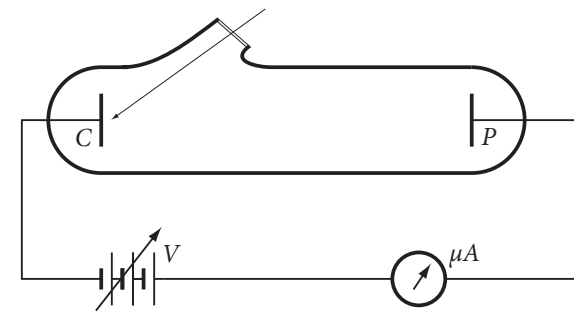


Marco Savarese

L'EFFETTO FOTOELETTRICO E L'EFFETTO COMPTON



$h\nu$, chiamate fotoni per la prima volta da Compton. Un fotone urta contro un elettrone con conseguente scambio d'energia. Abbiamo visto che il fotone in questione ha un'energia molto grande rispetto all'energia con cui l'elettrone è legato al nucleo dell'atomo di carbonio. Ne risulta che nell'urto l'elettrone si può considerare libero ed è il fotone che perde energia cedendola all'elettrone. Ma nella teoria quantistica l'energia del fotone è proporzionale alla frequenza, per cui dopo l'urto il fotone diffuso perdendo energia avrà una frequenza minore e quindi una lunghezza d'onda maggiore. Inoltre l'elettrone urtato, da Compton chiamato elettrone di rinculo, si allontanerà dall'atomo con una data velocità per aver acquistato una parte dell'energia del fotone. Questi elettroni non furono osservati direttamente da Compton ma successivi esperimenti confermarono che il loro numero, la loro velocità, la distribuzione spaziale erano in pieno accordo con le previsioni della nuova teoria.

L'effetto Compton fu determinante per l'affermazione definitiva della teoria in quanto in esso il fotone è colto in una sua trasformazione mentre precedentemente si sapeva soltanto che nasceva e moriva, ma non si riusciva a mettere in evidenza una qualunque trasformazione della sua vita individuale.

Riferimenti bibliografici

M. Ageno, *Elementi di fisica*, Boringhieri, 1956

M. Gliozzi, *Storia della Fisica*, Bollati Boringhieri, 2005

G. Gamow, *Trent'anni che sconvolsero la fisica*, Zanichelli, 1966

P.A. Giustini, *I trent'anni che rivoluzionarono la fisica*, Elia, 1975

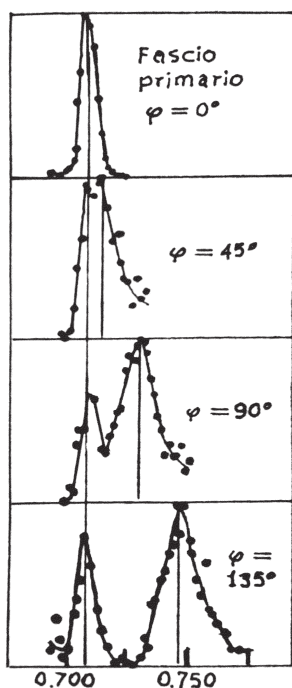
G. Casini, *L'effetto fotoelettrico*, www.pls.uniroma2.it/TFA/CCF12/L'effetto%20fotoelettrico.pptx

Enciclopedia delle Scienze Fisiche, Treccani, 1994

angoli di diffusione, l'intensità dei raggi X in funzione della lunghezza d'onda.

Era noto che quando un'onda elettromagnetica colpiva un corpo, in generale una parte dell'energia veniva sparpagliata in tutte le direzioni o, come si dice in termine tecnico, diffusa, conservando la stessa frequenza della radiazione incidente. La teoria classica di Lorentz spiega questo fenomeno dicendo che gli elettroni del corpo investito dalla radiazione entrano in risonanza ed emettono perciò a loro volta onde sferiche che diffondono in tutte le direzioni una parte dell'energia dell'onda primaria. In questo meccanismo è evidente che le onde secondarie debbono avere la stessa frequenza dell'onda primaria. Fino ad allora questa teoria s'era dimostrata adatta a spiegare i fenomeni di diffusione sia della luce visibile che della radiazione invisibile.

