

# 6

## PARADOSSI DI UNA TEORIA DEI QUANTI TROPPO INGENUA

### Premessa

In questo paragrafo vogliamo fare alcune brevi osservazioni sul perché è necessario avere una teoria di campo e perché il concetto di particella, pur così importante, non sembra veramente quello centrale.

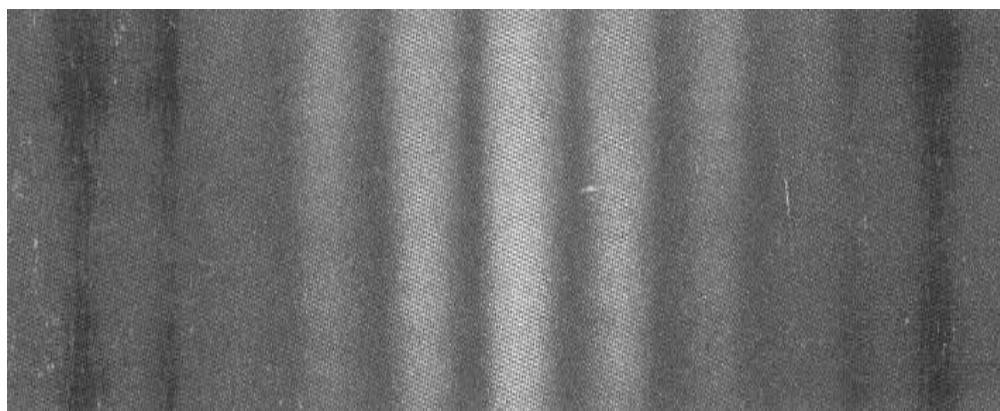
Fino ad ora abbiamo fatto un percorso molto limitato, che fondamentalmente si riassume in due sole cose: la prima è che qualunque propagazione libera, di pennelli materiali e non materiali, è regolata da un'equazione delle onde; la seconda è che, quando delle sostanze interagiscono tra loro, cioè quando questi campi materiali o elettromagnetici interagiscono gli uni con gli altri, l'interazione è descritta in termini quantistici.

Quello di cui vogliamo discutere adesso è la seguente cosa e cioè: perché non è corretto dire che un pennello di luce è “fatto da” fotoni, un pennello elettronico è “fatto da” elettroni, visto che ci viene così naturale pensarla e visto che per descrivere le interazioni dobbiamo introdurre i quanti? Perché questo pensiero così semplice non va bene? Per capirlo analizziamo alcuni importanti fatti sperimentali e mostriamo gli aspetti paradossali di un’idea così ingenua.

### Paradosso della doppia fenditura (o del biprisma)

Iniziamo con il famoso esperimento della doppia fenditura. Il significato concettuale dell'esperimento sta nel mettere in luce le grosse limitazioni dell'interpretazione del quanto come oggetto.

Consideriamo un pennello materiale o un pennello elettromagnetico coerente che, emesso da una opportuna sorgente, va a incidere su una doppia fenditura. Per esempio, se la sorgente è un piccolo laser, quello che osserviamo è che la luce, diffratta da ciascuna fenditura, mostra le tipiche frange di interferenza sullo schermo posto al di là delle fenditure (Fig. 6.1).



**Fig. 6.1** Difrazione da una doppia fenditura.

Adesso immaginiamo di diminuire moltissimo l'intensità della luce: quello che vediamo sullo schermo non è un'immagine sbiadita e diffusa delle frange di interferenza ma, invece, dei singoli puntini luminosi. Prima vediamo un puntino, poi un altro puntino, poi un altro ancora... e così di seguito. Alla fine i puntini si sono distribuiti sullo schermo in modo da creare la figura delle frange di interferenza classiche, che si vedevano con luce sufficientemente intensa.

Possiamo effettuare un esperimento simile questo utilizzando, al posto di un pennello di luce laser, un pennello elettronico.

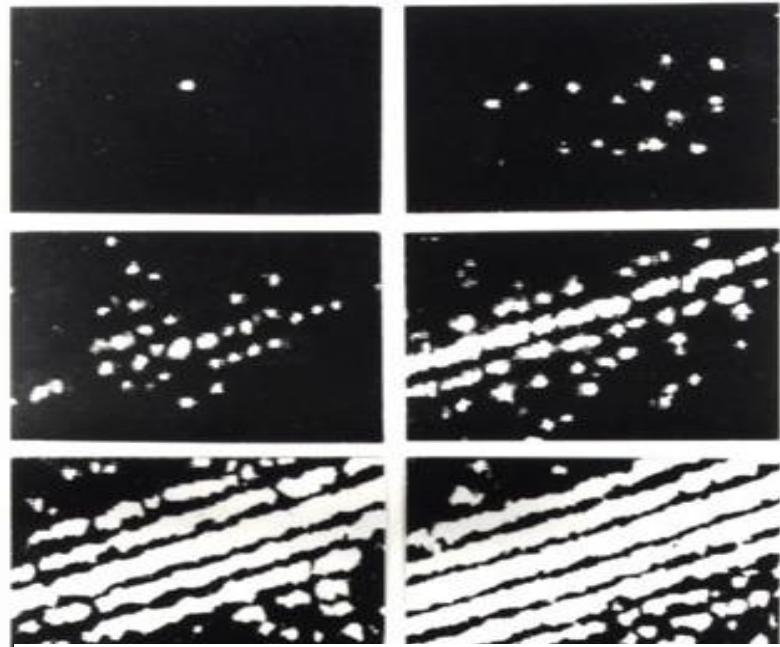
I primi esperimenti di interferometria elettronica a singolo quanto sono stati realizzati presso il Centro di Microscopia Elettronica dell'Istituto di Fisica di Bologna, a partire dal 1971; il dispositivo utilizzato riproduceva il biprisma ideato da Mollenstedt e Duker nel 1955.

L'aspetto più interessante è senza dubbio connesso con l'osservazione diretta del processo statistico della formazione della figura di interferenza; infatti, se l'intensità del fascio elettronico è sufficientemente bassa, sullo schermo TV posto come rivelatore, si osserva la comparsa di singoli punti luminosi che nel tempo portano alla formazione dell'immagine finale: la figura di interferenza risulta effettivamente essere il risultato della somma di un gran numero di eventi indipendenti, ognuno dovuto all'interazione statistica fra il fascio elettronico e lo schermo; siamo pertanto in presenza di un esperimento di interferenza a singolo quanto (elettrone) e del quale è stato effettuato un filmato<sup>i</sup> (Fig. 6.2)<sup>ii</sup>.

