

L'Interferometro di Elitzur (22/03/2006)

Sembra un'apparecchiatura complicata, ma non lo è. Seguiamo il disegno. A sinistra c'è una sorgente che lancia *un solo fotone alla volta*. Prima che sia lanciato il successivo, il fotone fa in tempo a percorrere tutto l'apparato ed essere raccolto da uno dei rivelatori. Seguiamo il percorso del fotone che indicheremo con $|A\rangle$, la cui direzione è indicata dalla piccola senoide sotto il simbolo.

Il fotone percorre il tratto fino allo *specchio semi-argentato*. Associamo all'onda la sua *fase*, indicata dalla freccetta disegnata sopra il percorso. Ricordiamo pure che, ogni volta che un'onda è riflessa su uno specchio, la sua fase *cambia di 90°*. Dunque, vicino a ogni specchio è indicata la rotazione della fase durante la riflessione (freccetta curva), e dopo ogni specchio la successiva freccetta indica la rotazione complessiva della fase fino a quel punto. Non confondiamo direzione del fotone e fase dell'onda elettromagnetica a esso associata.

Il primo specchio semi-argentato, per definizione, fa passare *metà della luce incidente* e riflette l'altra metà. In pratica, *fa passare il 50% dei fotoni* incidenti e *ne riflette l'altro 50%*. Supponiamo che il primo fotone passi attraverso lo specchio. Lo ritroviamo in $|B\rangle$ senza che sia cambiato nulla. Ora il fotone $|B\rangle$ urta lo specchio completamente argentato. È *riflesso verso l'alto*, e la sua fase cambia di 90° come indicato dalla freccia lungo il lato $|D\rangle$. Seguiamo ancora il fotone $|D\rangle$. Arriva all'ultimo specchio, quello in alto, che di nuovo è semi-argentato. Nel 50% dei casi va verso il rivelatore F, nell'altro 50% verso il rivelatore G. Il fotone *riflesso* $|F\rangle$ è ruotato di altri 90° e la sua fase è indicata dalla freccetta che si trova *sopra* la scritta $|F\rangle$. Il fotone $|G\rangle$ passa inalterato e non è ruotato. Si dirige verso il rivelatore G con la fase data dalla freccetta *a destra* della scritta $|G\rangle$.

Chiediamoci adesso quale dei due rivelatori scatterà per segnalare l'arrivo del fotone, *sempre nel caso in cui al primo specchio, quello basso a sinistra, il fotone sia passato senza essere riflesso*. Se il fotone, alla fine, va verso F, dovrebbe scattare il rivelatore F; altrimenti quello G. Siamo d'accordo? Siccome l'ultimo specchio è semi-argentato, dunque, ci aspettiamo che *nel 50% dei casi che stiamo considerando scatti F, nell'altro 50% scatti G*.

Vediamo invece quello che succederebbe se il fotone che viene da $|A\rangle$ fosse *riflesso* dal primo specchio. In questo caso, il suo percorso sarebbe $|C\rangle$ e poi $|E\rangle$, ribaltandosi di fase in modo che *la sua fase ruoti verso sinistra*. Che accade al fotone $|E\rangle$ quando anche lui va a incidere sull'ultimo specchio? Ha il 50% di probabilità di essere inviato verso G ruotando ancora la fase come disegnato *a sinistra* della scritta $|G\rangle$, e l'altro 50% di passare dritto verso F con la fase invariata, come disegnato *sotto* la scritta $|F\rangle$. Quindi, anche in questo secondo caso c'è una probabilità del 50% che scatti F o G. Dal momento che abbiamo esaminato tutti i percorsi possibili, ne dobbiamo dedurre che, *per ogni fotone che parte* dalla sorgente, sia che passi verso $|B\rangle$ o che sia riflesso verso $|C\rangle$, o scatterà F o scatterà G *con probabilità uguali*. Rivediamo il ragionamento e siamo d'accordo.

Ma è questo che succede? No. *Scatta sempre e soltanto F! G non scatta mai*.

Proviamo allora a ragionare in un altro modo. Sappiamo che la luce si propaga per fotoni, ma supponiamo che, per un qualsiasi motivo, in questo esperimento la luce si comporti solo come *onda* e basta. Allora, sul primo specchio semi-argentato, l'onda si divide in due: metà continua dritta verso $|B\rangle$ e l'altra metà è riflessa in $|C\rangle$. Le due *mezze onde* sono poi riflesse completamente, una in $|D\rangle$ e l'altra in $|E\rangle$. Si congiungono di nuovo sull'ultimo specchio dove, però possono di nuovo prendere direzioni diverse: due *quarti d'onda* vanno verso G, altri due verso F.

Vediamo cosa succede a $|G\rangle$. I due *quarti d'onda* che provengono rispettivamente da $|B\rangle$ e da $|C\rangle$ hanno *fase opposta* (una freccia punta verso l'alto, una verso il basso). Si annullano a vicenda, e il contatore G non scatta mai. Invece, i due *quarti d'onda* che vanno verso F hanno la stessa fase (le due frecce puntano nella stessa direzione), si sommano e il contatore F scatta. In questo modo, dunque, si spiegherebbe come mai scatta solo e sempre F mentre G non scatta mai. Ma un momento: si spiegherebbe davvero tutto? Neanche per sogno! Infatti, il contatore F può essere, per esempio, un pezzetto di metallo che, per *effetto fotoelettrico*, emette elettroni. E i fotoni che inviamo nell'apparato potrebbero essere *appena appena dell'energia giusta* per far uscire un elettrone. Se dunque il contatore F scatta, vuoi dire che gli è arrivata l'energia di *un fotone intero*

mentre invece, per spiegare come mai G non scatta, abbiamo dovuto supporre che *metà* (due quarti) del fotone vada verso F (*in fase con sé stesso*) e *metà* verso G (*in opposizione di fase*).

