

Effetto fotoelettrico

1° file.

L'effetto fotoelettrico fu osservato, inconsapevolmente, da Hertz e deve il suo nome a Righi. Valse il Premio Nobel sia a Lenard (1905) che lo studiò sia ad Einstein (1921) che lo interpretò. Infine, aprì la discussione sull'esistenza o meno dei quanti di luce, introdotti per la prima volta da Planck, per spiegare il comportamento del corpo nero.

Le prime osservazioni sull'effetto fotoelettrico.

Nel 1887 Heinrich Hertz dimostra sperimentalmente sia l'esistenza delle onde elettromagnetiche, sia che la loro velocità è uguale a quella della luce ($c \approx 3,0 \cdot 10^8$ m/s), conferendo, così, validità alla teoria elettromagnetica di Maxwell.

Alcuni degli stessi esperimenti, però, mettono in luce un nuovo e misterioso fenomeno, che metterà in crisi proprio la teoria elettromagnetica della luce aprendo la strada alla **fisica quantistica**.

Infatti Hertz osserva che determinati metalli si scaricano se sottoposti ai raggi X.

L'anno successivo, Augusto Righi osserva, invece, che sottoponendo a radiazione ultravioletta due elettrodi nasce un arco voltaico; battezza tale fenomeno effetto fotoelettrico.

Quattro anni dopo la scoperta dell'elettrone, avvenuta nel 1895 ad opera di Thomson, il fisico tedesco Philip Lenard ipotizza che **le particelle emesse dai metalli colpiti dalla luce sono proprio gli elettroni**.

Quando inizia ad eseguire esperimenti su questo fenomeno, scopre che le condizioni di emissione degli elettroni da parte dei metalli variano da metallo a metallo.

La sorpresa maggiore consiste nel fatto che l'intensità luminosa può aumentare senza, però, produrre aumento nell'energia con cui gli elettroni sono emessi.

Anzi, si scopre che per ogni metallo esiste una particolare **frequenza caratteristica**; se la radiazione incidente è di frequenza inferiore non si osserva nessuna emissione elettronica.

La soglia "fotoelettrica" di zinco e magnesio è nell'UV, quella del sodio nella zona del visibile.

Definizione dell'effetto fotoelettrico.

I risultati sperimentali portano all'individuazione degli elementi caratterizzanti il fenomeno fotoelettrico, che si possono così riassumere:

- 1) gli atomi emettono elettroni solo e solo se la frequenza della radiazione incidente è superiore al valore della soglia fotoelettrica
- 2) l'energia cinetica degli elettroni emessi dipende dalla frequenza della radiazione elettromagnetica incidente e non dalla sua intensità
- 3) il numero di elettroni che fuoriescono in un secondo dipende dall'intensità della radiazione elettromagnetica incidente

La legge dell'effetto fotoelettrico.

L'effetto fotoelettrico è regolato dalla relazione di Einstein. Essa lega l'energia cinetica E_{cin} dell'elettrone fotoemesso alla frequenza f della radiazione incidente:

$$E_{\text{cin}} = hf - hf_0 \quad \text{dove} \quad E_{\text{cin}} = \frac{1}{2} mv_{\text{max}}^2 \quad \text{e} \quad hf_0 = \text{Lavoro di estrazione}$$

Il secondo membro deve essere, comunque, maggiore di zero; sviluppando la disequazione si ottiene che f è maggiore di f_0 , che rappresenta la frequenza minima che la radiazione deve possedere per estrarre l'elettrone dal metallo; **f_0 è la soglia fotoelettrica caratteristica di ogni metallo.**

Einstein formula questa relazione nel 1905 per pura intuizione. Essa si rivela il tentativo riuscito di porre in relazione l'effetto fotoelettrico con i risultati di Planck riguardo l'irraggiamento del corpo nero e la teoria dei quanti di luce.

Einstein utilizza il concetto di quanto di luce ipotizzandolo come capace di comunicare la sua energia **$E = hf$** all'atomo del metallo.

Se l'energia comunicata è superiore al lavoro di estrazione, l'energia in eccesso si ritrova come energia cinetica dell'elettrone emesso.

Einstein interpreta la natura della luce.