Questo esperimento è stato riprodotto e migliorato da Tonomura nel 1989<sup>iii</sup>. Come è chiaro, stiamo qui considerando gli esperimenti già presentati precedentemente a proposito del comportamento ondulatorio della materia ma ora li stiamo leggendo proprio così come sono stati ideati realizzati dai loro autori: come esperimenti a singolo quanto.

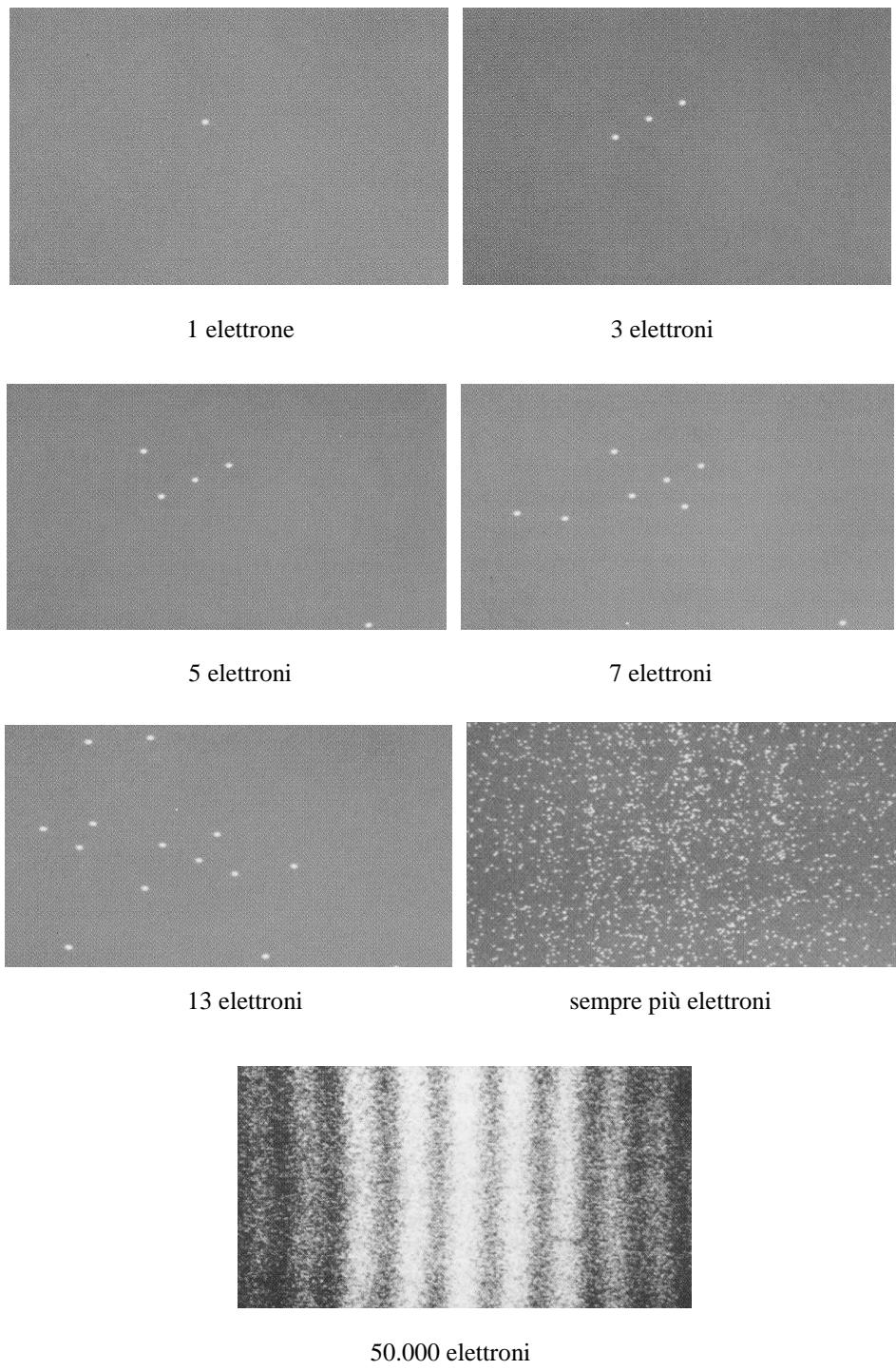
Tre elettroni..., cinque elettroni..., sette elettroni..., 13 elettroni... aumentiamo il numero degli arrivi, aspettiamo... alla fine cominciano a vedersi davvero le frange quando ci sono migliaia di elettroni, e con 50.000 elettroni le frange di interferenza sono ben distinguibili (fig. 6.3). Se rifacciamo l'esperimento ripartendo da capo, che cosa troviamo? Il primo elettrone sullo schermo non occupa la posizione che aveva il primo elettrone nell'esperimento precedente e, così, in generale sarà per la rivelazione di tutti gli elettroni sullo schermo. Ma alla fine, dopo un numero sufficiente di rivelazioni, appariranno le frange di interferenza con la stessa struttura, dimensioni e posizione di quelle ottenute precedentemente.

Notiamo così uno dei primi aspetti importanti della teoria quantistica della materia e della radiazione: il suo carattere statistico. Nella ripetizione di un singolo atto sperimentale non saremo, in generale, in grado di predire dove verrà rivelato un quanto ma, ripetendo un numero sufficientemente grande di volte l'atto sperimentale, otterremo una distribuzione degli arrivi



**Fig. 6.2** Immagini dell'esperimento di Merlo, Missiroli, Pozzi, visualizzate sullo schermo per valori crescenti dell'intensità del fascio elettronico e tempo di osservazione costante (0,04 s).

ripetibile e prevedibile: una regolarità statistica. Sarà proprio su questa distribuzione statistica che la teoria saprà fare previsioni.



