

Effetto fotoelettrico

L'effetto fotoelettrico consiste nell'emissione di elettroni da parte di alcuni metalli la cui superficie è investita da un intenso fascio di luce. Questo fenomeno di per sé non è sorprendente: sappiamo che la luce è radiazione e.m., per cui è lecito aspettarsi che il campo elettrico dell'onda luminosa possa esercitare una forza sugli elettroni superficiali e provocare l'espulsione di alcuni di essi dal metallo. Nel 1902, però, il fisico tedesco Philipp von Lénárd osservò alcuni strani comportamenti. Ad esempio:

- maggiore è l'intensità della luce, maggiore è il numero di elettroni emessi, tutti della stessa energia;
- più corta è la lunghezza d'onda della luce incidente, maggiore è l'energia degli elettroni.

Entrambi questi risultati sono inspiegabili nell'ambito della teoria ondulatoria classica della luce: l'energia di un'onda dipende dalla sua intensità - percepita, nel caso della luce, come brillantezza -, non dalla sua lunghezza d'onda.

Nel 1905, Einstein, allora oscuro impiegato dell'Ufficio Brevetti di Berna, suggerì una spiegazione per entrambi questi comportamenti: l'energia in un fascio di luce monocromatica è distribuita in pacchetti di grandezza $h\nu$, dove ν è la frequenza della luce. Questo **quantum** d'energia può essere trasferito completamente a un elettrone. Se indichiamo con W (costante caratteristica del materiale, indipendente da ν) l'energia necessaria per rimuovere l'elettrone dal metallo, l'elettrone verrà emesso con una energia cinetica

$$T = h\nu - W.$$

Questa è l'*equazione fotoelettrica* di Einstein: l'energia degli elettroni emessi cresce linearmente con la frequenza ma è indipendente dall'intensità della sorgente luminosa. È evidente che maggiore è l'intensità della luce, maggiore è il numero di quanti presenti e, quindi, maggiore sarà il numero di elettroni con energia cinetica T prodotti.

Einstein era giunto a questa idea dall'osservazione che alcuni aspetti misteriosi della legge del corpo nero potevano essere compresi assegnando proprietà corpuscolari alla radiazione e.m. confinata in una cavità, ovvero assumendo che l'energia radiante consistesse di quanti di grandezza $h\nu$. Ai tempi in cui fu proposta, il reale significato dell'ipotesi di Planck era avvolto nella più profonda oscurità e il punto di vista suggerito da Einstein rappresentò un importante passo avanti. L'aspetto più rilevante era, però, costituito dal fatto che tale idea era trasferibile anche a una nuova situazione, ovvero l'effetto fotoelettrico.

Dieci anni dopo, Einstein avanzò l'ipotesi che questi quanti di luce, nelle interazioni con la materia, fossero in grado di trasferire, oltre all'energia, anche una quantità d'impulso pari a¹:

$$p = \frac{h}{\lambda}. \quad (1)$$

Questa idea conferisce ancor più lo status di particella ai quanti di luce. La comunità dei fisici del tempo fu comprensibilmente restia ad accettare la nozione che la luce potesse essere composta di particelle². Uno dei risultati che orientò definitivamente verso l'accettazione dell'idea di Einstein fu l'esperimento di Arthur Compton, il quale mostrò come i raggi X collidono con gli elettroni (*effetto*

¹Ovvero, la formula di de Broglie è di Einstein!

²Newton, nel 1665, spiegò la scomposizione nei vari colori della luce solare incidente su un prisma di vetro assumendo che la luce bianca fosse una miscela di particelle che davano luogo ai diversi colori: poiché queste particelle interagivano in modo diverso con la materia, all'uscita del prisma risultavano separate. La notorietà del proponente consentì la rapida affermazione di questa visione particellare. A corroborare l'idea contribuì anche l'osservata nettezza delle ombre degli oggetti: se la luce fosse stata un'onda le ombre avrebbero dovuto essere sfocate, si credeva a quel tempo. Questa idea resistette per oltre un secolo, fino a quando, nel 1801, Young realizzò l'esperimento della doppia fenditura con la luce. Questo esperimento mostrò in modo incontrovertibile la natura ondulatoria della luce (le ombre nette sono conseguenza del fatto che la lunghezza d'onda della luce visibile è estremamente piccola: un decimo di micron.)

Compton) allo stesso modo delle particelle dotate di energia e impulso. Questo risultato realizzò la connessione tra le due equazioni per i quanti di luce: dalla espressione $E = h\nu$ dell'energia del quanto e dalla (1), tenendo conto che $\lambda = c/\nu$, si ottiene facilmente

$$E = p c,$$

il che implica che quanto di luce ha massa nulla e, quindi, si muove alla velocità della luce³. Nel 1929, G. N. Lewis propose per il quanto di luce il nome di **fotone**.

Esistono i fotoni?