Gli esperimenti condotti sull'emissione di elettroni da un metallo per effetto fotoelettrico hanno messo in luce, fin dall'inizio, dei fenomeni non spiegabili con la teoria ondulatoria della luce.

La luce blu, ad esempio, rende gli elettroni più veloci che non la luce gialla, mentre la luce rossa può non causare fotoemissione.

Come scritto sopra, Einstein trova la risposta applicando la teoria dei quanti formulata da Plank nel 1900, che aveva suscitato ben poco interesse nel mondo scientifico perché troppo rivoluzionaria, ma abbracciata senza preconcetti dal fisico svizzero.

Secondo la teoria quantistica il raggio luminoso non è formato da onde che si propagano, ma da "proiettili di luce", successivamente denominati *fotoni*.

Un raggio di luce monocromatico, cioè formato da una sola frequenza, è costituito da fotoni identici che trasportano un'energia proporzionale alla frequenza

$$E = hf \quad h = \text{costante di proporzionalità di Planck}$$

Se si aumenta l'intensità del fascio, allora si aumenta il numero di fotoni, che però mantengono inalterata la propria energia.

L'effetto fotoelettrico viene spiegato in modo semplice:

- 1. ogni elettrone viene espulso in seguito all'urto con un fotone singolo**
- 2. il fotone comunica all'elettrone una ben determinata energia**
- 3. l'aumento dell'intensità luminosa causa un aumento del numero di fotoni e quindi di urti, ma il fotone comunica sempre la stessa energia.**

Per la semplice interpretazione dell'effetto fotoelettrico Einstein ottenne il premio Nobel nel 1921.

È da qui che si fa strada l'idea della doppia natura della luce, che manifesta proprietà corpuscolari o ondulatorie a seconda della situazione in cui si trova.

Bohr sosteneva che gli esperimenti volti a provare la natura ondulatoria della luce non potevano mettere in evidenza la sua natura corpuscolare e viceversa, giungendo a formulare il **principio di complementarità**.

2° file

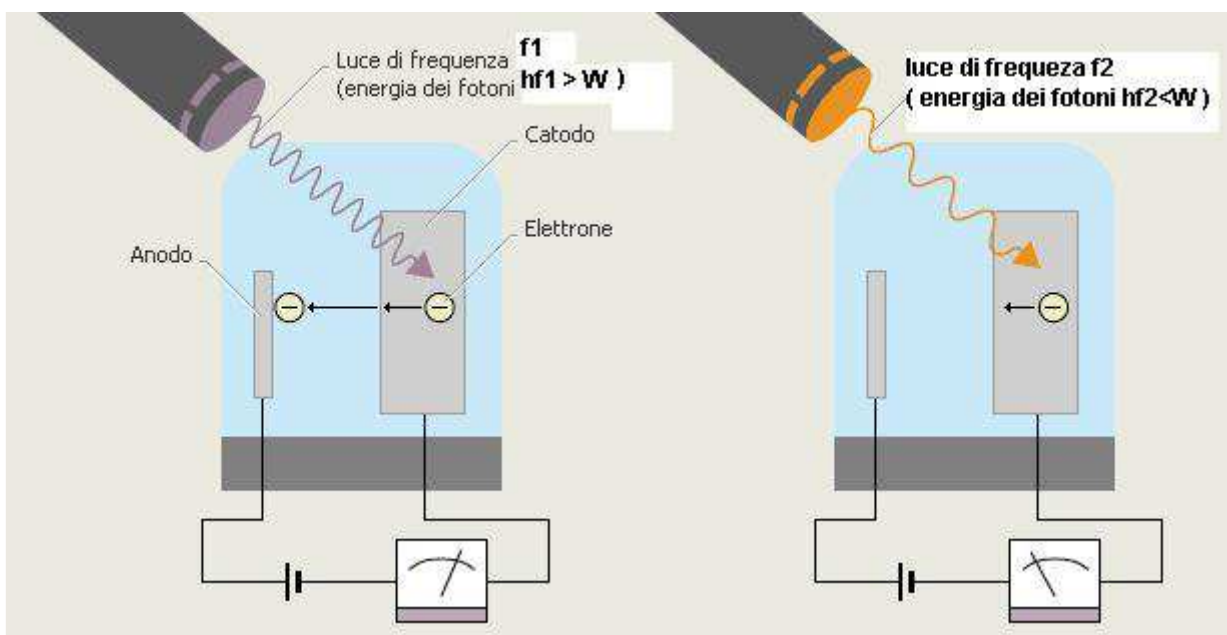
Effetto fotoelettrico

Fenomeno che si manifesta con l'emissione di particelle elettricamente cariche da parte di un corpo esposto a onde luminose o a radiazioni elettromagnetiche di varia frequenza.