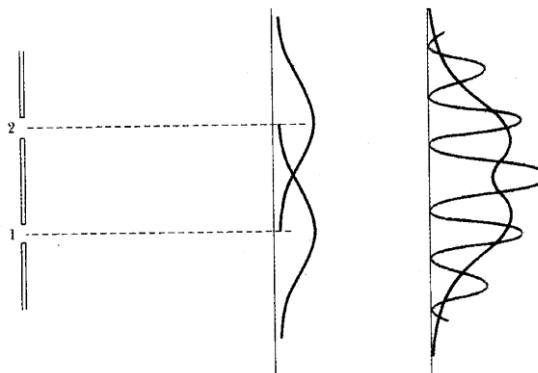
**Fig. 6.3** Formazione delle frange in esperimenti di interferenza da biprisma a singolo elettrone, effettuati da Tonomura.

Tornando ora al tema principale del nostro discorso, e considerando di nuovo, tanto per fissare le idee, l'esperimento della doppia fenditura effettuato con elettroni, che cosa ha di veramente strano e paradossale questo esperimento, tale da esser in un qualche senso il prototipo di tutti gli esperimenti che mettono in luce gli aspetti più stravaganti, tipici della fisica quantistica?

Immaginiamo, tanto per rendere concreto il discorso, di eseguire l'esperimento con un pennello elettronico di così bassa intensità da avere, di volta in volta un solo elettrone sullo schermo. Che

cosa si è tentati di pensare? Che quando un puntino sullo schermo segnala un elettrone allora un elettrone sia precedentemente uscito dal cannoncino elettronico, abbia viaggiato nello spazio circostante, sia passato da una delle due fenditure e sia arrivato sullo schermo. Questa interpretazione, però, non è così naturale come sembra. Infatti se rifacciamo l'esperimento chiudendo una delle fenditure (per esempio chiudendo quella che abbiamo chiamato fenditura "2" in fig. 6.4), troviamo che gli elettroni vengono rivelati sullo schermo in punti tutti vicini tra loro e che sono fondamentalmente di fronte alla fenditura "1" (a parte alcuni effetti di "diffrazione"). Analogamente, se chiudiamo la fenditura "1" e lasciamo aperta la "2", troviamo che gli elettroni sono tutti raggruppati di fronte alla fenditura "2".

Allora, se gli elettroni passassero da una fenditura oppure dall'altra, l'effetto ottenuto avendo prima chiusa una fenditura e poi chiusa l'altra e poi sommando i risultati ottenuti, sarebbe uguale a quello ottenuto con entrambe le fenditure aperte; pur di essere stati accorti ad utilizzare in ciascun esperimento un fascio avente la stessa intensità; di far durare l'esperimento per lo stesso intervallo di tempo per ognuno dei due casi (quello con le due fenditure aperte a turno, e quello con le due fenditure aperte entrambe contemporaneamente); e pur di "mandare" un solo elettrone per volta nell'apparato, così da non avere effetti dovuti all'eventuale, possibile, interazione degli elettroni fra loro. I risultati sperimentali, però, sono differenti: l'esperimento effettuato con entrambe le fenditure aperte contemporaneamente fornisce risultati diversi da quelli ottenuti sommando i risultati con le fenditure aperte una alla volta. Infatti, nel primo caso si ha la comparsa delle frange di interferenza e nel secondo no. In un certo senso ancora più strano è il fatto che quando sono aperte entrambe le fenditure ci siano dei punti in cui non arrivano elettroni (ci riferiamo ai minimi della figura di interferenza); punti che invece sono raggiunti dagli elettroni quando le fenditure sono aperte a turno; è come se le due possibilità offerte agli elettroni, di passare dalla fenditura "1" o dalla "2" dessero luogo ad una impossibilità!

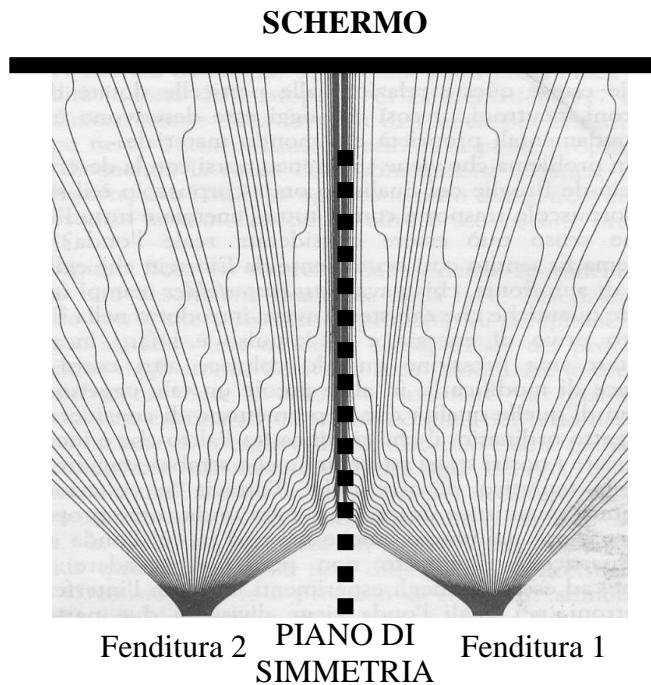


**Fig. 6.4** In sequenza: intensità della luce diffratta separatamente da ciascuna fenditura; intensità della luce diffratta da due fenditure contemporaneamente sovrapposta alla somma delle due intensità precedenti.

La conclusione di questo discorso è che è difficile pensare che gli elettroni passino per una o l'altra delle due fenditure. D'altra parte gli elettroni non passano nemmeno per entrambe le fenditure contemporaneamente, tanto è vero che se mettessimo due rivelatori, ognuno immediatamente dopo ciascuna delle fenditure, vedremmo che sempre uno soltanto dei due rivelatori darebbe un segnale. Non succede mai che l'elettrone si divida a metà. Quindi l'elettrone non è passato dalla fenditura "1", non è passato dalla fenditura "2", non è neppure passato fuori dalle fenditure, perché mettendo dei rivelatori attorno all'apparato vediamo che non danno mai un segnale, e non è passato da entrambe. Non è passato da entrambe perché non scattano mai i rivelatori contemporaneamente. Non è passato fuori perché mai nessuno dei rivelatori che abbiamo messo anche fuori è scattato, e non è passato dalla fenditura "1" o dalla "2" perché altrimenti la figura che otterremmo quando è aperta solo una delle fenditure, sommata a quella che avremmo se fosse aperta solo l'altra sarebbe uguale alla figura che otterremmo quando sono aperte tutte e due.

