

Dal Quark al Quasar

Pensieri di Fisica, sulla Natura e sull'Universo

Fotoni

Sabato 18 febbraio 2006

Caro Amico,

il modello ondulatorio della luce di cui abbiamo discusso recentemente è in grado di giustificare spettacolari fenomeni come quelli di interferenza e diffrazione, a cui abbiamo già accennato, e anche tutti i principali fenomeni ottici che tratteremo prossimamente; esso inoltre poggia su solide basi teoriche, le equazioni di Maxwell per l'elettromagnetismo, di cui ancora non abbiamo parlato ma che saranno argomento di approfondimento in futuro. Tuttavia tale modello ondulatorio fallisce nel giustificare alcuni fenomeni particolari, che reclamano a gran voce una natura differente per la luce: una natura *corpuscolare*.

Se stai pensando al *dualismo onda-particella* che abbiamo già affrontato parlando di Meccanica Quantistica e di elettroni, non sei fuori strada: qui il contesto è differente, perché la luce è un'onda vera, un'onda elettromagnetica, non stiamo parlando di *onde di probabilità* come nel caso delle funzioni d'onda soluzioni dell'equazione di Schrödinger, ma il legame con la Meccanica Quantistica, che oggi ancora non esploreremo, è incredibilmente profondo e fecondo; su di esso, infatti, si basano le cosiddette *tecniche di seconda quantizzazione* e le *teorie quantistiche di campo*, delle quali avremo modo di occuparci al momento opportuno.

Oggi, invece, affronteremo il problema di dare alla luce un modello corpuscolare in maniera molto più empirica, molto più affidata al confronto con un esperimento particolare che mette in risalto il cosiddetto *effetto fotoelettrico*; è la spiegazione di questo fenomeno, tra l'altro, che ha valso ad Albert Einstein il suo premio Nobel; benché Einstein fosse partito da considerazioni più generali, che qui non staremo a riproporre, riguardanti la natura delle radiazioni elettromagnetiche in generale, approdando poi ad una formulazione teorica strettamente imparentata con quanto Max Planck (quello della costante h che compare sempre in Meccanica Quantistica) stava elaborando in quegli stessi anni, una conseguenza diretta del suo lavoro è stata proprio quella di trovare un'immediata verifica e validazione nell'effetto fotoelettrico, oggetto di curiosità intellettuale all'epoca, di importanza capitale oggi in quanto è alla base del funzionamento ad esempio dei pannelli solari fotovoltaici.

Descritto sommariamente, l'effetto fotoelettrico è di una semplicità impressionante: una lastra di metallo viene investita da un fascio luminoso. Se le caratteristiche di questo sono adeguate, la lastra di metallo rilascia particelle elettricamente cariche; non è difficile verificare sperimentalmente che tali particelle elettricamente cariche sono i nostri amici elettroni. Ora la domanda è perché questo fenomeno avvenga, e quali siano le caratteristiche che il fascio luminoso deve avere.

Come sempre si cerca di fare nella scienza, quando si cerca di comprendere un fenomeno ignoto o inspiegato, procediamo a semplificare l'esperimento, nella speranza che anche lo schema concettuale necessario per spiegarlo si semplifichi di conseguenza. Così, per iniziare, stabiliamo che il fascio luminoso sia *monocromatico*: nel caso di luce visibile, questo vuol dire che la luce in questione ha un colore definito (ad esempio verde, o arancione); nel caso di luce a lunghezze d'onda che risiedono al di fuori dello spettro visibile, questo vuol comunque sempre dire che la lunghezza d'onda (o la frequenza) dell'onda elettromagnetica che costituisce il fascio luminoso è una sola. Come sia possibile generare un'onda monocromatica (o monocromatizzare un'onda non monocromatica) non è qui rilevante. Aver ridotto il fascio luminoso ad un'onda monocromatica ci consente due importanti semplificazioni:

- escludiamo che l'effetto fotoelettrico sia dovuto a qualche strano meccanismo che opera mediante la presenza simultanea di onde elettromagnetiche a frequenze diverse;
- ci mettiamo nelle condizioni, se necessario, di variare la frequenza (o la lunghezza d'onda) del fascio luminoso per vedere quali conseguenze abbia questa azione.

