eV passino dalla seconda griglia e giungano all'anodo. Misureremo la corrente nel tubo al variare della tensione acceleratrice (che leggeremo su di un voltmetro con fondo scala 30V) e la corrente anodica sull'elettrometro. Ciò che ci aspettiamo è che inizialmente, quando cominceremo ad aumentare la tensione, non ci sia corrente, ma poi man mano che la lancetta del voltmetro sale, anche la lancetta dell'ampmetro farà lo stesso. Ecco che la nostra previsione rispecchia esattamente quello che accade: finché gli elettroni avranno una certa energia compiranno solamente urti elastici con gli atomi di mercurio, rimbalzando via e superando la barriera di potenziale. Tuttavia, man mano che la tensione acceleratrice aumenta, gli elettroni avranno la giusta quantità di energia per compiere urti anelastici, rimbalzeranno via più lenti, cedendo la loro energia al mercurio. In questo modo non riusciranno più ad ol-

trepassare la seconda griglia e non verranno selezionati nella conta dell'amperometro. Si avrà così una caduta di potenziale, visibile dall'abbassamento verso il basso della lancetta dell'elettrometro. Più si aumenta la tensione più cadute saranno visibili. Arriviamo fino alla tensione massima, che per il nostro strumento è 30V. Si ripeta ora la stessa esperienza con un dispositivo automatico in grado di disegnare l'andamento della corrente che stiamo misurando, in funzione della crescita della tensione.



**CONCLUSIONI:** effettuando una misurazione con righello della distanza tra picchi successivi, notiamo che questi hanno una media di circa 4,9eV. Le conclusioni che possiamo trarre sono essenzialmente due:

- abbiamo confermato che l'energia può essere scambiata solo tramite pacchetti discreti, nel nostro caso del valore di 4,9 eV circa;
- confrontando il valore trovato con l'equazione vista all'inizio del video:

$$E = \frac{12397 \text{ eV} \cdot \text{\AA}}{\lambda}$$

Otteniamo che 4,9eV è proprio il risultato di questa equazione, sostituendo alla lunghezza d'onda il valore della riga spettrale corrispondente all'elemento del mercurio. Il pacchetto energetico è quindi uguale all'energia del fotone emesso dalla diseccitazione degli elettroni che tornano al livello energetico inferiore.