Quindi, se vogliamo proprio pensare che l'oggetto “elettrone” esca dalla sorgente e arrivi al rivelatore, sappiamo anche, però, che questo oggetto non passa dalla fenditura “1”, non passa dalla “2”, non passa fuori e non passa da tutte e due! E’ questo un oggetto dotato di una cinematica “sensata”? Non ci sembra poi tanto...

Per la verità, nella nostra discussione, abbiamo escluso a priori la possibilità che gli elettroni, pur passando da una ben precisa fenditura, sappiano che l'altra è aperta e si “adeguino” alla situazione: si tratterebbe di un ben strano effetto, di tipo “non locale”, che è stato preso in seria considerazione da David Bohm<sup>iv</sup> (lo stesso dell'effetto Aharonov-Bohm). In effetti è possibile fornire una interpretazione di questo esperimento nella quale gli elettroni effettivamente si muovono ciascuno lungo un sua traiettoria e, ciononostante sullo schermo viene prodotta una figura di interferenza (Fig. 6.5).



**Fig 6.5** Traiettorie alla Bohm nel caso dell'esperimento della doppia fenditura.

Non abbiamo certamente lo spazio per discutere le idee di Bohm (che sviluppano alcuni lavori di De Broglie); diremo solo che l'idea fondamentale è che le particelle, per esempio gli elettroni, “esistano realmente” (perdonatemi la rozzezza) e abbiamo una posizione ben definita (che diventa una variabile nascosta, cioè non descritta dalla meccanica quantistica) e che, a seconda della posizione di partenza, questi elettroni seguano una traiettoria ben determinata sotto l'influenza di un potenziale quantomeccanico che fa loro “sapere” se è aperta solo una o tutte e due le fenditure. Come si vede in Fig. 6.5, nessuna traiettoria degli elettroni attraversa il piano di simmetria, così che dalla posizione sullo schermo si può risalire a quale delle due fenditure è stata attraversata dall'elettrone.

La teoria qui menzionata ha, però, strane caratteristiche dal punto di vista del pensiero comune: infatti il potenziale quantomeccanico che indirizza gli elettroni lungo una traiettoria è non locale (la chiusura o l'apertura di una delle due fenditure fa cambiare il valore del potenziale in tutti i punti dello spazio *istantaneamente*) e, inoltre, le variabili diverse dalla posizione, in generale, risultano contestuali, cioè, detto un po' malamente, fortemente dipendenti dall'esperimento che viene eseguito<sup>v</sup>. Insomma se è vero che gli elettroni possono seguire una traiettoria e anche vero che la fisica che stiamo descrivendo con le idee di Bohm è ugualmente molto lontana dalle idee “classiche” di un elettrone come una pallina. Lo stesso Bohm, in una intervista alla BBC del 1962 dichiara: “Se vi domandaste come l'elettrone è passato in realtà attraverso la fenditura, e se realmente ha attraversato l'una o l'altra, io vi risponderei che con molta probabilità l'elettrone non è

un tipo di cosa che possa passare attraverso una fenditura o l'altra. In realtà esso è qualcosa che continuamente si forma e si dissolve.”<sup>vi</sup>

Ribadiamo l'idea fondamentale che scaturisce abbastanza naturalmente da quanto abbiamo qui discusso: i quanti hanno a che fare con la dinamica del sistema, ma non è facile e, probabilmente, neppure opportuno, attribuire loro una propria cinematica.

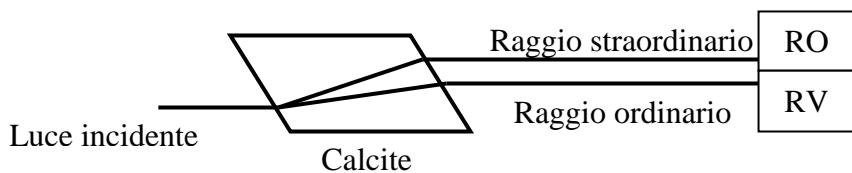
Il quanto è un aspetto della dinamica dell'interazione tra alcuni campi la cui evoluzione libera è descritta da un'equazione delle onde. I campi interagiscono gli uni con gli altri e la dinamica dell'interazione è data dai quanti.

Per esempio, nell'esperimento descritto sopra, preferiamo non pensare che un quanto abbia una propria traiettoria (anche se non è strettamente “vietato” pensarla, almeno nel senso attribuitogli da Bohm per il quale i quanti hanno una propria cinematica; ma questo accade nell'ambito, come abbiamo detto, di una teoria che è non locale, e della quale qui non ci occuperemo ulteriormente anche perché, a parte alcune “stranezze” peculiari, fino ad oggi non è stato possibile generalizzare tale teoria al caso relativistico, motivo per cui, invece, è nata e “funziona” la teoria quantistica dei campi).

E' per certi aspetti più utile pensare che sia il campo (elettromagnetico o materiale a seconda dei casi) che sta passando da entrambe le fenditure. Questo campo interagisce con il rivelatore, in modo stocastico, tramite quanti e la distribuzione di questi quanti è prevedibile solo statisticamente. Però l'idea, abbastanza naturale, di pensare che se in un certo punto del rivelatore è stato rivelato un quanto allora il quanto c'era anche prima, è del tutto inappropriata. E' inappropriata, per quanto sappiamo, per esiti degli esperimenti, non per qualche strano motivo filosofico.

### Paradossi su “quale cammino” con la calcite

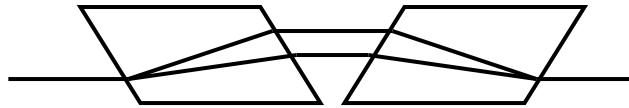
Descriviamo un altro esempio, dovuto fondamentalmente a Gianfranco Ghirardi<sup>vii</sup>. Consideriamo un cristallo di calcite (o spato d'Islanda) che è un cristallo birifrangente. Un pennello di luce (per esempio di un laser) che incide sulla calcite si separa all'interno del cristallo ed esce in due pennelli paralleli aventi polarizzazioni ortogonali fra loro (come si può controllare con due polarizzatori posti all'uscita del cristallo, uno dei due, diciamo, “orizzontale”, l'altro “verticale”). Chiamiamo il primo pennello raggio ordinario e il secondo raggio straordinario (Fig. 6.6).