Con il termine effetto fotoelettrico si indicano, in generale, diversi tipi di interazioni correlate.

Nel cosiddetto **effetto fotoelettrico esterno** gli elettroni vengono emessi dalla superficie di un conduttore metallico (o da un gas) in seguito all'assorbimento dell'energia trasportata dalla luce incidente sulla superficie stessa. L'effetto è sfruttato nella **cellula fotoelettrica**, in cui gli elettroni emessi da uno dei due poli della cellula, il **fotocatodo**, migrano verso l'altro polo, l'**anodo**, per effetto di un campo elettrico applicato.

Si definisce invece **effetto fotoelettrico interno** quel fenomeno in cui gli elettroni liberati dalla radiazione restano all'interno del materiale, disponibili alla conduzione.



Effetto fotoelettrico:

La radiazione luminosa di frequenza f è composta da particelle corpuscolari (fotoni) di energia $E = hf$ (h è la costante di Planck).

Per riuscire a strappare un elettrone a una superficie metallica, l'energia del fotone deve essere maggiore dell'energia di legame dell'elettrone nel metallo (W), detta anche Lavoro di estrazione. In questo caso, inserendo un amperometro fra anodo e catodo si misura un passaggio di corrente (a sinistra, nell'illustrazione).

Se l'energia del fotone è inferiore a W (a destra, nell'illustrazione) non si ha effetto fotoelettrico, e dunque l'amperometro non registra flusso di corrente.

La caratteristica importante dell'effetto fotoelettrico è di dipendere dalla frequenza della radiazione, che determina l'energia del fotone, e non dall'intensità della luce.

La scoperta dell'effetto fotoelettrico ebbe un ruolo fondamentale nella crisi della fisica classica, che riconosceva alla radiazione elettromagnetica un comportamento prettamente ondulatorio, e nello sviluppo della meccanica quantistica, che introduce il concetto di dualismo onda-particella. L'effetto fotoelettrico era noto dal 1880: si sapeva che la luce poteva far emettere elettroni ad una superficie metallica, producendo una debole corrente. La teoria ondulatoria classica prevedeva però che, all'aumentare dell'intensità della luce incidente, aumentasse l'energia degli elettroni emessi. Nel 1902, il fisico tedesco Philipp Lenard mostrò invece che l'energia posseduta dai fotoelettroni non di-

pendeva dall'intensità di illuminazione, ma unicamente dalla frequenza della radiazione incidente (o, in modo equivalente, dalla lunghezza d'onda λ , essendo $\lambda = v / f$).

L'intensità della radiazione, al contrario, determinava l'intensità della corrente, ovvero il numero di elettroni strappati alla superficie metallica. Il risultato sperimentale era inspiegabile ammettendo che la natura della luce fosse unicamente ondulatoria.

Nel 1905 Albert Einstein spiegò l'effetto fotoelettrico con l'ipotesi che i raggi luminosi trasportassero particelle, chiamate **fotoni**, la cui energia è direttamente proporzionale alla frequenza dell'onda corrispondente. Secondo la teoria formulata da Einstein, incidendo sulla superficie di un corpo metallico, i fotoni cedono parte della propria energia agli elettroni liberi del conduttore, provocandone l'emissione. In questa ipotesi, l'energia dell'elettrone liberato dipende solo dall'energia del fotone, mentre l'intensità della radiazione è direttamente correlata al numero di fotoni trasportati dall'onda, e dunque può influire sul numero di elettroni estratti dal metallo, ma non sulla loro energia.

