

FISICAST

per
SxT

L'effetto fotoelettrico

di
Giovanni Organtini



L'effetto fotoelettrico

Giovanni Organtini

Abstract:

La meccanica quantistica, a differenza di quel che normalmente si pensa, fa parte ormai della nostra esperienza quotidiana. Ogni giorno possiamo sperimentare fenomeni di natura quantistica senza quasi accorgercene. In questa puntata di Fisicast, il Prof. Organtini ci parla dell'effetto fotoelettrico, che dimostra uno dei fenomeni più bizzarri previsti dalla teoria: la dualità onda-corpuscolo.

INIZIO

La meccanica quantistica, a differenza di quel che normalmente si pensa, fa parte ormai della nostra esperienza quotidiana. Ogni giorno possiamo sperimentare fenomeni di natura quantistica senza quasi accorgercene. In questa puntata di Fisicast, il Prof. Organtini ci parla dell'effetto fotoelettrico, che dimostra uno dei fenomeni più bizzarri previsti dalla teoria: la dualità onda-corpuscolo.

Q: Avreste mai creduto che i fenomeni previsti dalle teorie quantistiche potessero far parte della vostra vita quotidiana? No, vero? Eppure è così. E oggi vogliamo dimostrarvelo parlando di un fenomeno la cui spiegazione ha dato inizio a una delle più grandi rivoluzioni scientifiche: l'effetto fotoelettrico.

musica

A: in effetti sono in molti a credere che la meccanica quantistica non abbia niente a che fare con la nostra vita di tutti i giorni, mentre è proprio grazie a questa che oggi possiamo fare molte delle cose che facciamo.

Q: stai dicendo che nella mia vita posso sperimentare fenomeni di tipo quantistico? Non ci credo.

A: eppure è così. Guarda quell'auto che si sta infilando in quel garage, mentre le ante dei cancelli si stanno chiudendo...

Q: sta per avvenire un incidente?

A: no, perché come vedrai tra poco, al passaggio dell'auto il cancello si aprirà

automaticamente.

Q: certo! C'è una cellula fotoelettrica che rivela il passaggio dei mezzi e impedisce al cancello di chiudersi.

A: hai detto bene. Sai come funziona?

Q: veramente no.

A: te lo dico io: da un lato del cancello c'è una sorgente di luce invisibile all'occhio umano. Dall'altra parte c'è un rivelatore che misura la presenza della luce. Se passa un mezzo nel varco del cancello, il fascio di luce viene interrotto e il rivelatore non è più illuminato. Questo è il segnale che fa aprire il cancello, anche se si stava chiudendo.

Q: e cosa c'entra la meccanica quantistica?

A: c'entra perché la cellula fotoelettrica funziona in base a un effetto puramente quantistico. Il segnale proveniente dalla cellula è generato dall'effetto fotoelettrico, che consiste nell'emissione di elettroni (che poi generano la corrente elettrica prodotta dal sensore) da parte di un metallo quando è illuminato da una luce blu o ultravioletta.

Q: puoi spiegarmi meglio? Come fa la luce a produrre una corrente?

A: per comprendere il meccanismo è necessario capire la natura della luce...

Q: da quel che mi ricordo la luce è un'onda elettromagnetica

A: questo è quel che si diceva fino alla fine del XIX secolo. Fino ad allora esistevano due teorie al riguardo: quella corpuscolare per cui la luce è formata da corpuscoli, e quella ondulatoria secondo la quale la luce ha la natura di un'onda. La principale prova a favore di quest'ultima teoria è il verificarsi di un fenomeno chiamato diffrazione, che si verifica solo in presenza di fenomeni ondulatori. La diffrazione consiste in pratica nell'alterazione della direzione di propagazione di un'onda a causa della presenza di ostacoli. Quando onde piane, come quelle del mare, incontrano un ostacolo lo aggirano in un modo caratteristico: se l'ostacolo ad esempio è una fila di scogli parallela alla linea di costa, tra i quali è praticata un'apertura, le onde, passandoci attraverso, si propagano al di là degli scogli aprendosi a forma di semicerchio. Se al posto delle onde del mare ci fossero delle biglie che si muovono nella direzione delle onde, ci aspetteremmo che quelle che passano dall'apertura tirino dritto accumulandosi di fronte al varco. Non ci sogneremmo mai di vedere le biglie che improvvisamente cambiano direzione e si allontanano a raggiera dall'altra parte della linea degli scogli.