Il primo risultato, invero sorprendente, conseguenza diretta della seconda semplificazione a cui abbiamo appena accennato, è che l'effetto fotoelettrico si manifesta *solo se la frequenza dell'onda elettromagnetica incidente sulla lastra metallica è sufficientemente elevata*. In altre parole, c'è un valore di soglia per la frequenza dell'onda (o per la sua lunghezza, che ne è inversamente proporzionale), al di sotto (sopra) del quale l'effetto fotoelettrico non è osservabile, e al di sopra (sotto) del quale ha invece luogo. Curioso. Perché? La cosa appare abbastanza stravagante alla luce delle conoscenze che abbiamo sulla struttura degli atomi. Se l'effetto fotoelettrico consiste nello "strappare" un elettrone ad un atomo che si trova sulla superficie di una lastra metallica, la presenza di un meccanismo a soglia ci appare ragionevole: da quanto sappiamo sugli atomi, di cui abbiamo già parlato, per *ionizzarne* uno, ovvero privarlo di un elettrone, dobbiamo fornire all'elettrone stesso una sufficiente quantità di energia che gli consenta di oltrepassare la barriera di potenziale in cui l'attrazione elettrostatica esercitata dal nucleo carico positivamente lo confina. L'analogo classico è la ciotola che contiene una biglia: le pareti della ciotola costringono la biglia al suo interno, ma una spinta sufficiente è in grado di portare la biglia ad oltrepassare l'orlo della ciotola e ad uscire da essa; l'energia necessaria per portare la biglia oltre il bordo della ciotola è, nel caso di un atomo, *l'energia di ionizzazione*. Non ci sorprende quindi che, nel caso dell'effetto fotoelettrico, un fascio luminoso incidente sia in grado di ionizzare la lastra di metallo, e quindi farle emettere elettroni, solo se l'energia trasportata dal fascio luminoso stesso è sufficiente a liberare gli elettroni del metallo dal potenziale elettrostatico che li lega ai rispettivi atomi. Un fascio luminoso che trasporta un'energia troppo bassa non potrà fornire agli elettroni della superficie della lastra metallica un'energia sufficiente per consentire loro di abbandonare i rispettivi atomi, e quindi l'effetto fotoelettrico non avrà luogo. La contraddizione, il vero problema concettuale nasce nel momento in cui si cerca di fornire una spiegazione quantitativa anziché solo qualitativa. Infatti: quanta energia trasporta il fascio luminoso? Se adottiamo il modello ondulatorio, quello delle onde elettromagnetiche, per descriverlo, allora l'energia trasportata dall'onda, per unità di tempo e per unità di superficie, è data da

$$\mathfrak{S} = \frac{E_{eff}^2}{Z_0} \quad [W/m^2]$$

dove E_{eff} è il *valore efficace* del campo elettrico dell'onda elettromagnetica e Z_0 , anche detta *impedenza del vuoto*, è una quantità sulle cui origini torneremo quando parleremo delle equazioni di Maxwell ma che qui ci basta sapere che è costante e ha un valore numerico pari a circa 377Ω . Se il fascio luminoso è descritto nei termini di un'onda elettromagnetica, allora, il campo elettrico varierà, come abbiamo visto, nello spazio e nel tempo in maniera sinusoidale, con un'ampiezza di picco che denominiamo E ; il *valore efficace* è semplicemente $E_{eff} = E / \sqrt{2}$ ed è esso che, sostanzialmente, determina quanta energia, per unità di superficie e per unità di tempo, venga trasportata dall'onda elettromagnetica stessa.

Nella sua semplicità, questa formula è sufficiente per mandare all'aria qualunque interpretazione dell'effetto fotoelettrico mediante un modello ondulatorio della luce. Infatti, secondo questa formula, che è dimostrabile a partire dalle equazioni di Maxwell, se voglio aumentare l'energia incidente sulla lastra metallica devo accrescere l'ampiezza del campo elettrico dell'onda elettromagnetica, ovvero dovrei aumentare l'intensità dell'onda stessa. Se essa fosse nello spettro del visibile, sarebbe a dire (con dei numeri a caso presi solo a titolo di esempio) che la luce emessa da una lampadina ad incandescenza da 40 W non sarebbe sufficiente ad innescare l'effetto fotoelettrico su una lastra di metallo posta nelle vicinanze, mentre quella emessa da una lampadina da 100 W lo sarebbe. Solo che l'esperimento dimostra esattamente il contrario: non è l'intensità della luce con cui si irradia la lastra di metallo ad innescare o meno l'effetto fotoelettrico, è il suo *colore*, ovvero la frequenza o la lunghezza d'onda di cui è costituita. Sorprendente, anche perché nella formula che determina l'energia trasportata da un'onda elettromagnetica non compare da nessuna parte la frequenza della stessa. Eppure la formula è corretta; è il modello interpretativo che è inadeguato.