Il termine effetto fotoelettrico può indicare altri tre processi:

- **la fotoionizzazione**
- **la fotoconduzione**
- **l'effetto fotovoltaico**

(gli ultimi due sono esempi di effetto fotoelettrico interno)

- **La fotoionizzazione** consiste nella ionizzazione di un gas da parte di luce o di altra radiazione elettromagnetica: i fotoni, se dotati di energia sufficiente, liberano uno o più elettroni appartenenti ai livelli energetici esterni degli atomi del gas.
- **Nella fotoconduzione**, gli elettroni facenti parte del reticolo cristallino di un solido assorbono energia dai fotoni incidenti e divengono elettroni di conduzione.
- **L'effetto fotovoltaico** si manifesta invece con la formazione di coppie elettrone-lacuna quando un fascio di fotoni colpisce la superficie di un **materiale semiconduttore**.

In alcuni tipi di transistor quest'ultimo effetto viene sfruttato per provocare una differenza di potenziale in corrispondenza della giunzione tra due diversi semiconduttori.

3° file

L'effetto fotoelettrico e i fotoni di Einstein

Ma cosa sono questi quanti?

PER FOCALIZZARE

Immaginate di esser su una spiaggia, in piena estate, colma di gente distesa a prender il sole. Voi dalla vostra posizione potete lanciare sassolini: tutti delle stesse dimensioni, ma ognuno con una diversa temperatura, sempre più elevata.

Le persone che sono colpite da sassolini freddi si destano un pò, ma non si spostano; a poco a poco però i sassolini diventano più caldi, ed anche la reazione degli sfortunati bersagli cambia : dapprima si alzano lentamente, infastiditi, poi balzano in piedi e cominciano a scappare, sempre più velocemente, fino a quando la temperatura è tale che corrono come un fulmine.

Naturalmente più persone colpite e più gente scappa..

Sicuramente quest'espedito potrà aiutarci ad entrar meglio nell'argomento : l'**effetto fotoelettrico**.

Il fenomeno per cui **alcuni metalli colpiti da un fascio di luce, in particolari condizioni, emettono elettroni**.

A suo tempo si notò che il fenomeno non era legato tanto all'intensità, quanto al "colore" della luce, ossia alla

frequenza delle onde. In altri termini all'energia posseduta dal fascio.

In particolare al di sotto d'una certa frequenza, detta *soglia di emissione*, gli elettroni restavano "imprigionati" nel metallo.

Ma in questo modo, parlando di luce-sassolini, stiamo implicitamente riconoscendo natura corpuscolare alla luce!

Negli anni 20 lo fece Einstein: e queste *particelle di luce* furono battezzati **FOTONI** .

Ed infatti i conti tornano: se i sassolini sono molto caldi la gente scappa più velocemente allo stesso modo se i fotoni sono più energetici gli elettroni emergeranno con una velocità maggiore.

Se aumentate il numero di sassolini lanciati colpirete più persone: se però la temperatura è la stessa avranno tutte la stessa velocità.

Così se la luce è intensa, ossia nel fascio saranno presenti più fotoni, saranno di più gli elettroni emessi. Ma anche in questo caso, a parità di frequenza, avranno tutti la stessa velocità.

FREQUENZA PIU' ALTA ->Maggiore energia minima-> MAGGIORE VELOCITA' "DI FUGA" DEGLI ELETTRONI

MAGGIORE INTENSITA' -> Più "sassolini" ->MAGGIOR NUMERO DI ELETTRONI EMESSI

I fotoni sembrano quindi esser "gli atomi" della luce, i pacchetti di Planck : ognuno infatti trasporta quell'unità minima d'energia...

Non si può scendere sotto la soglia dell'energia minima, come non si può spezzettare un fotone...

La luce indecisa: onda o particella ?

Uno dei più grandi enigmi cui si siano trovati di fronte gli scienziati riguarda la natura della luce:

ONDA O PARTICELLA?