Q: perciò dalla forma a semicerchio della spiaggia posso dedurre che il mare è fatto di onde...

A: Proprio così. Se vuoi avere una chiara idea di un fenomeno di questo tipo segnati questo indirizzo: via del molo di levante, fiumicino. Inseriscilo in google maps e zoomma al massimo l'immagine da satellite.

Q: lo farò. Ma non ho capito come questo determini la natura ondulatoria della luce.

A: Qualcosa di simile a quello che accade con le onde del mare, accade con la luce. È possibile fare esperimenti nei quali un fascio di luce attraversa strette fenditure e vedere se produce figure simili a quelle delle onde del mare.

Q: ho capito. Se vedo che la luce, attraversando una fenditura stretta, si propaga al di là della fenditura come un'onda del mare che attraversa la diga, vuol dire che la luce è un'onda.

A: Ed è proprio quello che si vede. Se la fenditura è abbastanza stretta la luce non procede "dritta", per così dire, ma la fenditura diventa una sorgente che illumina in tutte le direzioni. La luce è un'onda elettromagnetica, in cui campi elettrici e magnetici oscillano, propagandosi. Il colore della luce è determinato dalla frequenza con la quale oscillano questi campi: man mano che la frequenza cresce il nostro occhio la percepisce come un cambiamento di colore, passando dal rosso, al giallo, al verde e al blu. La luce con frequenza superiore a quella della luce blu si chiama ultravioletta. È una luce che il nostro occhio non riesce a vedere, ma a cui sono sensibili, per esempio, le celle fotoelettriche (ma anche le macchine fotografiche).

Q: va bene, anche se non mi è proprio tutto chiaro, posso ammettere che la luce sia un'onda. Come fa l'onda a produrre una corrente?

A: gli oggetti sono fatti di atomi, che contengono elettroni. In particolare nei metalli gli elettroni sono solo debolmente legati agli atomi.

Q: e m'immagino che se un'onda colpisce un oggetto di metallo può come lavare via gli elettroni più superficiali. In fondo non dev'essere tanto diverso da quello che accade sulla battigia: là dove arrivano le onde la sabbia e le conchiglie sono smosse.

A: certo che può farlo. In termini più "fisici", quando la luce investe la superficie del metallo, l'onda luminosa trasferisce energia agli elettroni degli atomi che lo compongono sbalzandoli fuori. E come hai detto tu con altre parole, le onde

trasportano energia: sul mare sono capaci di far oscillare le navi, erodono la costa e se poi sono alte come quelle di uno tsunami possono travolgere cose, persone, e persino auto, pullman e camion!

Q: quindi è chiaro! Le onde luminose cedono la loro energia al metallo di cui è composta la cellula fotoelettrica. Da questa escono elettroni che producono una corrente elettrica che informa il cancello che può chiudersi. In assenza di luce, la corrente non esce e il cancello si riapre.

A: Il mistero è che le onde trasportano energia proporzionalmente alla loro ampiezza, indipendentemente dalla frequenza. L'ampiezza dell'onda ci dice quanto è alta la cresta rispetto alla valle, mentre la frequenza misura quanto tempo passa tra l'arrivo di due creste consecutive. Se sulla costa arrivano onde molto basse, qualunque sia la loro frequenza, non succede nulla di rilevante. Qualche conchiglia e un po' di sabbia viene smossa.

sciabordio

Se invece arriva un'onda gigantesca, indipendentemente dalla frequenza, può produrre un disastro.

tsunami

Ora, nel caso dell'effetto fotoelettrico, abbiamo detto che si verifica non quando la luce è tanta, ma quando è blu, cioè ha una frequenza alta. Quando cioè i campi elettrici e magnetici di cui è fatta oscillano rapidamente. Una luce gialla, per quanto intensa, non provoca effetto fotoelettrico. La luce blu, anche di modesta intensità, sì. Questo non si spiega, perché se la luce si comportasse come le onde del mare, una luce gialla molto intensa dovrebbe produrre un effetto fotoelettrico maggiore di una debole luce blu: invece accade il contrario.