**Fig. 6.6** Birifrangenza da calcite.

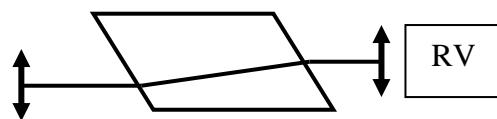
Un pennello polarizzato verticalmente seguirà soltanto il percorso basso della figura, quello del raggio ordinario, come ci possiamo accorgere per esempio perché scatta soltanto il rivelatore posto in basso nella figura. Un pennello di luce polarizzato orizzontalmente, seguirà, invece, il percorso di sopra facendo scattare il rivelatore RO. Se mandiamo contro la calcite un pennello polarizzato a 45° quello che succede è che metà pennello segue il percorso ordinario e metà quello straordinario.

Immaginiamo ora di attenuare così tanto il fascio da avere a che fare con un solo fotone per volta. Se il fotone è polarizzato orizzontale allora fa scattare il rivelatore RO, se è polarizzato verticale fa scattare il rivelatore RV e se è polarizzato a 45° metà delle volte scatterà, aleatoriamente, RO e metà delle volte RV. Viene proprio voglia di pensare che i fotoni seguano un cammino: di sopra o di sotto. Vedremo che anche in questo caso la cosa non è possibile. Infatti supponiamo di mettere due cristalli di spato d'Islanda, simmetrici per disposizione, in modo che uno sia l'inverso dell'altro; in modo che se uno separa il fascio, l'altro lo ricombini come in Fig. 6.7.

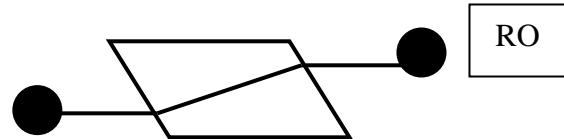


**Fig. 6.7** Rifrazione da cristallo di calcite seguito da cristallo di calcite inversa.

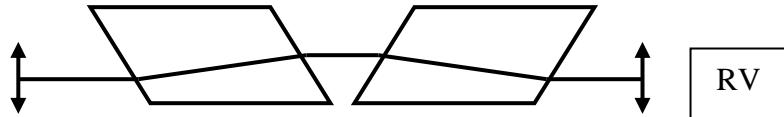
Mandiamo ora, contro l'apparato costituito dai due cristalli posti in sequenza, un fotone, per così dire, “verticale”, cioè polarizzato verticalmente (cioè mandiamo contro l'apparato un pennello di luce che interagisce tramite un solo quanto polarizzato verticalmente). Cosa succede? Vediamo che il fotone esce ancora “verticale” e sempre dal cammino “basso”; lo sappiamo perché mettiamo un altro polarizzatore verticale dopo il secondo cristallo e osserviamo che lo supera tutte le volte. Analogamente accade se mandiamo contro i due cristalli di calcite un singolo fotone polarizzato orizzontalmente. Segue il percorso “alto” ed esce polarizzato “orizzontale”.



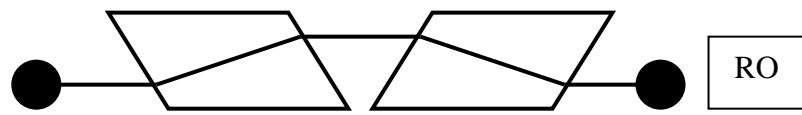
**Fig. 6.8** Un fotone polarizzato “verticale” segue il percorso “basso” e viene rivelato da un rivelatore R dopo aver superato un test di polarizzazione verticale (doppia freccia).



**Fig. 6.9** Un fotone polarizzato “orizzontale” segue il percorso “alto” e viene rivelato da un rivelatore R dopo aver superato un test di polarizzazione orizzontale (cerchio pieno).



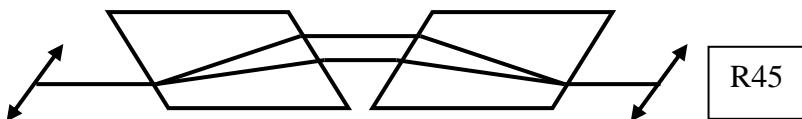
**Fig. 6.10** Anche con due cristalli, un fotone polarizzato “verticale” segue il percorso “basso” e viene rivelato da un rivelatore R dopo aver superato un test di polarizzazione verticale.



**Fig. 6.11** Anche con due cristalli, un fotone polarizzato “orizzontale” segue il percorso “alto” e viene rivelato da un rivelatore R dopo aver superato un test di polarizzazione orizzontale.

Perché siamo sicuri che i due percorsi seguiti sono proprio quelli rappresentati in figura? Perché, da quanto detto prima quando abbiamo considerato l'esperimento effettuato con un solo cristallo, sappiamo che il fotone "verticale" segue il percorso basso mantenendo la sua polarizzazione (Fig. 6.8) e analogamente ha fatto quello "orizzontale" andando in alto (Fig. 6.9).

Adesso immaginiamo di mandare un singolo fotone polarizzato a  $45^\circ$ . Per quanto detto fin qui egli o segue il percorso straordinario o quello ordinario, va di sotto o va di sopra. Immaginiamo che vada di sotto e supponiamo di mettere, dopo il secondo cristallo, un secondo polarizzatore a  $45^\circ$  seguito da un rivelatore (Fig. 6.12).



**Fig. 6.12** Un fotone polarizzato a  $45^\circ$  viene inviato contro i due cristalli e incontra un polarizzatore a  $45^\circ$  (freccia obliqua).

Come descriviamo la situazione? Non è difficile: il fotone che segue il percorso di sotto esce "verticale" dai due cristalli, in seguito incontra il polarizzatore a  $45^\circ$  e pertanto avrà il 50% di probabilità di attraversare il polarizzatore e il 50% di probabilità di essere assorbito. Allora, se  $N$  fotoni passano per la traiettoria in basso, il rivelatore, che abbiamo posto dopo il polarizzatore a  $45^\circ$ , ne rivela la metà. Analogamente accade ai fotoni che seguono la traiettoria di sopra perché escono "orizzontali" prima di incontrare il polarizzatore.