Ma come per l'irraggiamento del corpo nero e per l'effetto fotoelettrico i risultati erano in completo disaccordo con la teoria classica. Ecco cosa ottenne Compton:



I grafici si riferiscono a 4 angoli di diffusione, sulle ascisse vi è la lunghezza d'onda in angstrom, sulle ordinate l'intensità dei raggi X diffusi. Si osserva che per quanto il fascio incidente abbia una sola lunghezza d'onda λ , i raggi X diffusi hanno picchi di intensità e due lunghezze d'onda: un picco corrispondente alla lunghezza d'onda incidente e l'altro alla lunghezza d'onda λ' superiore alla precedente della quantità $\Delta\lambda$. Questo $\Delta\lambda$, chiamato *spostamento Compton* varia con il variare dell'angolo a cui sono osservati i raggi X diffusi.

Questi risultati, difficilmente spiegabili con la teoria ondulatoria, ricevono una immediata interpretazione in quella quantistica. Pensiamo ai raggi X come una raffica di particelle ognuna di energia

1. L'effetto fotoelettrico

Come tutti sanno l'aria in condizioni normali non è conduttrice; lo diventa invece a bassa pressione (Hauksbee¹, 1706). Nel 1661 Otto von Guericke² aveva mostrato che la fiamma lo è, ed è anche in grado di scaricare i conduttori elettrizzati che si trovano nelle sue vicinanze. Per circa due secoli furono vani i tentativi di interpretare questi fenomeni; per avere qualche teoria a riguardo fu necessario aspettare la fine del XIX secolo quando Hertz osservò che, negli esperimenti con tubi a scarica in atmosfera gassosa, la scintilla ha luogo più facilmente in condizioni di buona illuminazione; in particolare è molto più vigorosa quando gli elettrodi sono illuminati con luce ricca di raggi ultravioletti. Nel 1880 successive ricerche stabilirono che la sede dell'azione è l'elettrodo negativo (catodo) e Wilhelm Hallwachs trovò che i conduttori metallici caricati negativamente tendono a scaricarsi se illuminati con luce ultravioletta. Svante Arrhenius, proseguendo le ricerche, chiuse in un tubo contenente aria rarefatta due elettrodi di platino molto vicini e li collegò ad una pila con in serie un galvanometro; in questo modo fu realizzata probabilmente la prima cellula fotoelettrica della storia: il galvanometro infatti si muove appena gli elettrodi sono illuminati mediante scariche elettriche prodotte all'esterno del tubo. Arrhenius ipotizzò erroneamente che l'aria fosse la sede del fenomeno e suppose che la luce ultravioletta avesse la proprietà di accelerare gli ioni che vi si trovano.

Anche il nostro Augusto Righi si dedicò a queste ricerche e nel 1888 scoprì un fatto nuovo: una lastra conduttrice illuminata da raggi ultravioletti si carica positivamente (l'effetto è molto piccolo). Egli per primo chiamò il fenomeno *fotoelettrico*, introducendo un vocabolo destinato a restare. In un primo tempo il fisico bolognese credette trattarsi di un semplice trasporto di elettricità operato dalla luce ultravioletta ma successivamente fu chiaro che non si trattava di trasporto ma di una produzione vera e propria di elettricità. Questa interpretazione sembrava rafforzata da un altro fatto accertato dallo stesso Righi nel 1890 e studiato anche da altri scienziati: un flusso di elettricità negativa si allontana dall'elettrodo illuminato con luce ultravioletta.