Q: e come si spiega?

A: Il fenomeno era stato osservato da qualche tempo, ma era rimasto senza spiegazione, fino a quando Albert Einstein provò a ipotizzare che la luce fosse costituita da corpuscoli, in barba a qualunque evidenza contraria. L'idea non era nuova: era già stata avanzata da Planck per spiegare un altro fenomeno misterioso nel quale non entriamo nei dettagli: lo spettro di emissione di un corpo nero. Basterà dire che la soluzione proposta da Planck, in pratica, risponde alla domanda: perché la bocca del forno del pizzaiolo, quando è acceso, è gialla?

Q: una domanda che, francamente, non mi sono mai posta...

A: il bello della Fisica è che puoi trovare risposte incredibili ponendoti le domande apparentemente più inutili. La spiegazione di Planck, secondo cui la luce era formata di piccoli corpuscoli aveva funzionato. Solo che a tutti sembrò che funzionasse "per caso": un po' come quando si sbaglia il procedimento per la soluzione di un problema e, per caso, il risultato è corretto. Ebbene, Einstein ipotizzò che la luce fosse formata da piccolissimi *quanti* di energia proporzionale alla sua frequenza e in questo modo non solo spiegò l'effetto fotoelettrico, ma fu in grado di prevedere l'energia con la quale gli elettroni abbandonavano il metallo, se questo veniva illuminato da una luce di una determinata frequenza. Previsione che, puntualmente, venne verificata. Tra l'altro per questo Einstein vinse il premio Nobel. Non per la teoria della relatività come comunemente si crede (peraltro con sua grande irritazione perché pensava che quest'ultima fosse di gran lunga più importante dell'effetto fotoelettrico).

Q: Ma se mi hai appena convinto che la luce è un'onda! Adesso vuoi convincermi del contrario? E poi perché se la luce è formata da corpuscoli l'effetto si spiega? Non mi pare evidente...

A: Eh, al tempo! Intanto ti spiego perché se la luce fosse fatta di corpuscoli l'effetto fotoelettrico sarebbe facile da spiegare. Per capirlo è utile fare un esperimento. Prendi una moneta da 20 centesimi e mettila a circa 1 cm dal bordo del tavolo. La distanza tra il bordo del tavolo e la moneta rappresenta l'energia di legame di un elettrone nel metallo. Se fornisci sufficiente energia all'elettrone da spingerlo oltre il bordo, la moneta cade e l'elettrone diventa libero.

rumore di moneta che cade

Ora supponiamo che la luce sia un'onda che agisce sull'elettrone spostandolo avanti e indietro rispetto alla sua posizione nominale. Per ampiezze inferiori alla distanza tra la moneta e il bordo del tavolo non succede nulla, sia che facciamo oscillare lentamente la moneta, sia che lo facciamo molto rapidamente. La frequenza dell'oscillazione non ha alcun effetto sullo stato della moneta, che rimane *legata* sul tavolo. Se l'ampiezza dell'oscillazione fosse abbastanza grande però la moneta cadrebbe.

moneta che cade

Ma abbiamo visto che nell'effetto fotoelettrico l'intensità della luce (quindi l'ampiezza dell'onda) non conta nulla.

Q: ok, quindi la luce non può essere un'onda...