Morale: se mandiamo  $2N$  fotoni, uno per volta, polarizzati a  $45^\circ$  contro i due cristalli di calcite, uno inverso dell'altro, questi fotoni metà delle volte passano di sotto, metà delle volte passano di sopra.

Metà di quelli che passano di sotto (e che quindi sono polarizzati verticalmente) supera il polarizzatore a  $45^\circ$  e, analogamente, metà di quelli che passano di sopra (polarizzati, quindi orizzontalmente) supera lo stesso polarizzatore. Alla fine, allora, ci aspettiamo che, dei  $2N$  fotoni incidenti, solo la metà, cioè solo  $N$ , giunga al rivelatore.

Bene, la cosa strabiliante è che se facciamo l'esperimento il rivelatore conta  $2N$  fotoni, li conta tutti, e non solo  $N$ !

Ciò significa che il discorso che abbiamo fatto è sbagliato e, quindi, la conclusione che dobbiamo trarre è che il fotone non segue una traiettoria definita: non va di sotto, non va di sopra, non va fuori dal cristallo e non percorre contemporaneamente i due cammini!

Non va fuori dal cristallo perché se mettiamo dei rivelatori attorno alla calcite non troviamo mai nessun fotone; non segue uno dei due cammini perché altrimenti varrebbe il ragionamento appena fatto e rivelerebbero soltanto la metà dei fotoni che invece riveliamo; non li percorre tutti e due perché ogni volta che facciamo un esperimento con un singolo cristallo vediamo che viene sempre attivato uno solo dei due rivelatori, mai vengono attivati entrambi; e non è neppure vero che non segue nessun percorso perché esce dalla sorgente e alla fine esso viene rivelato! Come si vede, la nozione di traiettoria in questo tipo di esperimenti è del tutto inadeguata!

Osserviamo che dal punto di vista classico il problema non si pone assolutamente. Se pensiamo ad un pennello elettromagnetico inizialmente polarizzato a  $45^\circ$  che incide sui due cristalli di calcite, possiamo descrivere in modo molto semplice quello che succede: il pennello viene scomposto dal primo cristallo in due pennelli con due polarizzazioni differenti, orizzontale e verticale, poi queste due vengono ricombinati dal secondo cristallo, tanto è vero che il pennello esce dal secondo cristallo polarizzato di nuovo a  $45^\circ$  (polarizzazione ottenuta come somma coerente di polarizzazione verticale e orizzontale). Mettendo, quindi, un polarizzatore a  $45^\circ$  dopo il secondo cristallo, questo farà passare tutta la luce che vi incide e non solo la metà! Se pensiamo in termini

semiquantistici (perdonateci la parola) di campo quantizzato possiamo anche dire che un pennello elettromagnetico polarizzato a  $45^\circ$  interagisce per mezzo di quanti polarizzati a  $45^\circ$ , ecco perché tutti i fotoni, e non solo la metà, vengono rivelati nell'esperimento.

Mentre è possibile attribuire una traiettoria al campo, cioè è possibile immaginare che il campo si propaghi lungo entrambi i cammini, non è però possibile pensare questo per i fotoni. Ancora una volta si capisce perché è del tutto innaturale attribuire una cinematica ai quanti.

### Paradossi su “quale cammino” con l’interferometro Mach-Zender

L’interferometro Mach-Zender, schematizzato in Fig. 6.13, è stato già analizzato.

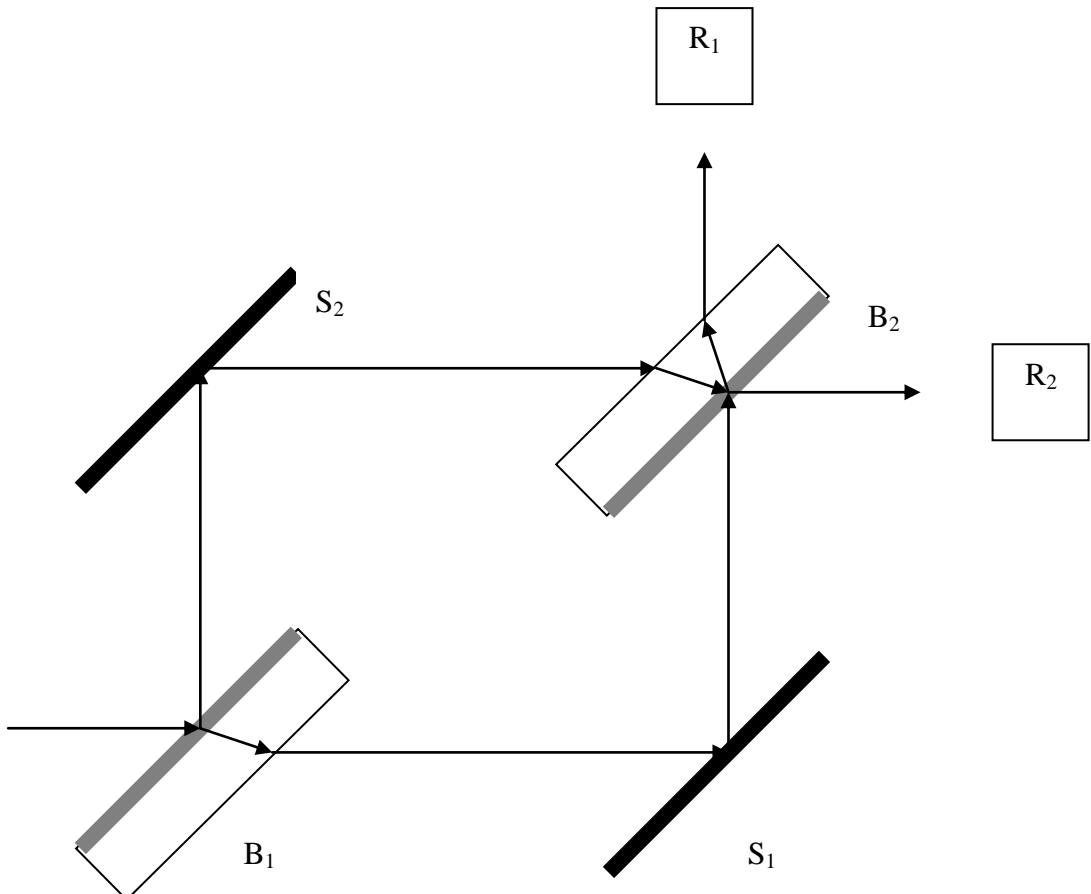


Fig. 6.13 Interferometro tipo Mach-Zender.