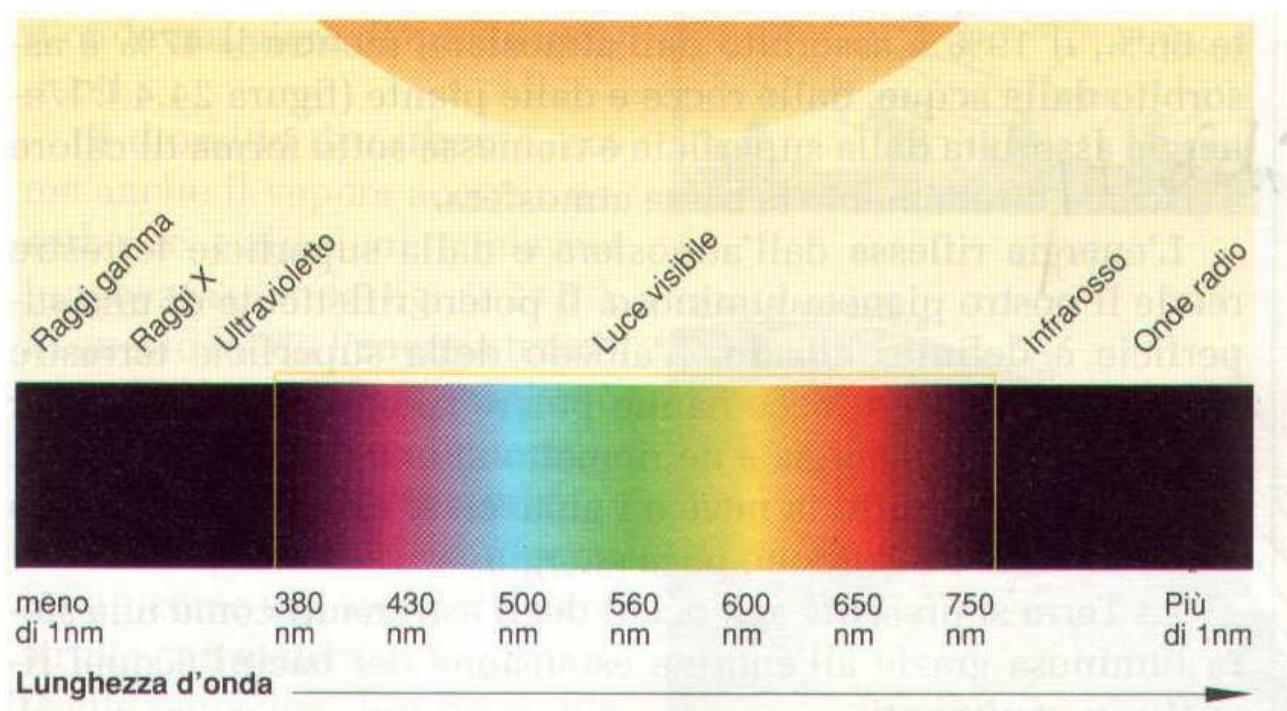
La luce, che sembra così distante dalla materia di ogni giorno, poteva essere costituita allo stesso modo da unità fondamentali, da "atomi "...?

Sembrava di sì e la teoria corpuscolare ebbe un grande successo soprattutto perchè avallata da uno scienziato del calibro di Newton, che riuscì addirittura a costruire un suo arcobaleno...

Ora , grazie agli studi condotti da Einstein sull'effetto fotoelettrico, noi sappiamo effettivamente che queste particelle esistono: sono i **FOTONI**

resta il fatto che normalmente parliamo di "radiazione solare", o comunque della luce in termini di onde : anche la teoria ondulatoria infatti cominciò ad insinuarsi fra le particelle newtoniane, proposta da **Huygens**, un fisico olandese, la cui sfortuna fu anche quella di non poter competere con la fama di Newton : secondo il fisico olandese la luce era costituita da onde di lunghezze differenti:

le radiazioni rosse corrispondevano a lunghezze d'onda elevate, quelle del blu e del violetto a lunghezze d'onda minori... Ed effettivamente oggi anche noi parliamo dello spettro di radiazioni della luce visibile...

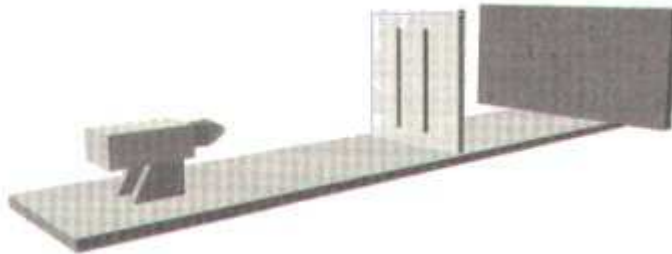


Chi la spunterà ? Newton o Huygens ?