La trattazione della sezione precedente è quella che trovate su, praticamente, tutti i libri di testo, secondo i quali l'effetto fotoelettrico è la prova della natura corpuscolare della luce, interpretazione per la quale Einstein ricevette, nel 1921, il premio Nobel.

Però, nel 1969, Jaynes, Lamb e Scully hanno mostrato che è possibile spiegare tale effetto senza ricorrere al concetto di fotone. Questo risultato è ottenuto a partire da un'analisi *semiclassica* del processo: gli atomi sono quantistici (i.e., possiedono una struttura a livelli d'energia), ma la luce è classica (i.e., una pura onda e.m. senza alcun connotato di granularità), rappresentata da una singola onda sinusoidale di pulsazione ω :

$$E = E_0 \cos \omega t$$

Questa onda è trattata come una perturbazione la cui interazione con l'atomo è descritta da un potenziale (approssimazione di dipolo):

$$V(t) = -e E x(t)$$

dove $x(t)$ è lo spostamento dell'elettrone e il suo coefficiente rappresenta la forza agente su questo. È questa forza che determina l'espulsione dell'elettrone dall'atomo alla base dell'effetto fotoelettrico. Con i metodi standard della Meccanica Quantistica⁴, per la probabilità di transizione tra lo stato fondamentale e il livello eccitato di energia E_k , si trova:

$$P(t) \propto (e E_0)^2 \frac{\sin^2 \left[(E_k - \hbar \omega) \frac{t}{2\hbar} \right]}{(E_k - \hbar \omega)^2}, \quad (2)$$

da cui si vede che ci troviamo in presenza di una *risonanza*: l'eccitazione dell'elettrone si verifica soltanto quando

$$\omega = \frac{E_k}{\hbar}$$

Da questo risultato segue che:

- esiste una soglia per l'innescare del fenomeno;
- la corrente di elettroni generata è proporzionale all'intensità luminosa (probabilità $\propto E_0^2$);

³Per comprendere queste affermazioni occorre tener presente che le espressioni relativistiche della velocità e dell'energia di una particella di massa m e impulso p sono, rispettivamente, date da

$$v = \frac{c^2 p}{E} \quad E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}.$$

⁴La cosiddetta teoria delle perturbazioni dipendenti dal tempo.

i.e., tutti gli aspetti distintivi dell'effetto fotoelettrico sono riprodotti senza dover assumere che la luce è corpuscolare. Inoltre, la natura casuale degli eventi individuali è preservata ma dovuta non alla natura quantistica della luce, ma a quella della materia.

Su quali basi, allora, crediamo nei fotoni? Come potremmo realizzare un esperimento che fornisca evidenza per la natura particellare della luce? La traccia è nel senso del termine “particella”. Per sua natura, una particella occupa una posizione definita nello spazio: è “qui” o “là”, mai in entrambi i posti contemporaneamente. Al contrario, un'onda è distribuita su una regione estesa. Siamo, quindi, portati a disegnare un esperimento che stabilisca se la luce può, o meno, essere in punti distanti tra loro allo stesso tempo. A tale scopo utilizziamo due diversi rivelatori di luce, li illuminiamo con la stessa sorgente di luce e cerchiamo di stabilire se essi generano un “click” allo stesso istante di tempo. Se la luce è una particella questo non può accadere.

Consideriamo l'apparato sperimentale riportato in Fig. 1. La luce investe uno specchio semiriflettente (beam-splitter), il quale è realizzato in modo da riflettere metà della luce che lo colpisce e lasciar passare l'altra metà, per cui se I è l'intensità della sorgente luminosa ciascun rivelatore registra un'intensità $I/2$. Questo è il comportamento medio, ma possiamo investigare più in dettaglio la situazione studiando la risposta temporale dei due rivelatori alla luce che incide su essi.

Ciascun rivelatore risponde alla luce con dei “click”, il che non implica che la luce sia quantizzata, ma soltanto che la risposta dei rivelatori alla luce è discretizzata⁵. Il circuito di coincidenza emette un segnale solo se i click dei rivelatori sono prodotti nello stesso istante.

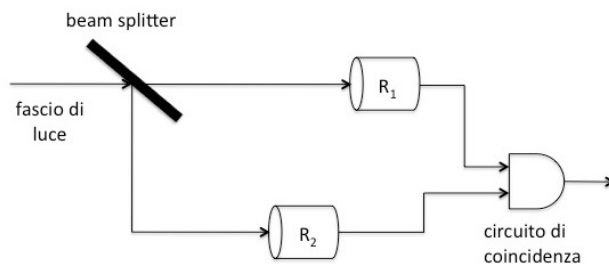


Figura 1: Esperimento di anticoincidenza per dimostrare la natura granulare della luce. Come rivelatori possiamo usare dei fotomoltiplicatori o delle CCD (in tutto e per tutto identiche a quella della camera fotografica del vostro cellulare).