Allo studio di questo flusso rivolse l'attenzione nel 1899 lo stesso Thomson, incoraggiato dal successo ottenuto due anni prima con l'analoga ricerca sui raggi catodici. In particolare l'esperimento fu condotto dal suo assistente Philipp Lenard, con procedimento simile ed ebbe come scopo quello di misurare il rapporto tra carica e massa delle particelle costituenti il flusso di elettricità negativa prodotto dal metallo illuminato. L'esperimento si concluse con lo stesso esito del celebre esperimento di Thomson: la corrente che si stabilisce tra i due piatti metallici opportunamente elettrizzati, quando il

1. Francis Hauksbee (Colchester, 1660 – Londra, 1713) scoprì nel 1705 un fenomeno che è alla base del funzionamento delle lampade a vapori di mercurio oggi in uso. Ponendo una piccola quantità di mercurio nell'ampolla di un generatore elettrostatico, dopo aver fatto un moderato vuoto al suo interno bastava appoggiare una mano sulla superficie esterna dell'ampolla per provocare una luminescenza sufficiente a permettere la lettura di un libro.

2. Otto von Guericke (Magdeburgo, 1602 – Amburgo, 1689) è famoso per aver contribuito a demolire la teoria aristotelica dell'*horror vacui*, secondo la quale la natura aborre il vuoto. Nel 1650 inventa la prima pompa pneumatica mediante la quale realizza il celebre esperimento degli emisferi di Magdeburgo.

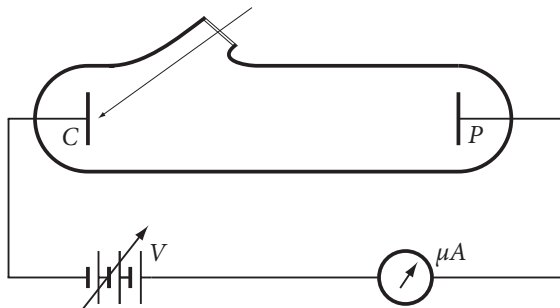
catodo è illuminato con luce ultravioletta, si comporta come un flusso di particelle di carica negativa in moto e i portatori di elettricità sono della stessa natura dei raggi catodici, sono cioè elettroni.

Ma c'è un altro caso nel quale si verifica un trasporto di elettricità. È il fenomeno scoperto da Edison nel 1879, il cosiddetto effetto termoionico: un filamento incandescente emette un flusso di elettricità negativa. Thomson fece esperimenti anche su questo fenomeno sottoponendo, come al solito, il flusso di particelle alle contemporanee azioni di un campo elettrico e di uno magnetico. Il risultato fu analogo al precedente: il rapporto e/m risultava compatibile con quello dei raggi catodici: anche le particelle prodotte nell'effetto termoionico sono elettroni.

L'esperimento di Lenard

Si tenga presente che per eseguire misure quantitative sull'effetto fotoelettrico c'è sempre bisogno di eliminare l'aria. Essa infatti rappresenta un fattore di disturbo non indifferente in quanto gli elettroni tendono a legarsi alle molecole d'aria trasformandole in ioni. Come abbiamo visto in aria l'unico effetto visibile consiste nel fatto che un corpo metallico carico negativamente tende a scaricarsi più velocemente se illuminato con luce ultravioletta (effetto Hallwachs). Qualora il corpo fosse scarico l'effetto è molto difficile da rivelare perché, se è pur vero che qualche elettrone fuoriesce dalla superficie del metallo, quest'ultimo resta carico positivamente e tende a riprendersi l'elettrone trasfugo; si crea, nelle immediate vicinanze del metallo una nuvola di elettroni continuamente espulsi e riassorbiti. Qualsiasi misura eseguita a livello macroscopico non evidenzierà variazioni significative della carica perché il bilancio sarà sempre in pari essendosi stabilito un equilibrio dinamico. Possiamo concludere che, per avere misure quantitative, bisogna racchiudere i due elettrodi in tubo a vuoto molto spinto, porli ad una tensione relativamente alta e misurare la corrente che vi scorre in funzione dell'intensità e della frequenza della luce che illumina il catodo (l'elettrodo negativo).