A: Se invece prendo una moneta da 2 euro, che rappresenta un quanto di luce, e la scaglio verso la moneta-elettrone possono succedere due cose: se l'energia del quanto

di luce è sufficiente a spostare la moneta-elettrone oltre il bordo del tavolo, questo diventa libero.

due monete che si scontrano e una che cade

Altrimenti resta legato al metallo e non si osserva effetto fotoelettrico. Se immagino la luce composta di questi corpuscoli, la sua intensità dipende dal numero di quanti in circolazione. Questi quanti si chiamano fotoni. Maggiore è l'intensità, maggiore è il numero di fotoni. Una luce fioca si rappresenta con poche monete da 2 euro scagliate grosso modo in direzione di un certo numero di monete-elettrone disposte lungo il bordo del tavolo: i pochi fotoni passeranno vicino agli elettroni, ma non tutti li colpiranno. L'effetto fotoelettrico si manifesta, ma debolmente. Solo pochi elettroni cadranno dal tavolo. Quando invece il numero di monete che piovono addosso agli elettroni è alto, la probabilità di colpirli è più alta e quindi l'urto si verifica con facilità e gli elettroni che cadono saranno molti di più.

Ora, come ho detto poc'anzi, i quanti di luce trasportano ciascuno un'energia che dipende dal colore della luce di cui sono i componenti. Quindi i quanti "blu", che abbiamo rappresentato con monete da 2 euro, hanno energia maggiore dei quanti "rossi", che possiamo rappresentare con monete da 5 centesimi. Per quanto io ne lanci tante verso gli elettroni, difficilmente riusciranno a buttarne giù qualcuno (sto assumendo che un solo fotone colpisca un elettrone).

Q: comincio a capire. Se penso che la luce sia un'onda il colore dipende dalla frequenza. Se penso che la luce sia fatta di corpuscoli, il colore dipende dall'energia dei quanti.

A: perfetto!

Q: se la luce è fatta di corpuscoli si spiega perché l'effetto fotoelettrico si verifica solo con luce di certi colori e perché il numero di elettroni emessi dipende dall'intensità della luce.

A: è così. Quindi la luce dev'essere fatta di corpuscoli.

Q: Ma allora non capisco! Prima mi avevi convinto che, dal momento che la luce produce fenomeni di diffrazione, dev'essere un'onda. Ora mi vuoi convincere del contrario. È un'onda o una particella? Deciditi...

A: La risposta dei fisici è che la luce è entrambe le cose: in certe situazioni si comporta come un'onda, in altre come una particella. È questo il risultato dei nostri esperimenti. Certamente è difficile da accettare, perché questa conclusione ci appare

come inconcepibile: come può qualcosa essere contemporaneamente un'onda e una particella? La risposta è che la fisica è una scienza sperimentale: esprime le leggi dell'Universo in forma matematica, in modo tale da rispettare quanto si osserva sperimentalmente. Che ci piaccia o no, che riusciamo a comprenderlo oppure no, l'Universo si comporta così. E non c'è alcuna ragione di principio per cui l'Universo debba comportarsi come piacerebbe a noi che si comporti. Siamo noi che dobbiamo adattarci ad accettare il modo in cui l'osserviamo. Non è l'Universo a obbedire alle leggi della fisica: è il contrario.

Q: quindi quando apro il cancello del garage di casa mia, in effetti sto sperimentando un fenomeno di natura quantistica!

A: e non solo quello! L'effetto fotoelettrico è alla base del funzionamento di molti altri dispositivi di uso comune, come le fotocamere digitali e i pannelli solari, nonché in molti apparati per la medicina. Nelle macchine fotografiche, la luce raccolta dall'obiettivo finisce su un sensore di silicio, che produce una carica elettrica per effetto fotoelettrico da ogni pixel. Questa carica si usa per riprodurre l'immagine (maggiore è la carica prodotta da un pixel, maggiore era l'intensità della luce che lo ha colpito). Nei pannelli solari, invece, la luce del sole colpisce la cella che, per effetto fotoelettrico, genera una corrente elettrica.

Q: incredibile. C'è più meccanica quantistica in giro di quanto io abbia mai immaginato!

A: e non finisce qui. I fenomeni quantistici sono alla base della possibilità di costruire diodi e transistor, che in definitiva sono i componenti di base di ogni apparecchiatura elettronica. Ma di questo parleremo un'altra volta.

FINE