Indicate con $P_{1,2}$ le probabilità di risposta di $R_{1,2}$ e con P_c quella del circuito di coincidenza, i risultati dell'esperimento sono convenientemente analizzati in termini di un parametro di *anticoincidenza* definito come:

$$A = \frac{P_c}{P_1 P_2} . \quad (3)$$

A seconda della natura della luce, questo parametro assume valori diversi:

- i) Se la luce è composta di fotoni, R_1 e R_2 non possono mai rispondere allo stesso istante. Un qualunque fotone non può essere “suddiviso” in qualche strana maniera dal beam-splitter, in modo che metà vada verso un rivelatore e metà verso l'altro; se avvenisse ciò, per la conservazione dell'energia, dovremmo osservare emergere dal beam-splitter due fotoni di energia metà e, quindi, di frequenza metà rispetto a quello emesso dalla sorgente luminosa. Invece, c'è una uguale probabilità - $1/2$ - che un fotone venga trasmesso o riflesso dal beam-splitter. Inoltre,

⁵Pensate alle foglie (discrete) degli alberi che cadono sotto l'azione del vento (continuo).

non c'è nessuna differenza misurabile tra i due tipi di fotoni, nessuna proprietà che consenta di determinare a priori quale percorso essi prenderanno⁶. Questo comporta $P_c = 0$, quindi $A = 0$.

- ii) Se la luce non possiede proprietà particellari, i rivelatori possono emettere click contemporaneamente, per cui: $A \neq 0$. In effetti, se i click sono generati in modo casuale, la coincidenza emerge, in modo random, dalla fortuita circostanza in cui R_1 e R_2 clickano insieme, cosa che avviene con probabilità $P_c = P_1 P_2$, per cui $A = 1$.

Nell'esperimento vengono registrati i conteggi dei due rivelatori ($N_{1,2}$) e il numero di coincidenze (N_c) per un assegnato intervallo di tempo T . Ovviamente, la condizione di coincidenza si intende verificata se i segnali generati dai rivelatori si presentano all'ingresso del circuito di coincidenza con un ritardo tra loro, in modulo, minore di un certo (breve) intervallo di tempo Δt , che rappresenta la risoluzione temporale dell'apparato. Quindi, durante l'esperimento ciascun rivelatore ha $T/\Delta t$ opportunità di generare un click; lo stesso dicasi per il contatore di coincidenze. Le probabilità di risposta si ottengono come rapporto tra i conteggi e il numero di opportunità, ovvero ($\alpha = 1, 2, c$):

$$P_\alpha = \frac{N_\alpha}{(T/\Delta t)}$$

da cui si ottiene

$$A = \frac{N_c}{N_1 N_2} \left(\frac{T}{\Delta t} \right) \quad (4)$$

I primi a realizzare questo tipo di esperimento furono i fisici inglesi Hanbury-Brown e Twiss, nel 1956. Come sorgente di luce usarono una lampada al mercurio di debole intensità⁷, e dei fotomoltiplicatori come rivelatori di luce. Di fronte a ciascuno di essi è, inoltre, posto un filtro a banda stretta che seleziona la riga con lunghezza d'onda 435.8 nm.

L'esito dell'esperimento per il parametro di anticorrelazione fu stupefacente: $A = 2$! Cosa significa questo risultato? Chiaramente, non fornisce alcuna evidenza per la natura particellare della luce (si sarebbe dovuto ottenere: $A = 0$), ma può essere spiegato alla luce dell'interpretazione classica della luce? Esploriamo questa possibilità. Abbandoniamo il concetto di fotone e pensiamo il fascio di luce semplicemente come un'onda che trasporta energia. Anche per i rivelatori adottiamo una rappresentazione completamente classica: si tratta di dispositivi che catturano e immagazzinano questa energia fino a che essa non raggiunge un certo valore, sufficiente per generare un click. All'interno di tale quadro, ciascun rivelatore sarà quindi "riempito" alla stessa velocità e, quindi, produrrà click alla stessa velocità. Se all'inizio entrambi i rivelatori non hanno alcuna energia immagazzinata, ci vorrà lo stesso tempo per riempirli e, quindi, emetteranno il loro primo click nello stesso istante, dando luogo a una coincidenza. Immediatamente dopo essi saranno vuoti e ricominceranno ad accumulare energia, fino ad emettere il loro secondo click e generare un'altra coincidenza. Chiaramente, in questo quadro, ogni evento è una coincidenza: $N_c = N_1 = N_2$, per cui $A = 1/P_1$. Poiché $P_1 \ll 1$, il parametro di anticorrelazione è enorme, in disaccordo con quanto osservato nell'esperimento. Possiamo, allora, immaginare che l'esperimento inizi con i rivelatori in uno stato di parziale e diverso riempimento. Non funziona: in questo caso, i click non saranno mai in coincidenza e dovremmo ottenere $A = 0$. Possono essere immaginate altre modifiche dello scenario classico, ma nessuna riesce a riprodurre il risultato osservato: non si è mai riusciti a fornire una spiegazione classica dell'esperimento di Hanbury-Brown e Twiss.