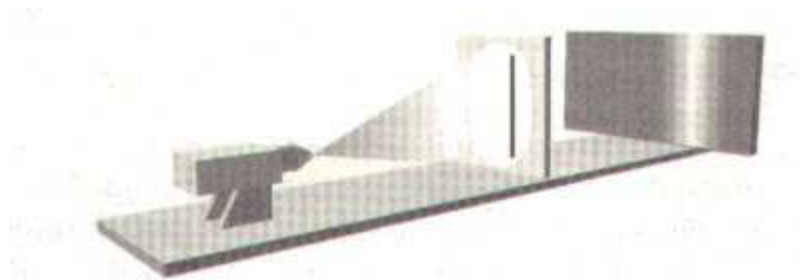
Un esperimento condotto da Young nel 1801 pose fine alla contesa : sarebbe passato alla storia come *l'esperimento delle fenditure* e divenne anche un po' il manifesto della MQ.

L'esperimento delle 2 fenditure

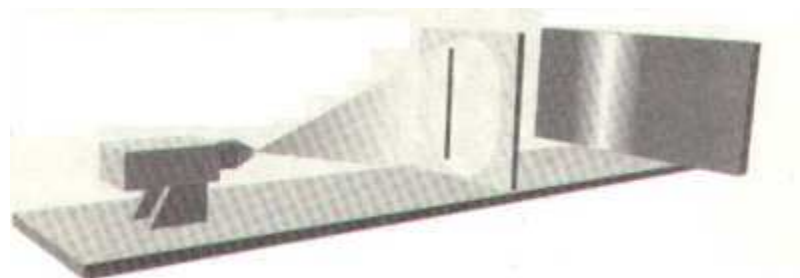
Gli esperimenti condotti da Einstein sembrano quindi far pendere la bilancia a favore della teoria corpuscolare: ebbene ora cercheremo di vedere perché la teoria ondulatoria ha tutto il diritto di restare in gara. Intorno al 1800 Young, un fisico inglese decise di indagare la natura della luce attraverso un esperimento divenuto famoso come "esperimento delle due fenditure". Pose infatti lungo la traiettoria di un fascio di luce una lastra forata solo da due fenditure...



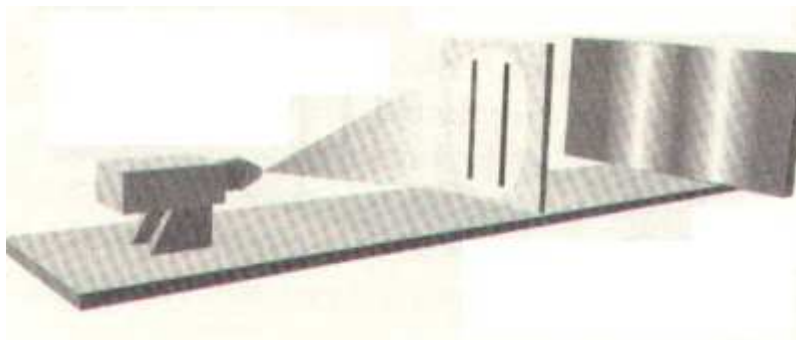
Pensate alla luce come a tanti bussolotti, i fotoni: cosa vi aspettereste di vedere? Ripercorriamo l'esperimento... Apriamo solo una delle 2 fenditure, quella destra: la lastra sarà impressionata sul lato destro.



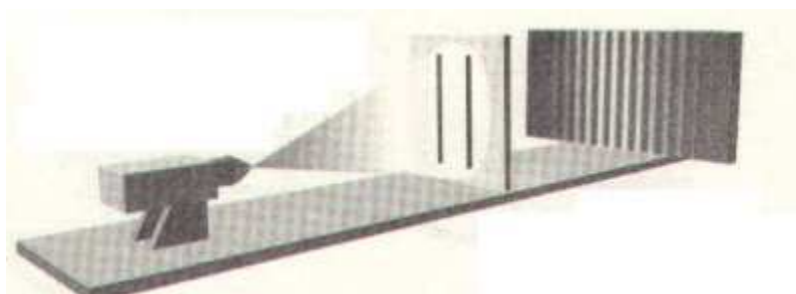
Ora richiudiamola ed apriamo l'altra:



come ci aspettavamo la lastra sarà impressionata sul lato sinistro... Ora apriamole tutte e due contemporaneamente: secondo la teoria corpuscolare dovremmo notare un addensamento maggiore nella regione di sovrapposizione dei fasci, o in ogni caso, due regioni maggiormente impressionate...