Dunque, né supponendo che il fotone tutto intero passi o per $|B\rangle$ o per $|C\rangle$, né supponendo che due *mezzi fotoni* passino contemporaneamente per $|B\rangle$ e per $|C\rangle$, siamo riusciti a spiegare perché F scatta sempre e G non scatta mai.

Allora, come funziona la cosa? Il fotone *tutto intero* passa *contemporaneamente* attraverso B e C . E quando si ricongiunge, *si compone con sé stesso*! Andando verso G, si compone in modo *distruttivo* e G non scatta mai. Andando verso F si compone in modo *costruttivo*, e F scatta sempre.

Adesso peggioriamo le cose passando all'esperimento descritto nella parte inferiore della figura. Lungo il tragitto $|D\rangle$ mettiamo un *oggetto che assorbe* l'eventuale fotone che vada a sbattergli contro. Sperimentalmente, facendo una media su tanti fotoni, il *50% è assorbito* e quindi nessun rivelatore scatta; nell'altro 50% dei casi scatta *il rivelatore F o quello G con uguale probabilità*. Cerchiamo di capire, dimenticando per un momento quello che è successo nel primo esperimento. Seguiamo *nel modo più ingenuo possibile* le vicende del fotone emesso dalla sorgente.

Il fotone arriva sul primo specchio semi-argentato. Siccome sappiamo che il fotone *non è separabile in due*, lo specchio fa passare statisticamente, *la metà dei fotoni* e ne riflette l'altra metà. Supponiamo che il fotone passi attraverso lo specchio e percorra il tragitto $|B\rangle$. Al secondo specchio è riflesso verso $|D\rangle$ e quando arriva sul sasso è assorbito. *Nessun rivelatore scatta*. Ciò succederà in media nel 50% dei casi. Fin qui ci siamo.

Supponiamo invece che il fotone sia riflesso verso $|C\rangle$. Sarà riflesso ancora verso $|E\rangle$ dopodiché raggiungerà il nuovo specchio semi-argentato. Potrà passare dritto verso F *nella metà dei casi*, mentre nell'altra metà sarà riflesso verso G. Dunque, per il 50% dei fotoni che partono dalla sorgente, scatterà uno dei rivelatori, e la probabilità che scatti F o G è la stessa. Con questa interpretazione abbiamo spiegato tutti i risultati del secondo esperimento. Sembra che non ci siano problemi: basta supporre che il fotone *viaggi tutto intero* in una direzione o in un'altra.

Adesso togliamo il sasso e riportiamoci nelle condizioni del primo esperimento. Ricomincia a scattare *sempre e solo F!* Dunque, l'interpretazione del secondo esperimento non funziona. Le cose vanno in modo diverso, poiché il primo esperimento ci ha già detto che *non è possibile* che il fotone *passi tutto verso $|B\rangle$ oppure sia riflesso tutto verso $|C\rangle$* .

Con calma, riprendiamo il primo esperimento: abbiamo concluso che l'unica spiegazione possibile è che il fotone *passi tutto attraverso i due percorsi contemporaneamente*, come se si dividesse in due *fantasmi di fotone intero* che riacquistano realtà solo nel momento in cui si incontrano di nuovo. Proviamo a capire il secondo esperimento sulla base di questa interpretazione.

Il *fantasma* che va verso $|B\rangle$ riesce a *mantenersi in contatto* con il fantasma che va verso $|C\rangle$. Se il primo fantasma è assorbito, avverte istantaneamente il *doppione fantasma* che percorre l'altro ramo. «*Sparisci subito perché siamo stati assorbiti*». Se invece il fantasma che va verso $|C\rangle$ *decide di passare* e di arrivare ai rivelatori, è lui ad avvertire l'altro: «*Fa come se non ci fossi e ignora l'oggetto, perché andiamo verso i rivelatori*»

Dunque, non solo il primo esperimento ci dice che fotone si trova in tutte e due i tragitti allo stesso tempo ma, il secondo esperimento ci dice pure che se si *materializza* lungo uno dei tragitti, invia al suo *doppio spiritico* l'ordine di sparire come se non fosse mai esistito. In un modo o nell'altro, gli invia *un'informazione a velocità infinita*, poiché i tragitti possono essere lunghissimi. Questo si chiama *non località*. Sarebbe come dire che, invece di prendere in considerazione quello che fa il solo fotone, bisogna considerare anche tutto il resto dell'apparecchiatura sperimentale *fino alla fine della misura*. Infatti, anche se lo sperimentatore decide di mettere l'oggetto assorbente o non metterlo *solo dopo* che il fotone sia passato oltre il primo specchio semi-argentato, e magari in base a un *evento assolutamente casuale* come il lancio di una moneta, le cose vanno allo stesso modo. In un certo senso, la cosa si potrebbe interpretare come se il fotone *sapesse in anticipo* se l'oggetto assorbente sarà inserito o no. Mi dispiace, ma è così. A proposito: stiamo parlando di fotoni *reali* e non *virtuali*. Anche quelli *reali* si comportano come *fantasmi*...