⁶È bene notare che la sequenza dei fotoni nei due rivelatori non è regolare: non è che se un fotone viene riflesso quello successivo è trasmesso, e viceversa: la sorte di ciascun fotone quando colpisce il beam-splitter è determinata lanciando una moneta.

⁷Anche nel caso di fotoni, si ha una coincidenza se casualmente capita che due fotoni arrivano allo stesso istante ai rispettivi rivelatori. La probabilità di questo evento decresce con l'intensità della luce, per cui tutti gli esperimenti di questo tipo devono operare con sorgenti di luce di intensità molto bassa.

Come fatto per l'effetto fotoelettrico, passiamo a considerare, allora, uno scenario semi-classico dove la luce è descritta in termini puramente classici, ovvero come costituita esclusivamente di onde, mentre i rivelatori sono trattati come sistemi quantistici che possiedono parecchi livelli di energia: il processo di rilevazione è una transizione dallo stato fondamentale a uno di energia positiva nel continuo. In base alla (2), per la probabilità che un fascio luminoso di intensità I produca una transizione in un tempo Δt si ha:

$$P_{1,2} = \alpha_{1,2} I \Delta t, \quad (5)$$

con $\alpha_{1,2}$ costante di proporzionalità caratteristica del rivelatore. Quindi:

$$P_c = \alpha_1 \alpha_2 (I \Delta t)^2 \quad (6)$$

per cui, risulta:

$$A = \frac{\alpha_1 \alpha_2 (I \Delta t)^2}{(\alpha_1 I \Delta t) (\alpha_2 I \Delta t)} = 1, \quad (7)$$

in *completo disaccordo* con il risultato di Hanbury-Brown e Twiss. Nella discussione abbiamo implicitamente assunto che l'intensità del fascio luminoso fosse costante nel tempo. Questa ipotesi non è verificata per la lampada al mercurio usata da Hanbury-Brown e Twiss, per la quale il valore istantaneo di I fluttua rapidamente intorno a un certo valore medio. Per tali sorgenti, in luogo delle (5) e (6), dovremmo, più correttamente, scrivere:

$$P_{1,2} = \alpha_{1,2} \langle I \rangle \Delta t \quad P_c = \alpha_1 \alpha_2 \langle I^2 \rangle (\Delta t)^2$$

dove $\langle \rangle$ indica la media temporale. Da ciò si ottiene:

$$A = \frac{\alpha_1 \alpha_2 \langle I^2 \rangle (\Delta t)^2}{\alpha_1 \alpha_2 (\langle I \rangle \Delta t)^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2}.$$

e, quindi, per la disuguaglianza di Cauchy-Schwartz⁸

$$\langle I^2 \rangle \geq \langle I \rangle^2,$$

deduciamo che, in base alla teoria semiclassica, *il parametro di anticorrelazione per una sorgente fluttuante è sempre maggiore di 1*. Questo risultato, sebbene non spieghi l'osservazione sperimentale di Hanbury-Brown e Twiss, è in accordo con questa. In effetti, una trattazione semiclassica più approfondita fornisce $A = 2$, in accordo con quanto ottenuto nell'esperimento.

All'inizio degli anni '70, l'esperimento di Hanbury-Brown e Twiss fu ripetuto utilizzando come sorgente luminosa la luce emessa da un laser. Il parametro di anticorrelazione risultò essere uguale a 1, come previsto dalla teoria semiclassica (cfr. (7)) nel caso di sorgente costante nel tempo, qual è il laser.

Fotoni

Questi esperimenti mettono in discussione la validità della Meccanica Quantistica? Dal fatto che si osserva un parametro di anticorrelazione diverso da zero è lecito dedurre che la luce non ha una natura corpuscolare?

In realtà, un'analisi più approfondita mostra che questi esperimenti, sebbene non supportino la rappresentazione della luce in termini di fotoni, nemmeno la invalidano. Il problema è nel fatto che ogni esperimento che intenda evidenziare il carattere corpuscolare della luce raggiungerà lo scopo solo se la luce impiegata è costituita da un numero ben definito di fotoni - precisamente, uno solo.

⁸In uno spazio vettoriale dotato di un prodotto scalare definito positivo, per il prodotto scalare di due vettori qualunque risulta: $\vec{a} \cdot \vec{b} \leq |\vec{a}| |\vec{b}|$.

In Meccanica Quantistica, ad ogni osservabile corrisponde un operatore matematico. Gli stati quantistici (i.e., le funzioni d'onda) associati a valori definiti di un osservabile sono gli **autostati** dell'operatore associato, i.e. verificano l'equazione

$$\mathcal{A}\psi = a\psi$$

dove a è detto **autovalore** e rappresenta il valore fisico dell'osservabile. Ad esempio, le funzioni d'onda dell'atomo d'idrogeno sono gli autostati dell'operatore energia (Hamiltoniana). Negli esperimenti congegnati per stabilire l'esistenza dei fotoni, la sorgente deve produrre luce in un autostato dell'operatore **numero dei fotoni** \mathcal{N} . La luce utilizzata negli esperimenti descritti nella sezione precedente non possiede questa proprietà; essa era in uno stato quantistico risultante dalla sovrapposizione lineare di molti autostati differenti dell'operatore \mathcal{N} .