Nel 1902 Lenard avviò una serie di esperimenti di questo tipo al fine di determinare in quale modo l'energia degli elettroni emessi nell'effetto fotoelettrico dipendesse dall'intensità della luce. Come sorgente luminosa utilizzò una lampada ad arco di notevole potenza che gli permise una escursione in intensità di un fattore mille. Gli elettroni emessi dal catodo C finivano sull'altra piastra metallica, il collettore P , a sua volta collegato al primo elettrodo attraverso un galvanometro, in tal modo era possibile misurare la corrente di elettroni prodotta dall'illuminazione. Ecco uno schema dell'apparato sperimentale.



2. L'effetto Compton

L'ipotesi di Einstein pose in grave imbarazzo la fisica teorica del tempo dal momento che non vi è alcun modo di conciliare l'esistenza dei fotoni con l'elettromagnetismo classico descritto dalle equazioni di Maxwell. Alcuni fenomeni di ottica fisica sono del tutto inspiegabili se si ammette la costituzione granulare della luce. Per esempio è inspiegabile il celebre esperimento della doppia fenditura condotto da Young nel 1801. Logica vorrebbe che, se consideriamo il fotone come una entità fisica spazialmente circoscritta, esso deve passare per uno dei due fori: solo un'onda infatti può attraversarli entrambi e creare le frange di interferenza. Ma, a pensarci bene, tutti gli esperimenti di interferenza e diffrazione della luce sono assolutamente incomprensibili se ammettiamo la natura granulare della luce (badate bene, non ho detto corpuscolare).

D'altra parte la teoria ondulatoria della luce riscuoteva enormi successi, ricordiamo⁶ che nel 1912 Max von Laue aveva provato senza ombra di dubbio la natura elettromagnetica dei raggi X ottenendo fenomeni di diffrazione attraverso un cristallo di solfuro di zinco; essa era in grado (e lo è tuttora) di prevedere fenomeni che gli esperimenti poi puntualmente verificano, e questo, per dirla alla Popper è ciò che distingue la scienza dal resto delle pseudoscienze. Che bisogno c'era di buttarla nel cestino per rimpiazzarla con una teoria con la quale non si riuscivano a spiegare fenomeni ormai conclamati come l'interferenza e la diffrazione?

Intorno agli anni venti si era stabilito un curioso modo di procedere: benchè non si potesse negare una qualche "esistenza" dei fotoni, la maggior parte della comunità scientifica riteneva che essi non avessero una loro realtà fisica ma fossero un semplice artificio di calcolo per indicare una certa quantità di energia connessa forse con qualche irregolarità del campo elettromagnetico. Il quanto di luce, insomma, era una misura non una entità *sui generis*. In sostanza non si dubitava soltanto della realtà fisica del fotone ma era tutta la teoria quantistica che traballava e veniva guardata con molta diffidenza.

Una definitiva conferma della realtà del concetto di fotone si ebbe nel 1923 con l'esperimento eseguito dal fisico statunitense Arthur Compton. Egli voleva studiare l'urto fra un quanto di luce e un elettrone in moto libero nello spazio. L'ideale sarebbe osservare queste collisioni facendo attraversare un fascio di elettroni da un fascio di luce: purtroppo però, perfino nei fasci di elettroni più intensi disponibili il numero di elettroni è così piccolo che si dovrebbe aspettare per secoli un solo urto. Per superare questa difficoltà Compton utilizzò i raggi X, i cui quanti trasportano moltissima energia. In confronto a questa energia diventa trascurabile quella con cui gli elettroni sono legati negli atomi degli elementi leggeri e quindi gli elettroni di questi elementi si possono considerare come se fossero completamente liberi. L'esperimento di Compton consisteva nell'inviare un fascio monocromatico di raggi X di lunghezza d'onda $\lambda = 0,70$ angstrom (10^{-10} m) su un blocco di grafite e misurare, per vari

6. Si veda la dispensina: *Appunti di radioattività*, pag. 2

Dove W è il lavoro di estrazione dell'elettrone dal metallo. Einstein prevede che il grafico di questa equazione al variare della frequenza della luce eccitatrice sarebbe stato una retta, la cui pendenza (h) non dipende dal materiale. A noi oggi può sembrare ovvio, ma Millikan, che fu il primo a verificarla sperimentalmente, ne rimase molto colpito. Inoltre il lavoro di estrazione W non è altro che il prodotto della costante di Planck h per la soglia fotoelettrica ν_0 e anche questa relazione è confermata dagli esperimenti.