Proviamo a ripetere l'esperimento, che abbiamo già descritto nel cap. 3, immaginando di eseguirlo, però, con luce di bassissima intensità, in modo da avere un solo fotone per volta nell'apparato, e proviamo a spiegare quello che succede in termini di cinematica dei fotoni.

Quando un fotone arriva sul primo specchio semitrasparente, metà delle volte lo supera e metà delle volte viene riflesso. Per saper che è proprio così basta mettere due rivelatori, uno lungo ciascun cammino (quello trasmesso e quello riflesso) e vedere che ogni volta, a caso, scatta uno e sempre uno solo dei due rivelatori.

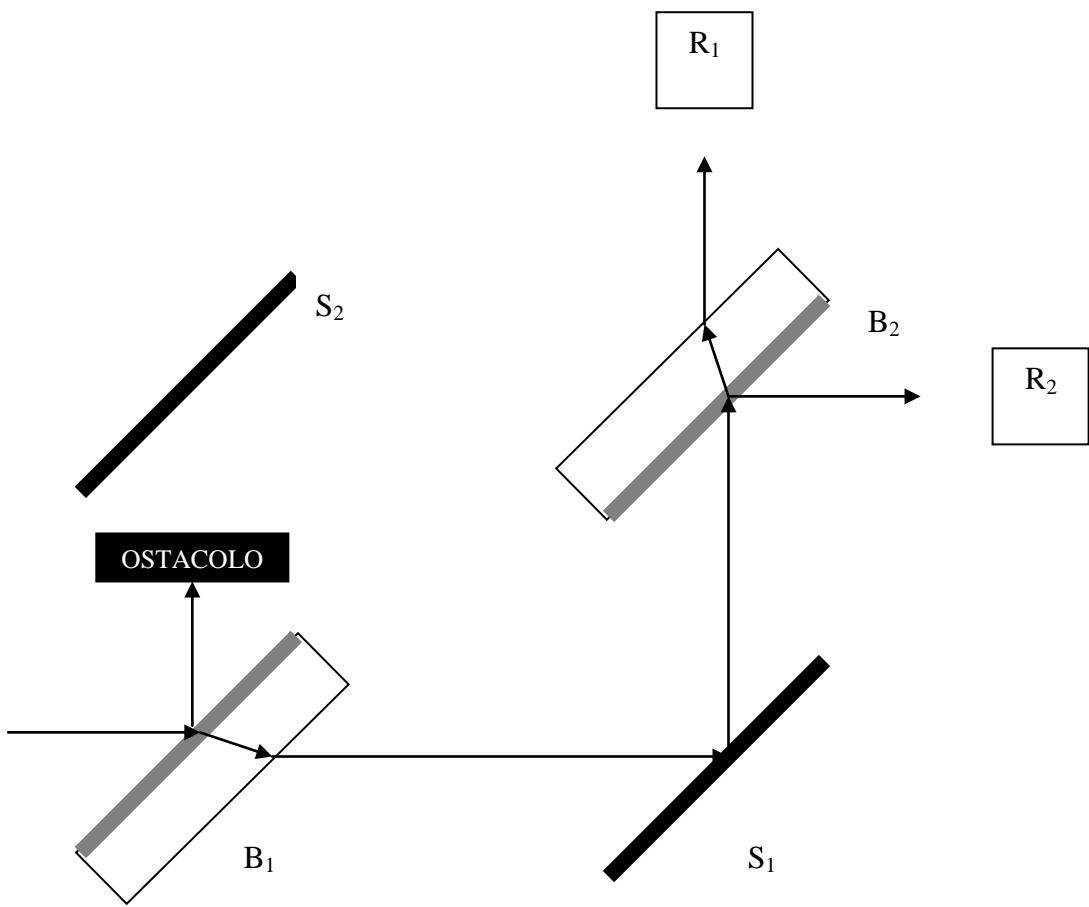
Supponiamo, per fissare le idee, che il fotone attraversi lo specchio e segua per il percorso “basso”, venga riflesso dallo specchio riflettente e arrivi allo specchio semitrasparente di sopra. Metà delle volte il fotone dovrebbe essere trasmesso da tale specchio e giungere così in R1 e metà delle volte dovrebbe essere riflesso e arrivare in R2. Cosa del tutto analoga dovrebbe accadere al fotone che viene riflesso dal primo specchio e che segue il cammino “alto”. Morale: ci aspettiamo di avere luce in entrambi i rivelatori. Invece, se facciamo l'esperimento, esattamente come succedeva con luce di

alta intensità, otteniamo che tutti i fotoni vengono rivelati dal rivelatore  $R_2$  e mai nessuno da  $R_1$ ! Come nei due esperimenti descritti i precedenza, quindi: il fotone non segue nessuno dei due cammini, altrimenti avremmo luce in entrambi i rivelatori; non li segue tutti e due, perché se mettiamo due rivelatori, uno per cammino, ne scatta sempre e solo uno; non segue percorsi diversi perché se mettiamo rivelatori fuori dai cammini, questi non scattano mai; e neppure non segue nessun cammino perché il fotone esce dalla sorgente e viene sempre rivelato!

### ***Misure in assenza di interazione***

Possiamo utilizzare questo interferometro per esperimenti bellissimi, affascinanti, quelli che permettono le cosiddette “misure in assenza di interazione”.

Immaginiamo di mettere un oggetto opaco in modo da interrompere uno dei due cammini ottici, come in Fig. 6.14.