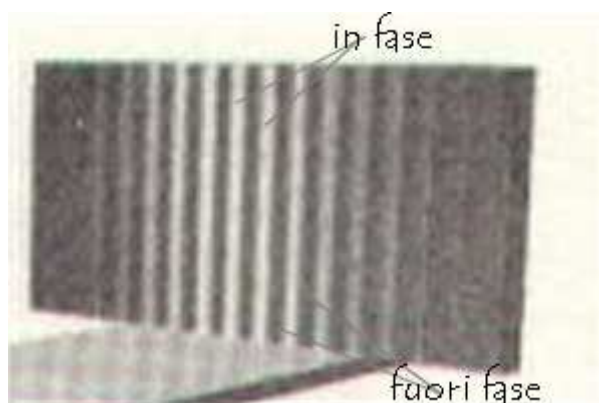
ed invece questo è ciò che avviene realmente:



Come spiegarlo?

E' come se in un muro vi fossero due porte, e dietro le porte tantissimi sedili: quando è aperta una sola porta tutta la gente che entra, com'è naturale, andrà a sedersi sulla parte destra del palco, analogamente per la sinistra... mentre se sono aperte tutte e due si distribuisce ad intervalli : noi ci aspetteremmo più affluenza in corrispondenza della zona di sovrapposizione dei due flussi, ed invece è proprio qui che ci sono posti più vuoti: è come se qualcuno avvertisse che quei posti sono già occupati...
Ma nessuno può avvertire i nostri fotoni!

Se invece accettiamo l'idea della luce-onda tutti i nostri problemi si risolvono: ci troviamo di fronte infatti ad una classica figura di interferenza, che noi possiamo spiegare benissimo rifacendoci alla teoria ondulatoria: nelle zone illuminate le onde saranno *in fase*, e quindi si sommeranno, nelle zone d'ombra *fuori fase* e si annulleranno.



coooooome?!?

Mi sembra già di sentirvi, dopo tante belle parole siamo ritornati di nuovo al punto di partenza: Insomma questa luce è un'onda o una particella?

Né l'una né l'altra... ENTRAMBE!

Sì, avete capito bene: uno stato stranissimo, che di solito i fisici indicano come "dualismo onda-particella"...

Visto quindi che le onde si comportano come corpuscoli, non potranno i corpuscoli presentare carattere ondulatorio?

Onda particella...Particella onda

L'equazione di De Broglie

...Si pose il problema Luis de Broglie circa 80 anni fa... Secondo il fisico francese il comportamento di ogni particella poteva essere spiegato ipotizzandone una natura ondulatoria: In particolare la lunghezza d'onda associata risultava uguale al rapporto fra la costante di Planck e la quantità di moto della particella stessa

$$\lambda = h/p \Rightarrow \lambda = h/mv$$

E questa formula riguarda tutta la materia ! Detto in altri termini vale tanto per un elettrone (fotone) quanto per voi, e per questo computer, e per qualsiasi altra cosa che vi circonda...Certo a noi le cose non sembrano stare proprio così! Ma ormai stiamo imparando che l'apparenza inganna!

E' come se vi presentassero una linea apparentemente dritta... guardando però sempre più a fondo scopriremmo che in realtà è formata da una linea ondulata continua : proprio come un'onda ! Solo che le curve sono così fitte - o in altri termini **λ è troppo piccola** - da risultare indistinguibili !

Le grandezze legate al nostro mondo sono immani in confronto alla piccolezza della costante di Planck:

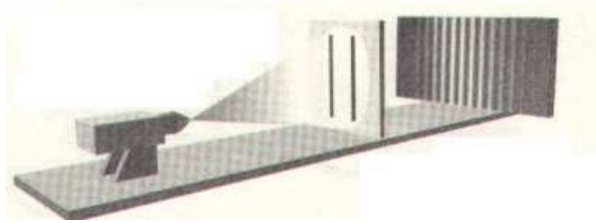
Anche andando lentissimi, qualcosa come 10 cm al secondo, provate a dividere qualcosa preceduto da 34 zeri per il prodotto del vostro peso e della velocità... non otterreste grandi valori! Questo vuol dire che anche nel migliore dei casi le lunghezze d'onda risultanti non sono neppure lontanamente percepibili dai nostri sensi...