Come se non bastasse, l'*intensità* del fascio luminoso ha comunque delle conseguenze sull'effetto fotoelettrico, anche se molto diverse da quelle che ci aspettavamo. Ammettendo di avere una sorgente monocromatica di frequenza opportuna tale da consentire l'osservazione dell'effetto fotoelettrico (la frequenza della luce è quindi superiore a quella di soglia per la comparsa dell'effetto), ciò che si osserva sperimentalmente è che aumentando l'intensità della luce incidente sulla lastra metallica gli elettroni da questa emessi *hanno sempre la stessa energia, ma aumentano di numero*. Occorre riflettere su questo fatto.

Facciamolo con un'analogia: gli elettroni della lastra di metallo siano un certo numero di palloni da calcio, disposti tutti in fila su un prato. Il fascio luminoso sia dato da un calciatore che arriva di corsa e calcia. L'intensità del fascio luminoso modellizzato tramite un'onda elettromagnetica è data da quanto forte il calciatore colpirà i palloni: in altre parole, il calciatore è il campo elettrico (efficace) dell'onda elettromagnetica. L'esperienza e il buon senso ci dicono che se il calciatore colpisce con più forza (fascio lumi-

noso più intenso) il pallone colpito partirà con più forza e andrà più lontano (gli elettroni saranno emessi dalla superficie della lastra metallica con più energia). Invece, l'esperienza sull'effetto fotoelettrico mostra un fenomeno molto diverso: se il calciatore colpisce con più forza (fascio luminoso più intenso), il suo piede, anziché colpire un pallone solo, ne colpirà più d'uno; e tutti i palloni colpiti verranno scagliati alla medesima velocità, ovvero con la stessa energia. Chiaramente è qualche cosa di poco intuitivo.

Per recuperare un po' di ragionevolezza bisogna cambiare punto di vista: le cose tornano ad essere molto più comprensibili se ammettiamo qualche cosa di radicalmente differente, ovvero che l'intensità del fascio luminoso, nella nostra analogia, non sia data da quanto forte un *unico* calciatore colpisce il pallone, ma da *quanti giocatori simultaneamente* colpiscono, tutti con la stessa forza, ognuno un pallone diverso. Questo approccio, però, significa rinunciare completamente alla descrizione ondulatoria della luce, rinunciare alla formula che abbiamo commentato in precedenza e valida per le onde elettromagnetiche. Una scelta dolorosa ma necessaria, perché quella formula già aveva mostrato la sua incapacità di descrivere il fenomeno dell'effetto fotoelettrico.

Ripartiamo da zero, su basi nuove. Facciamo delle ipotesi che potranno sembrarci assurde o bizzarre, e che sottoporremo a verifica sperimentale per vedere se siano soddisfacenti oppure no. Diciamo ad esempio che la luce (come sempre chiamo "luce" anche quelle radiazioni elettromagnetiche che cadono al di fuori dello spettro visibile, per semplicità) non sia un'onda elettromagnetica, ma sia costituita da particelle, corpuscoli sulla cui natura ora non diciamo nulla, ma dotati delle seguenti caratteristiche:

- ogni corpuscolo, che chiameremo *fotone*, si propaga nello spazio in linea retta (questa affermazione andrà rivista in maniera critica quando parleremo della Teoria Generale della Relatività), ad una velocità c che è la velocità della luce nel vuoto (come l'onda elettromagnetica che usiamo per modellizzare la medesima luce in altre circostanze);
- ogni fotone trasporta con sé un'energia $E = h\nu$ dove h è la costante di Planck e ν è una frequenza associata al fotone stesso che determina il *colore* della luce; è da notare che, a questo stadio, non c'è nessun bisogno che la costante di proporzionalità tra frequenza ed energia sia proprio la costante di Planck; tuttavia sarà il legame col resto dell'interpretazione teorica, e il confronto con l'esperimento, a dire che tale costante di proporzionalità è proprio la stessa che compare, come abbiamo visto, nell'equazione di Schrödinger e in realtà ovunque vi sia necessità di impiegare un'interpretazione quantistica dei fenomeni fisici;
- l'intensità del fascio luminoso è data dal *numero* di fotoni di cui esso è costituito.

Queste ipotesi, che prendiamo con beneficio di inventario, in quanto ci riserviamo di vedere se, assurde o no, siano adeguate per i nostri scopi, vanno ora messe a confronto con l'effetto fotoelettrico così come viene sperimentalmente osservato. E scopriamo che:

- un fascio luminoso *monocromatico* è costituito da fotoni che hanno tutti la medesima energia, ovvero la medesima frequenza ν ;
- se la frequenza ν dei fotoni è superiore alla frequenza di soglia, ovvero se la loro energia è superiore a quella di soglia, l'effetto fotoelettrico fa la sua comparsa, se no non è osservabile, in accordo con l'esperimento;
- se l'energia dei fotoni non è sufficiente ad innescare l'effetto fotoelettrico, non importa quanto intenso sia il fascio luminoso (ovvero quanti fotoni per unità di tempo e per unità di superficie incidano sulla lastra metallica), perché l'effetto fotoelettrico non lo osserverò mai: infatti *nessun* fotone di cui è costituito il fascio ha energia sufficiente per ionizzare un atomo della lastra metallica, e quindi *nessun elettrone* viene rilasciato da questa; tutto questo è in accordo con l'esperimento;
- se l'energia dei fotoni è superiore all'energia di soglia, aumentare l'intensità del fascio luminoso (ovvero aumentare il numero di fotoni per unità di tempo per unità di superficie incidenti sulla lastra metallica) significa aumentare il numero di elettroni rilasciati dalla lastra metallica; inoltre, ogni fotone ha sempre la stessa energia, indipendentemente dall'intensità del fascio, quindi ogni fotone scalzerà un elettrone dalla superficie della lastra, sempre con la stessa energia; una maggiore intensità del fascio aumenterà quindi il numero di elettroni rilasciati, ma non l'energia con cui essi vengono liberati; anche questo è in accordo con l'esperimento.

Improvvisamente, un'interpretazione *corpuscolare* dei fenomeni luminosi è in grado di spiegare, in maniera semplice ed intuitiva, l'effetto fotoelettrico, che così ostinatamente contraddiceva qualunque tentativo di descrizione facendo uso di un modello ondulatorio della luce. Questo risultato da un lato ci entusiasma, perché un fenomeno che sfuggiva alla nostra comprensione sta ora assumendo dei connotati comprensibili, ma dall'altro ci sconcerta: fenomeni diversi, come ad esempio la diffrazione da una parte e l'effetto fotoelettrico dall'altra, determinati entrambi dalla *stessa* luce, possono essere descritti *solo* con linguaggi diversi, con modelli radicalmente differenti e apparentemente incompatibili l'uno con l'altro, contraddittori, al punto che quello in grado di spiegare un fenomeno fallisce nell'interpretazione dell'altro, e viceversa. Non staremo facendo un passo indietro, anziché in avanti, nella comprensione dei fenomeni luminosi?

L'esigenza di comprendere la profonda natura dei fenomeni fisici, che va ben al di là di ridurli ad una semplice formula in grado di quantificarli, è ciò che qualifica la scienza: per fare due conti da applicare per la realizzazione di un prodotto tecnologico è sufficiente una formulina matematica ricavata empiricamente che leghi tra di loro le quantità fisiche coinvolte nel fenomeno che si sfrutta; ma per capire veramente che cosa sta succedendo occorre che tutti i diversi punti di vista possano essere racchiusi in un unico schema, in un'unica formulazione della realtà, per quanto vasta ed articolata essa sia, e qualunque formula abbia una sua giustificazione, fisica, matematica, concettuale.

Ora disponiamo di due modelli per la luce: un modello ondulatorio, che origina dalle equazioni di Maxwell, sulla cui solidità teorica avremo modo di parlare approfonditamente in futuro, e che rende meravigliosamente conto dei fenomeni di interferenza e diffrazione nonché dei principali fenomeni ottici di cui ci occuperemo con la prossima epistola; e un modello corpuscolare, per ora privo di un significativo sostegno teorico, più che altro un'ipotesi di lavoro che è in grado di descrivere meravigliosamente bene, ma anche misteriosamente, l'effetto fotoelettrico, che sfuggiva immancabilmente ad ogni tentativo di descrizione mediante il modello ondulatorio. Ora abbiamo due strade: dimostrare che il modello corpuscolare della luce è in realtà un artificio concettuale che può essere ricondotto all'interno di una teoria ondulatoria della luce, senz'altro più vasta e complessa di quella che conosciamo (dal momento che questa non è stata in grado di spiegare l'effetto fotoelettrico); oppure dimostrare che il modello ondulatorio e il modello corpuscolare della luce sono entrambi due aspetti dello stesso problema, due manifestazioni della medesima realtà fisica, che si propone ai nostri occhi in maniera differente a seconda delle circostanze; e per fare questo dovremo individuare il quadro concettuale entro il quale racchiudere questi due modelli, farli convivere, spiegare come, quando e perché passare dall'uno all'altro, e soprattutto dimostrare che la loro contraddizione è solo apparente.

Per un po' ancora lasceremo la questione in sospenso, tornando ad occuparci solo del modello ondulatorio della luce. Ma questi problemi, questi interrogativi ci rimarranno, come tarli, nella nostra mente, finché, tra un po', torneremo a parlare di Meccanica Quantistica, in maniera del tutto nuova.

A presto,

Marco