Bisogna sottolineare ancora due cose: la prima è che i fotoni non sono tutti uguali, come i grani di elettricità, ma hanno energia variabile, pari, per ogni fotone a $E = h\nu$; la seconda è che essi non hanno una illimitata persistenza nel tempo: nascono e muoiono; si vedono comparire dal nulla nella emissione e scomparire nell'assorbimento; il loro numero totale è variabile nel tempo. Quindi i fotoni non sono i corpuscoli ipotizzati da Newton nella teoria rivale a quella di Huygens sull'interpretazione della luce; i corpuscoli di Newton infatti avevano un carattere sostanziale benché imponderabile.

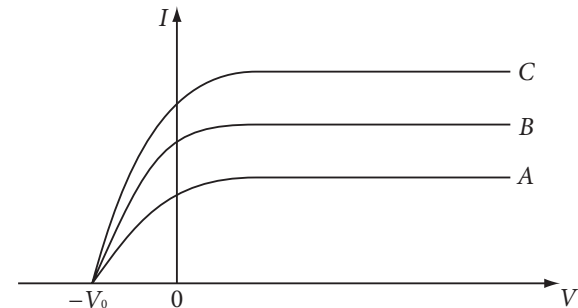
La teoria di Einstein, anche se a noi appare così limpida e convincente, incontro subito forti opposizioni e uno dei massimi detrattori fu lo stesso Planck. I fisici ottocenteschi erano così innamorati della teoria classica che cercarono in tutti i modi di trovare un modello che rendesse conto dei risultati sperimentali. Un esempio⁵ è quello di Max Born (da non confondersi con Niels Bohr):

Si fecero tentativi per spiegare classicamente la legge $E = h\nu$. Anch'io mi son reso colpevole di un tale delitto e per divertimento voglio mostrarvelo. Pensate ad un melo, nel quale la lunghezza l del picciolo della mela sia inversamente proporzionale al quadrato dell'altezza sopra il suolo; la sua frequenza di oscillazione sarà allora inversamente proporzionale alla radice quadrata di l e perciò proporzionale all'altezza della mela dal suolo. Se ora l'albero viene scosso con una data frequenza, le mele di una certa altezza entrano in risonanza, cadono giù e arrivano al suolo con una energia cinetica che è proporzionale all'altezza di caduta e perciò alla frequenza di scuotimento: ecco fatto. Questo ci sembra oggi forse infantile, per non dire puerile. Ma a mia discolpa posso addurre che lo stesso Planck ha scelto questo modello in qualche conferenza – come sia venuto a saperlo – non lo so.

Nonostante le critiche la teoria si mostrava sempre più feconda. Essa non spiegava soltanto l'effetto fotoelettrico, ma numerosi altri fenomeni classicamente misteriosi. A questo proposito un esperimento è particolarmente significativo: su un pulviscolo metallico sospeso in aria si mandano raggi X di debolissima intensità. L'elettromagnetismo classico consente di calcolare il tempo necessario affinché un grano di pulviscolo assorba l'energia occorrente per l'espulsione di un elettrone; si possono regolare le cose in modo che il tempo sia di parecchi secondi. Invece, contro le previsioni della fisica classica, gli esperimenti mostrano che l'espulsione degli elettroni avviene immediatamente dopo l'irradiazione del pulviscolo coi raggi X (per noi questo fatto è evidente in quanto vediamo le cellule fotoelettriche reagire immediatamente): si deve concludere che sul pulviscolo non arrivano onde elettromagnetiche ma una moltitudine di fotoni. C'è un'altra considerazione interessante su questa esperienza: essa ha permesso di calcolare che ogni particella del pulviscolo emette, in media, un elettrone per ogni intervallo di tempo calcolato mediante le equazioni classiche; ne risulta che la teoria classica può ancora accertarsi come legge statisticamente valida per un flusso di numerosissimi quanti.