Se però diventassimo sempre più piccoli, più piccoli... piccolissimissimissimi, come un elettrone, anche noi ci accorgeremmo di questa nuova natura della materia.

Cosa accadrebbe ora secondo voi se ripetessimo il nostro esperimento sostituendo alla luce un fascio di elettroni ?

Particelle Timide...

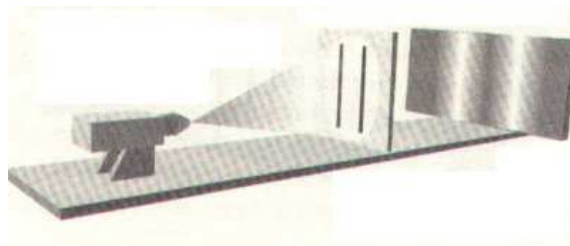
Visto che anche gli elettroni hanno un'onda associata potreste ripetere l'esperimento, ed otterreste gli stessi risultati.



Vi potrebbe venire il dubbio ora riguardo a quale fenditura scelga ogni particella: non sarà sufficiente vedere da che parte esce l'elettrone? Siete liberi di farlo... muniti di taccuino e penna vi posizionate proprio dietro la lastra ed aspettate. Ecco quello che rilevereste

destra	sinistra
X X X	X X X
X X	X X

Non ha senso, quindi, la figura d'interferenza, perchè metà degli elettroni impressioneranno la lastra sulla destra, e metà sulla sinistra. Se infatti vi giraste vedreste proprio ciò che vi aspettate



Com'è possibile che lo stesso esperimento porti a due risultati in antitesi? Possibile che i nostri elettroni siano timidi, che tendenzialmente siano onde ma vogliano apparir particelle? Nessun mistero : per vedere qualcosa, normalmente, lo bersagliamo di fotoni, che sono i più piccoli proiettili di cui ci ha fornito la natura, ossia lo illuminiamo con un fascio di luce.

Nel nostro mondo questo va benissimo perchè i fotoni risultano insignificanti rispetto alle dimensioni degli oggetti che ci circondano.

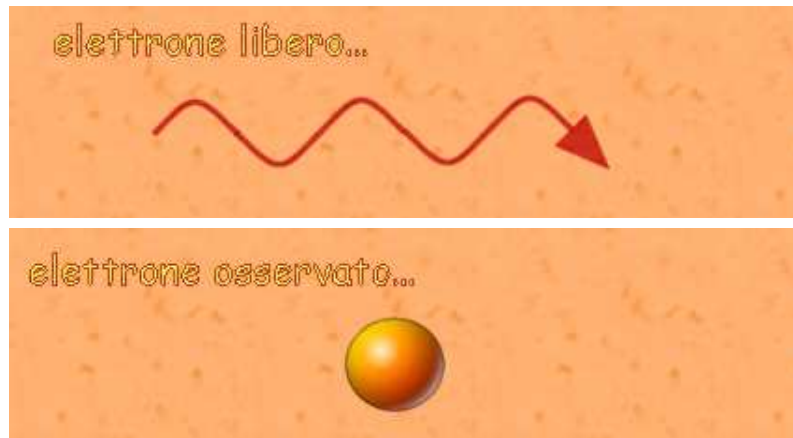
Sarebbe come pretendere di spostare l'Everest colpendolo con delle palline da ping pong ! Se però cambiaste bersaglio, ad esempio un bicchiere , ci riuscireste senza problemi.

E così i fotoni riescono a "spostare" gli elettroni, ossia a deviarne il moto.

RISULTATO:

l'esperimento sarà irreversibilmente compromesso, e voi non osserverete alcun segno di interferenza

Gli elettroni normalmente si comportano da onde, ma appena si sentono osservati mutano tendenza : saranno delle perfette particelle



Non vi è poi nulla di così inconcepibile: pensate ad una moneta. Vista frontalmente appare come un cerchio, lateralmente come una linea.



Noi non ci poniamo il problema perchè sappiamo che effettivamente si tratta dello stesso oggetto, ma se potessimo osservarne solo un aspetto, o l'altro, concluderemmo che, come le nostre particelle, in alcuni casi è un cerchio, ed in altri una linea!

Non stupitevi, l'indeterminismo domina in questo mondo..