Una sorgente che genera luce in un autostato di \mathcal{N} fu realizzata per la prima volta a metà degli anni '70. Essa è costituita da atomi di calcio che, illuminati da opportuna luce laser, vengono eccitati a un livello atomico superiore, il quale decade rapidamente nello stato fondamentale di partenza emettendo, in rapida sequenza, due fotoni di energia diversa. L'esperimento di Hanbury-Brown e Twiss con questo tipo di sorgente venne realizzato da Aspect, Grangier e Roger nel 1986 (cfr Fig. 2). Il fotone ν_1 agisce da “trigger” del circuito di coincidenza, il quale accetta i segnali in ingresso

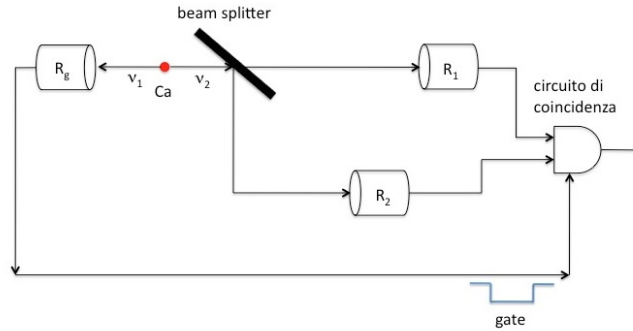


Figura 2: Esperimento di Aspect, Grangier e Roger. Il segnale generato dal rivelatore R_g , una volta investito da uno dei due fotoni (ν_1) prodotti dall'atomo di calcio, opportunamente riformato come segnale logico (“gate”), abilita il funzionamento del circuito di coincidenza al cui ingresso sono stati inviati i segnali provenienti da R_1 e R_2 .

soltanto se essi si presentano all'interno della finestra temporale rappresentata dal segnale di “gate”. Tale particolare disposizione sperimentale viene realizzata per rigettare i segnali di luce casuali che incidono sui rivelatori $R_{1,2}$, e isolare il segnale associato ai soli fotoni ν_2 emessi dagli atomi di calcio. Inoltre, regolando opportunamente la frequenza di ripetizione dell'impulso laser che eccita questi atomi, è possibile rendere l'intervallo di tempo tra l'emissione atomica di coppie successive di fotoni $\nu_{1,2}$ maggiore di quello richiesto a rivelatori e elettronica per elaborare l'informazione relativa al passaggio del fotone ν_2 attraverso l'apparato. In questo modo si è sicuri che la parte di apparato successivo al beam-splitter sia sollecitata da un fotone alla volta.

Con questo apparato Aspect, Grangier e Roger misurarono $A = 0$: *i fotoni esistono!*

Concludiamo questa sezione con due osservazioni. La prima è che Einstein, invece che per la rivoluzionaria teoria della Relatività, ha ricevuto il premio Nobel per un lavoro in seguito rivelatosi non corretto. L'ironia è doppia se si realizza che sebbene nel modo sbagliato, questo lavoro anticipava l'idea che la dualità onda-particella potesse essere estesa anche alla luce, idea in seguito rivelatasi giusta.

L'altra osservazione ha a che fare con la natura di un fascio di luce. Molti tendono a immaginare i fotoni come i costituenti della luce: la stessa relazione esistente tra atomi e materia. Questa visione è sbagliata. Mentre il tavolo su cui state leggendo è costituito da un numero definito di atomi, lo stesso non può dirsi della luce emessa dalla lampada che illumina la stanza. Questa, come la maggior parte dei fasci luminosi, non sono composti da uno, o dieci, o un particolare numero di fotoni. Nella realtà, queste forme di luce possono essere rappresentate in termini di idee classiche combinate con trattazioni quantistiche del processo di rivelazione. La lezione più importante di questa sezione è che il concetto di fotone è ben più sottile di quanto potessimo immaginare.

Dualità onda-particella per un singolo fotone

Avendo mostrato che al beam-splitter particelle individuali provenienti dalla sorgente di calcio erano o riflesse o trasmesse, Aspect e collaboratori proseguirono la loro indagine utilizzando tali fotoni per degli esperimenti di interferenza.