Si noti che il tubo di vetro con cui è fatto l'apparato assorbe completamente le radiazioni ultraviolette per cui è necessario che la finestrella da cui si vogliamo far passare i raggi sia di un materiale trasparente all'ultravioletto: per esempio di quarzo.

Per determinare l'energia degli elettroni emessi, Lenard pose il collettore ad un potenziale negativo rispetto al catodo, in modo da creare un contro-campo elettrico che rallentasse gli elettroni stessi. In tal modo solo le particelle emesse con energia cinetica almeno uguale alla differenza di energia potenziale di un elettrone tra le due piastre avrebbero potuto giungere sul collettore dando luogo ad una corrente nel circuito. Ecco cosa ottenne dall'esperimento:



Sulle ascisse c'è la tensione V fra le placche regolata mediante il generatore variabile, sulle ordinate la corrente I misurata mediante il galvanometro; le tre curve si riferiscono ad intensità della luce decrescenti ($A < B < C$).

Il risultato alquanto sorprendente delle misure così effettuate fu l'esistenza di una differenza di potenziale minima $-V_0$ tra le piastre, in grado di arrestare completamente gli elettroni, del tutto indipendente dall'intensità della luce. Aumentando quest'ultima si osservava un aumento del numero di elettroni emessi (quindi dell'intensità della corrente), ma non della loro energia. Lenard rimase particolarmente colpito dal fatto che non sembrava esistere (e non esiste tuttora) una soglia di intensità al di sotto della quale il fenomeno non avesse luogo.

Ma le sorprese per Lenard non finivano qui. Grazie all'elevata potenza della lampada ad arco usata egli fu in grado di studiare l'emissione fotoelettrica utilizzando le diverse componenti spettrali della luce, trovando così che la massima energia degli elettroni emessi dipendeva dalla frequenza della luce cioè in pratica dal colore: la luce di lunghezza d'onda minore – ovvero di frequenza più elevata – provocava l'emissione di elettroni con maggiore energia. Queste misure non erano quantitativamente molto accurate, soprattutto a causa della rapidità con cui le superfici usate si ossidavano nel vuoto disponibile a quel tempo. Tuttavia lo erano abbastanza da permettere di stabilire le seguenti caratteristiche dell'effetto fotoelettrico:

- È un effetto a soglia ovvero, affinché la radiazione, colpendo la superficie metallica, dia luogo a emissione di elettroni, occorre che la sua frequenza ν superi un valore ν_0 caratteristico del metallo in questione, detto soglia fotoelettrica. Per $\nu < \nu_0$ il fenomeno non avviene, qualunque sia l'intensità della luce con cui si irradia la superficie metallica.
- Se $\nu > \nu_0$, l'effetto fotoelettrico avviene qualunque sia l'intensità della luce, anche con intensità

5. M. Born, *La fisica e il nostro tempo*, Sansoni, 1961

estremamente deboli. Il numero degli elettroni emessi per unità di tempo è proporzionale all'intensità della radiazione. Inoltre si verifica sperimentalmente che l'effetto ha luogo immediatamente, non appena la superficie del catodo viene investita dalla luce, anche con intensità così debole da richiedere un tempo molto lungo perché sull'area occupata da un atomo cada una quantità di energia pari a quella necessaria per estrarre un elettrone dal metallo.

- L'energia cinetica massima con cui i fotoelettroni escono dal metallo non dipende in alcun modo dall'intensità della luce ma solo dalla sua frequenza.