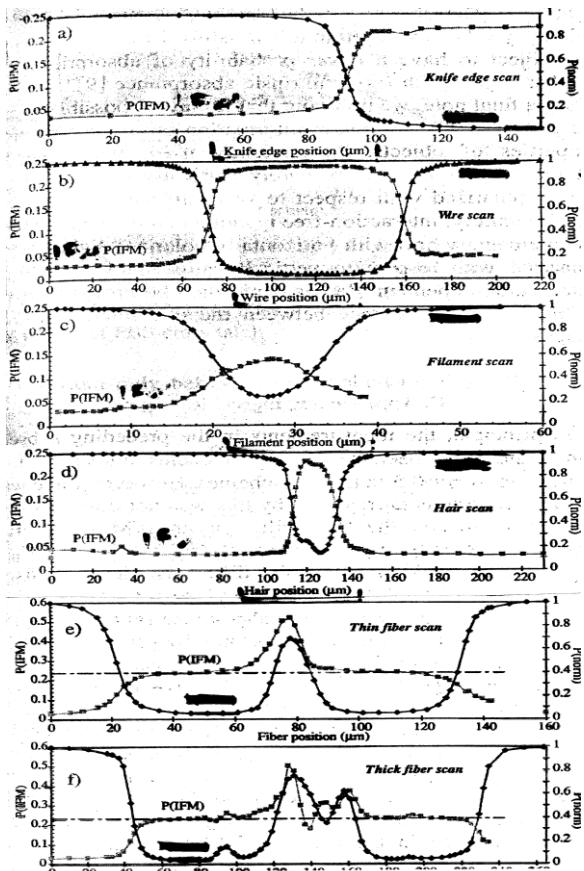
**Fig. 6.14** Interferometro Mach-Zender con uno dei cammini ottici bloccato da un oggetto opaco.

Descriviamo la situazione dal punto di vista classico. La luce, pensiamo per esempio a quella di un laser, si divide in due fasci, uno per ciascun percorso. La luce che va ad incidere sull'oggetto, precedentemente sistemato, viene da questo assorbita e, quindi, non va più a sovrapporsi con quella che ha seguito l'altro percorso; non si ha così più interferenza dei due fasci. Quello che succede, allora, è che metà della luce viene assorbita dall'oggetto e l'altra metà si distribuisce in modo da arrivare in uguale misura ai due rivelatori  $R_1$  e  $R_2$ .

Immaginiamo ora di mandare un fascio di così debole intensità che siamo sicuri di inviare un solo fotone per volta. Possono accadere tre cose:

- 1) nessuno dei due rivelatori R1 e R2 manda un segnale,
- 2) scatta il rivelatore R2;
- 3) scatta il rivelatore R1.

Nel caso 1) il fotone ha interagito con l'oggetto posto su uno dei due cammini ottici ed è stato assorbito. Nel caso 2) il fotone è andato nel rivelatore in cui sarebbe andato anche in assenza dell'oggetto. Il caso 3) è il più interessante perché siamo in una strana situazione: abbiamo inviato un solo fotone e questo è stato rivelato da uno dei due rivelatori; quindi possiamo dire che non ha interagito con l'oggetto posto su uno dei cammini. Però tale fotone, essendo arrivato in R1, ci fa capire che uno dei due cammini è stato bloccato, altrimenti ci sarebbe stata interferenza e il fotone non sarebbe mai arrivato in R1, come sappiamo. Ciò significa che senza interagire con l'oggetto siamo in grado di sapere che l'oggetto era lì, sul cammino ottico; abbiamo eseguito una misura di posizione senza interazione. E' un cosa meravigliosa! Possiamo, per esempio, chiedere ad un amico di muovere l'oggetto su una slitta, trasversalmente al cammino ottico e scoprire la posizione dell'oggetto (cioè se l'oggetto interrompe il fascio oppure no) guardando i foton (sono  $\frac{1}{4}$  di quelli inviati) che arrivano in R1. Questo è un esperimento vero, non solo pensato: è stato eseguito nel 1998. I risultati sono mostrati in fig. 6.15.



**Fig. 6.15** Risultati di misure di vari oggetti in assenza di interazione (per ciascun grafico la misura in oggetto è rappresentata dalla curva che parte in basso a sinistra). Tratto da P. Kwiat *Phys. Rev. A* **58**, 1, 605 (1998).

Non è quindi vero che per misurare ci voglia sempre un'interazione. Perché non è vero? Rozzamente possiamo dire che non è vero perché... non è vero che i quanti hanno una traiettoria... Certamente, per come è costruito l'apparato sperimentale, metà dei foton andranno comunque a interagire con l'oggetto, la cosa interessante è per quel quarto che non lo fa e va in R1!

La domanda a questo punto è: possiamo costruire un dispositivo che ha un'efficienza migliore, per esempio che misuri la posizione, in assenza di interazione, nel 99% dei casi?

Costruire un simile dispositivo sarebbe un po', per dirla brutalmente, come costruire un apparato per radiografie che produce immagini con solo 1/100 di raggi X assorbiti dal corpo rispetto all'assorbimento usuale! In effetti molti ricercatori stanno proprio lavorando a questo tipo di miglioramento (migliorare l'efficienza in apparati alla Mach-Zender, non ancora la radiografia, ovviamente...).

## NOTE CAPITOLO 6

---

<sup>i</sup> [http://www.bo.imm.cnr.it/index\\_edu.htm](http://www.bo.imm.cnr.it/index_edu.htm).

<sup>ii</sup> Ringrazio per queste precise informazioni L. Bianchissi e E. Rigon, miei studenti alla SILSIS-MI nel 2006, che si sono sempre dimostrati particolarmente interessati e capaci.

<sup>iii</sup> Tonomura et al., “*Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern*”, Am. J. Phys., **57**, 117-120, (1989).

<sup>iv</sup> Bohm D. *A suggested interpretation in terms of “Hidden Variables”: Part I and Part II*, Phys. Rev **85**, 166-179 and 180-193 (1952).

<sup>v</sup> Per un esempio della contestualità delle variabili di spin, confrontare il libro di G. Ghirardi “*Un’occhiata alle carte di Dio*”, Il Saggiatore, Milano (1997); pag. 189 e sgg..

<sup>vi</sup> Citato in M. Hack, P. Battaglia, R. Buccheri “*L’idea del tempo*”, UTET Libreria, Torino (2006), pag. 167.

<sup>vii</sup> Cfr. a tale proposito il libro di G. Ghirardi, “*Un’occhiata alle carte di Dio*”, Il Saggiatore, Milano (1997) alle pag. 71 e sgg..