Per questo tipo di esperimenti, invece dell'interferometro di Michelson-Morley risulta più conveniente usare quello detto di Mach-Zender, il cui schema è riprodotto in Fig. 3. L'aspetto è quello di un "quadrato" in cui i due fasci all'uscita del beam-splitter posto di fronte alla sorgente luminosa (vertice superiore sinistro del "quadrato") invece di essere riflessi da specchi finali perfettamente riflettenti e ricombinati nello stesso beam-splitter che li ha separati, come nel caso Michelson-Morley, vengono ricombinati in un beam-splitter diverso (vertice inferiore destro del "quadrato"). In questo

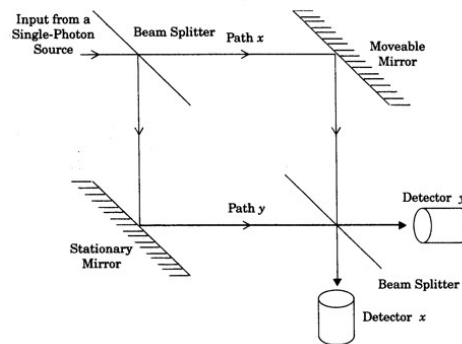


Figura 3: Schema di principio dell'interferometro di Mach-Zender.

apparato, l'intensità della luce che arriva ai rivelatori D_x e D_y dipende in modo critico dalle lunghezze dei due possibili percorsi che la luce può seguire a partire dal primo beam-splitter. Lo scopo dello specchio mobile nel vertice superiore destro del "quadrato" è proprio quello di variare la differenza di "cammino ottico" tra i due percorsi.

Vediamo ora cosa accade con un solo fotone nell'apparato. Poiché tra ingresso e uscita ci sono due differenti cammini a disposizione per il fotone, si può avere interferenza. Il risultato ottenuto da Aspect e collaboratori è mostrato in Fig. 4. Esso mostra chiaramente una figura d'interferenza al variare della differenza di cammino ottico tra i due rami dell'interferometro: il fotone, che nel caso dell'esperimento di Fig. 2 segue un ben preciso percorso, ora li percorre entrambi.

Un modo di interpretare i risultati fin qui esposti è quello di dire che i fotoni (così come gli elettroni, i neutroni, gli atomi ...) nel propagarsi verso un apparato di misura sono in grado di "riconoscerne" la funzione e aggiustano la loro natura di conseguenza. Se essi riconoscono che l'esperimento è in grado di dimostrare interferenza, essi divengono onde; se, invece, riconoscono un apparato in grado di stabilire quale ramo dell'interferometro segue il fotone (i.e., per quale fenditura passa l'elettrone), allora divengono particelle. Potremmo riferirci a questo punto di vista affermando che è in atto una

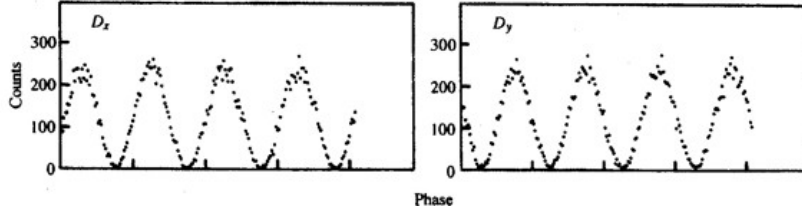


Figura 4: Figure d'interferenza osservate nei rivelatori dell'esperimento di Grangier, Roger a Aspect.

cospirazione nella realtà fisica. Si può anche tentare di proporre un modello teorico per la descrizione di tale idea. Possiamo pensare che il riconoscimento dell'apparato sperimentale potrebbe coinvolgere un processo tramite il quale, ad esempio, i primi fotoni nell'interferometro creano le condizioni che determinano il comportamento di quelli successivi.

È chiaro che questo punto di vista, sebbene richieda una revisione delle nostre idee classiche, non è tra i più radicali che si possano immaginare. Il problema è se questa idea è corretta, e, nel 1978, il fisico americano Wheeler propose un tipo di esperimento per sottoporla a verifica. L'esperimento è detto a **scelta ritardata**, e, realizzato in tempi recenti, ha mostrato che una revisione come quella appena descritta non è sufficiente: il tentativo della teoria della cospirazione di attenuare la portata della crisi introdotta dalla dualità onda-particella è destinato a fallire. Inoltre tale esperimento rende ancor più misteriosa la natura della luce, rendendo evidente la necessità di attuare una profonda rivoluzione nel nostro modo di immaginare i fenomeni del mondo quantistico.

L'esperimento proposto da Wheeler, basato sull'interferometro di Mach-Zender, è pensato per rivelare particelle o onde, ma la scelta di quale aspetto osservare è ritardata fino a dopo che il fotone ha "deciso" cosa essere. Nell'interferometro, infatti, il secondo beam-splitter può essere inserito o rimosso quando si vuole (cfr Fig. 5). Immaginiamo un singolo fotone che entra nell'interferometro

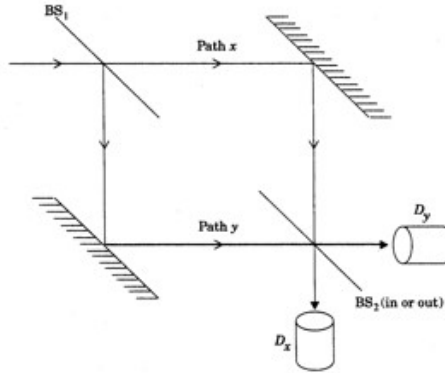


Figura 5: Schema di principio dell'interferometro Mach-Zender usato nell'esperimento di scelta ritardata. In questo caso entrambi gli specchi sono fissi, mentre BS₂ è mobile.