Questi fatti empirici resistono a qualsiasi tipo d'interpretazione nell'ottica classica. Infatti, la teoria ondulatoria della luce considera l'energia raggiante come uniformemente distribuita nell'onda luminosa. Per il principio di conservazione dell'energia, nell'effetto fotoelettrico una parte dell'energia raggiante si trasforma in energia cinetica degli elettroni espulsi. Quindi, se la radiazione incidente è più energetica, anche gli elettroni espulsi ne debbono avere di più, cioè dovrebbero essere più veloci. D'altra parte come è possibile che l'energia assorbita dagli elettroni dipenda dalla frequenza, ossia dal colore della luce? Essa, nella teoria classica dell'elettromagnetismo è proporzionale soltanto all'intensità della radiazione, e risulta del tutto indipendente dalla frequenza.

I tentativi fatti nei primi anni del secolo per inquadrare il fenomeno nelle leggi della fisica classica riuscirono del tutto vani; s'intuiva inoltre che non si trattava di transitorie difficoltà di adattamento, superabili con lievi aggiustamenti o con qualche ipotesi aggiuntiva come era avvenuto tante volte nella storia della scienza: si trattava di un dissidio profondo, inconciliabile.

La spiegazione di Einstein

Come abbiamo visto nella precedente dispensa Planck nel 1901, al fine d'interpretare la distribuzione spettrale dell'irraggiamento di un corpo nero, aveva ipotizzato che la radiazione elettromagnetica nei fenomeni di emissione fosse quantizzata ovvero che l'energia fosse espulsa per grani ognuno di energia $h\nu$. Questa ipotesi assolutamente non ortodossa era stata introdotta quasi di soppiatto, al fine di spiegare un singolo fenomeno particolare; essa al suo apparire non era stata presa molto sul serio e sembrò poco più di un espediente matematico provvisorio che gli ulteriori progressi teorici avrebbero certamente superato. È opinione condivisa infatti che un solo esperimento in grado di falsificare una teoria non sia sufficiente per avvalorarne una nuova.

È a questo punto che entra in gioco il grande Albert Einstein che nel 1905, appena venticinquenne, scrive tre articoli³ destinati a cambiare la storia della fisica, ognuno dei quali è degno di un premio Nobel. Egli mostrò che l'effetto fotoelettrico si spiega con facilità e grande naturalezza, fin nei minimi particolari, se la quantizzazione, limitata da Planck alla sola emissione, si estenda anche alla radiazione; cioè se si supponga che il quanto di energia $h\nu$, una volta emesso, non si sparpagli, ma conservi una propria individualità localizzata nello spazio.

3. Il 1905 è il cosiddetto *Annus Mirabilis* nel quale Albert Einstein pubblica sugli *Annalen der Physik* i seguenti articoli: 1) *On a Heuristic Viewpoint Concerning the Production and Transformation of Light* (9 Giugno) sull'effetto fotoelettrico; 2) *On the Motion of Small Particles Suspended in a Stationary Liquid, as Required by the Molecular Kinetic Theory of Heat* (18 Luglio) sul moto browniano; 3) *On the Electrodynamics of Moving Bodies* (26 Settembre) sulla relatività ristretta; 3 bis) *Does the Inertia of a Body Depend Upon Its Energy Content?* (21 Novembre) nel quale si enuncia la celebre equazione $E = mc^2$. Riceverà il Nobel nel 1921 per il primo articolo.

Leggiamo direttamente cosa scrive Einstein nell'introduzione dell'articolo del 1905 *Un punto di vista euristico sulla produzione e la trasformazione della luce*, per il quale gli fu assegnato il Nobel nel 1921:

Esiste una differenza formale di grande importanza fra le concezioni che sostengono i fisici nei confronti dei gas e degli altri corpi ponderabili e la teoria di Maxwell riguardante i processi elettromagnetici nel cosiddetto vuoto. Mentre possiamo considerare che lo stato di un corpo viene definito con precisione dalle posizioni e velocità di un numero elevato, ma tuttavia finito, di atomi ed elettroni, dobbiamo usare, per definire lo stato elettromagnetico di un certo spazio, funzioni spaziali continue, per cui un numero finito di grandezze non basta più a definire lo stato elettromagnetico di uno spazio...” Secondo la teoria di Maxwell l'energia presente in tutti i fenomeni di carattere esclusivamente elettromagnetico (e quindi anche la luce) è da considerarsi una funzione spaziale continua, mentre i fisici moderni concepiscono l'energia di un corpo ponderabile come risultato di una somma sugli atomi ed elettroni. L'energia di un corpo ponderabile non può essere suddivisa in un numero arbitrario di parti piccole a piacere, mentre la teoria di Maxwell sulla luce (e, in generale, qualunque teoria ondulatoria) afferma che l'energia di un raggio luminoso, emesso da una sorgente luminosa, si distribuisce in modo continuo su di un volume sempre crescente. La teoria ondulatoria della luce, che fa uso di funzioni spaziali continue, si è verificata ottima per quel che riguarda i fenomeni puramente ottici e sembra veramente insostituibile in questo campo. Tuttavia, bisogna tenere presente che le osservazioni ottiche si riferiscono a valori medi nel tempo e non a valori istantanei; sebbene abbiano trovato assoluta conferma la teoria della diffrazione, della riflessione, della rifrazione, della dispersione, ecc..., è pensabile che la teoria della luce, fondata su funzioni spaziali continue, possa entrare in conflitto con l'esperienza qualora venga applicata ai fenomeni di emissione e trasformazione della luce. Infatti mi sembra che le osservazioni compiutesi sulla radiazione di corpo nero, la fotoluminescenza, l'emissione di raggi catodici tramite luce ultravioletta ed altri gruppi di fenomeni relativi all'emissione ovvero alla trasformazione della luce, risultino molto più comprensibili se vengono considerate in base all'ipotesi che l'energia sia distribuita nello spazio in modo discontinuo. Secondo l'ipotesi che voglio qui proporre, quando un raggio di luce si espande partendo da una sorgente puntiforme, l'energia non si distribuisce con continuità su volumi sempre più grandi, bensì rimane costituita da un numero finito di quanti di energia localizzati nello spazio, che si muovono senza suddividersi e che non possono essere assorbiti o emessi parzialmente. Nelle pagine successive, intendo spiegare il ragionamento ed i fatti che mi hanno spinto su questa strada, nella speranza che il punto di vista da me difeso possa risultare utile.

Nel 1938, in un volume⁴ scritto in collaborazione con Leopold Infeld, Einstein spiegava l'effetto fotoelettrico con parole ancora più semplici:

È senz'altro evidente che la teoria quantistica della luce dà ragione dell'effetto fotoelettrico. Un raffica di fotoni colpisce una lastra metallica. L'interazione tra radiazione e materia consiste in tal caso in una moltitudine di singoli processi, per cui un fotone percuote un atomo facendone uscire un elettrone. Questi singoli processi sono tutti identici e perciò tutti gli elettroni espulsi debbono avere la stessa energia. È altresì chiaro che accrescere l'intensità della luce significa, nel nostro nuovo linguaggio, accrescere il numero di fotoni inviati. In tal caso avverrà che un maggior numero di elettroni sarà espulso dalla lastra metallica, senza che l'energia di nessuno di essi si differenzi da quella degli altri. Vediamo dunque che la teoria è in perfetto accordo con l'esperienza.

Se a questa spiegazione qualitativa (o per meglio dire, retorica) vogliamo proprio aggiungere qualche elemento quantitativo (ovvero qualche formula per risolvere chissà quali problemi) possiamo dire che se un granello di luce (quello che Compton nel 1923 chiamerà fotone) colpisce un elettrone della materia gli cede tutta la propria energia: l'elettrone ne spende una parte per vincere le forze che lo vincolano alla materia e trasforma in energia cinetica propria la parte rimanente. Ne segue che il fotone deve possedere una energia minima sufficiente per svincolare l'elettrone dalla materia. Ad uscire dal corpo con la massima velocità normale saranno solo gli elettroni eccitati che si trovano direttamente sulla sua superficie e che acquistano una velocità normale ad essa. L'energia cinetica di tali elettroni vale:

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - W$$

4. A. Einstein - L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*, Boringhieri, 1948