tramite il primo beam-splitter (BS₁). In assenza del secondo beam-splitter (BS₂), i rivelatori D_x e D_y registrano quale ramo dell'interferometro è stato percorso dal fotone: se esso ha seguito il percorso x, il segnale sarà emesso da D_x; nel caso che il fotone segua il percorso y, sarà D_y a scattare. Ma nel caso in cui BS₂ è inserito, abbiamo a che fare con un esperimento d'interferenza: perdiamo qualunque informazione sul percorso seguito dal fotone, e comparirà la caratteristica figura d'interferenza.

La modifica proposta di Wheeler consiste nel ritardare la scelta se inserire o meno BS₂ fino a quando il fotone è entrato, tramite BS₁, nell'interferometro. Ovvero la configurazione sperimentale è ambigua fino all'ultimo momento. In base alla teoria della cospirazione, questo inserimento/rimozione

all'ultimo minuto di BS_2 dovrebbe “confondere” la luce. Immaginiamo, ad esempio, che all'inizio dell'esperimento BS_2 sia rimosso. Secondo la teoria della cospirazione ciò induce ciascun fotone a comportarsi come una particella e scegliere uno tra i due percorsi possibili, continuando a seguirlo anche molto dopo aver oltrepassato BS_1 . La successiva inserzione di BS_2 non altera questa scelta e, anche se è presente quando il fotone lo raggiunge, non può manifestarsi interferenza.

Cosa succede nella realtà? L'esperimento di Wheeler è stato realizzato, nel 1987, all'istituto Max Planck per l'Ottica Quantistica di Monaco da Hellmuth, Walther, Zajonc e Schleich. Lo schema sperimentale approntato è riportato in Fig. 6. Non fu possibile rimuovere fisicamente BS_2 in tempi

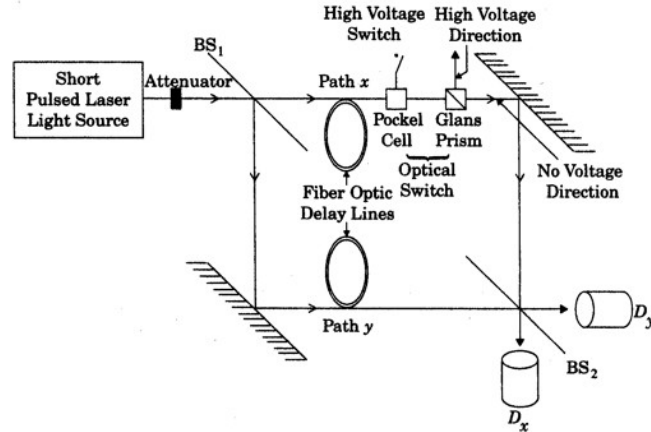


Figura 6: Schema dell'interferometro di Mach-Zender utilizzato nell'esperimento di Hellmuth et al.

relativamente brevi, per cui si procedette a inserire lungo uno dei rami dell'interferometro una sorta di “specchio elettronico”. Questo fu realizzato tramite una cella di Pockel, un dispositivo abbastanza comune in tutti i laboratori di ottica, che agisce come un interruttore che in tempi brevissimi (5 ns) è in grado, tramite l'applicazione di un campo elettrico, di commutare da aperto a chiuso. Quando il campo è applicato alla cella è come se sul ramo ci fosse uno specchio perfettamente riflettente inclinato a 45° che devia la luce fuori dall'interferometro, e, quindi, l'unica luce che arriva a BS_2 proviene dall'altro ramo (nel caso rappresentato in figura, quello y). Questa situazione è perfettamente equivalente all'assenza di BS_2 , per cui non abbiamo interferenza. Quando il campo elettrico non è applicato la cella di Pockel è trasparente e BS_2 riceve luce da entrambi i rami, e l'interferenza è possibile. Per consentire il corretto funzionamento della cella, il tempo di percorrenza del fotone nell'interferometro fu esteso a circa 30 ns inserendo in ciascun ramo una fibra ottica lunga 10 m.

Il risultato fu che non importava quando veniva inserito BS_2 (cella di Pockel in condizione “chiuso”), si osservava comunque una figura d'interferenza. Viceversa, se l'esperimento cominciava con BS_2 inserito, e veniva successivamente rimosso (cella di Pockel in condizione “aperto”), l'interferenza non era mai visibile. Queste osservazioni sono in accordo con quanto previsto dalla Meccanica Quantistica, e in contrasto con la teoria della cospirazione. Il fotone può passare dal percorrere un solo ramo a percorrerli entrambi in qualunque momento della sua storia: *il fotone non si confonde mai*. Anche quando l'apparato sperimentale viene cambiato “dopo che il fotone ha fatto la sua scelta”, esso fa sempre la cosa giusta!

Cosa ci dice questo risultato? Per apprezzare il significato dell'esperimento della scelta ritardata, Wheeler suggerì un *gedanken experiment* (esperimento concettuale). La proposta si basa sul fenomeno delle *lenti gravitazionali*⁹ ed è illustrata in Fig. 7, dove sono rappresentate le traiettorie dei raggi di

⁹Una predizione fondamentale della Relatività Generale di Einstein è che la traiettoria della luce, in prossimità di una sorgente di campo gravitazionale, viene deviata in conseguenza della curvatura dello spaziotempo prodotta dal

luce emessi da un quasar lontano quando una galassia, o un cluster di galassie, è presente lungo la linea di vista dalla Terra. Per semplicità, riferiamoci a una situazione bidimensionale. Dal momento



Figura 7: *Gedanken experiment* proposto da Wheeler.

che esistono due possibili traiettorie che il fotone può seguire nell'andare dal quasar a noi, abbiamo una situazione analoga a quella realizzata in un interferometro. Manca soltanto di aggiungere un beam-splitter nel punto d'incontro delle due traiettorie: senza, dovremmo vedere due immagini del quasar; con il beam-splitter inserito, osserveremmo interferenza. I quasar sono a miliardi di anni-luce da noi, per cui possiamo ritardare la nostra scelta d'inserire o meno il beam-splitter fino all'ultimo momento. Le conseguenze concettuali di tale scelta ritardata sono completamente diverse. Con il beam-splitter in posizione il fotone ha viaggiato per miliardi di anni di anni su entrambi i cammini; senza beam-splitter il fotone ha seguito uno solo dei cammini: la nostra azione in questo istante sembra avere effetti sul passato cosmico.

La scelta ritardata mostra quanto fallace sia la semplice descrizione della dualità onda-particella. Una volta che la luce è nell'interferometro, non possiamo più pensarla come un'onda o una particella. Né possiamo pensare di fondere le due descrizioni in qualche strano ibrido. Tutti questi tentativi sono inadeguati. Ciò di cui abbiamo bisogno è qualcosa di nuovo; e non un'immagine composita della luce, ottenuta cucendo insieme parti di teorie classiche. Ci serve un nuovo punto di vista, fondamentalmente diverso da tutto ciò che abbiamo elaborato nel passato dall'analisi dei fenomeni classici. Lo stesso dicasi per la materia.

Ancora una volta è bene sottolineare che la teoria dell'interferenza quantistica applicata al caso della scelta ritardata è perfettamente in accordo con i risultati sperimentali. Ciò che disturba è che ci sembra impossibile capire tali risultati. La Meccanica Quantistica evita la difficoltà rifiutandosi di fornire un'immagine (che è quello che, come retaggio della Fisica Classica, sempre ricerchiamo) di cosa realmente accade nell'esperimento della scelta ritardata. Essa non ci dice nulla circa il "meccanismo" in base al quale il fotone sceglie un cammino o entrambi. Questa richiesta da parte nostra è un residuo della concezione classica: la teoria quantistica fornisce soltanto la probabilità delle varie eventualità possibili per l'esperimento che stiamo considerando.

La teoria fa anche qualcosa di più. I calcoli dell'interferenza quantistica fanno sempre ricorso al **principio di sovrapposizione**. La teoria coinvolge sempre la somma di due o più termini, e del risultato si esegue il modulo quadro. Con questo principio entra nella Fisica qualcosa di unico. Anche una singola, indivisibile particella può essere "preparata" in una sovrapposizione di stati, e, quindi, non ha più una precisa localizzazione. In un rivelatore i fotoni, gli elettroni, appaiono sempre come semplici oggetti unitari, ma fuori dal rivelatore esattamente gli stessi oggetti sono in grado di sviluppare una forma altamente complessa. Wheeler ha descritto il quanto come il "great smoky dragon" che è presente simultaneamente in ogni angolo dell'interferometro e che improvvisamente "s'inarca per mordere il rivelatore". Forse questa è la migliore tra le descrizioni che abbiamo al momento.

campo stesso. Questo comporta che i raggi di luce provenienti da una sorgente lontana che passano alle estremità opposte della massa si intersecano a una qualche grande distanza al di là di essa (cfr. Fig. 7). Un osservatore posto a tale grande distanza vedrà simultaneamente la sorgente in due punti distinti del cielo, ovvero vedrà due immagini della sorgente. Per i raggi deviati dal Sole, il punto più vicino nel quale questi raggi s'intersecano, e in cui le due immagini diventano visibili, è posto a circa 50 anni-luce dalla Terra, e, quindi, a noi è preclusa la possibilità di osservare alcuna immagine multipla prodotta dalla deviazione della luce nel campo gravitazionale del Sole. Possiamo invece aspettarci di vedere le immagini multiple prodotte dalla deflessione della luce nel campo gravitazionale di stelle o galassie lontane, le quali in questa circostanza agiscono da lenti gravitazionali.