Quantum ElecroDynamics

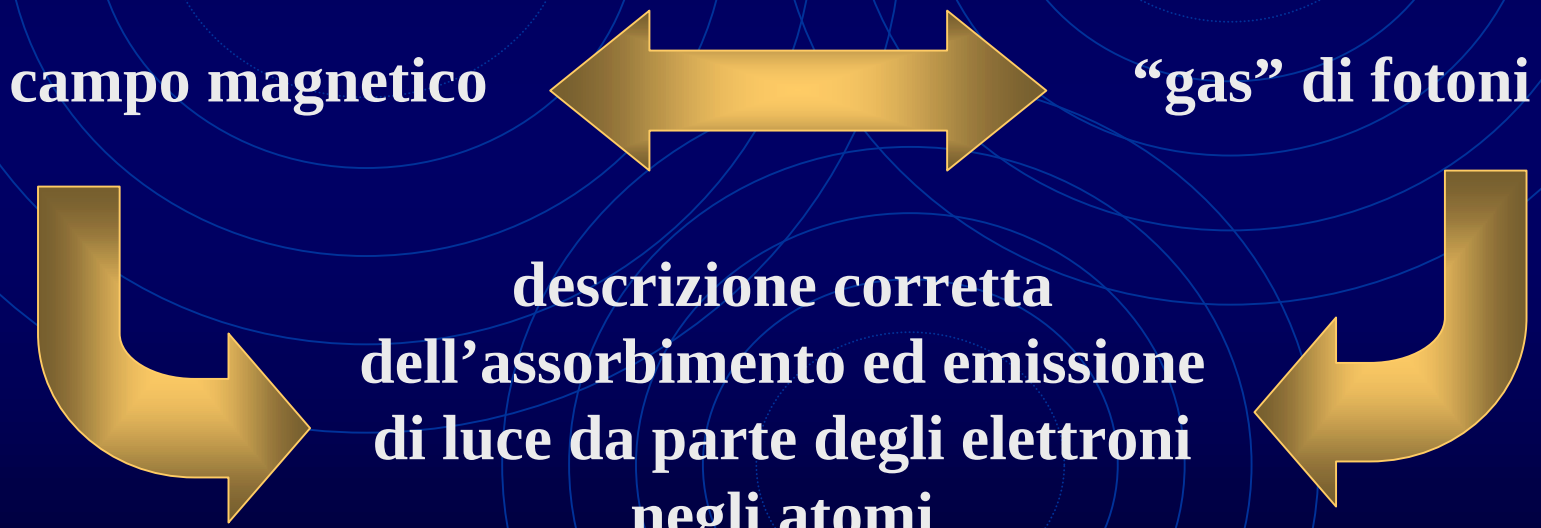
Philip Morocutti
Classe IV G

Liceo Scientifico “G. Marinelli” - Udine

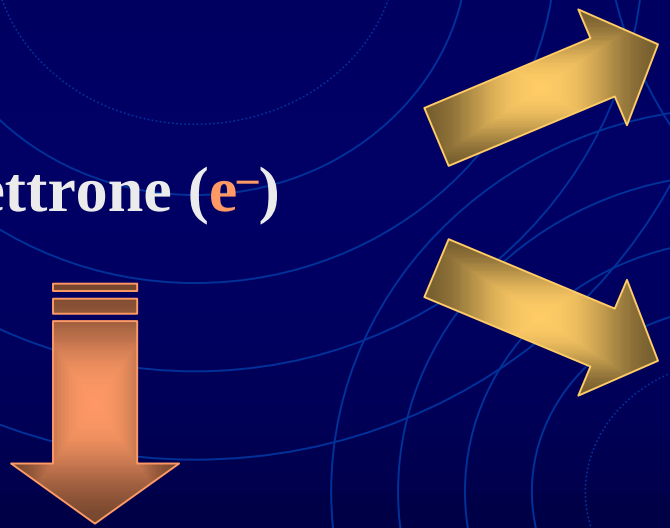
Breve introduzione storica

- 1932: nasce la fisica delle particelle con la scoperta del ***neutrone*** di James Chadwick (Cavendish Lab., Cambridge).
- Si suppone l'esistenza di sole tre particelle elementari: ***elettrone***, ***protone*** e ***neutrone***.
- Ma alla fine dello stesso anno Carl Anderson scopre negli USA il ***positrone*** (come già previsto da Dirac): è necessaria una nuova teoria per spiegare i fenomeni delle particelle subatomiche.
- P. Blackett e G. Occhialini osservano ***coppie elettrone-positrone*** (positronio) quando raggi cosmici attraversano la materia densa.

- 1927: Dirac formula una prima ***teoria quantistica del campo elettromagnetico***.



- 1928: Dirac pubblica la ***teoria relativistica dell'elettrone*** (conforme alla ***relatività speciale***) e deduce l'esistenza del ***positrone***.



numero quantico di spin
$m_s = ½$

momento magnetico
$m = 1$

(Ma nel 1948 fu misurato il reale valore del momento magnetico, ossia $m = 1{,}00118 \pm 0{,}000003$)

- Anderson osserva che un ***fotone*** produce una coppia ***elettrone-positrone*** se di energia superiore a 1 MeV, la massa-energia totale di ogni particella.

- Dalle idee di Dirac è stata formulata una teoria comprensiva dell'***elettrodinamica quantistica*** (***QED***).
- Essa descrive gli ***elettroni*** come ***campi***, secondo l'analogia dei ***campi elettromagnetici*** dei ***protoni***.
- Ciò ha permesso di descrivere tutto (o quasi) nei termini della ***teoria del campo quantistico***.

L'evoluzione della teoria

- Secondo la ***QED*** il vuoto è riempito da ***campi di elettroni/positroni***.
- Si creano invece coppie reali quando ***fotoni***, rappresentati dal ***campo elettromagnetico***, interagiscono con questi campi.
- Ma per il ***principio di indeterminazione*** di Heinsenberg, tali coppie possono esistere per istanti e questo ha costituito un ostacolo.
- Negli anni '30 si comprese subito che la ***QED*** presentava degli errori.

- Esempi
  - L’emissione/riassorbimento di un ***fotone*** poteva avvenire con probabilità infinita.
  - L’***elettrone*** poteva avere massa infinita perché, nelle scale di tempo del ***principio di indeterminazione***, esso poteva emettere o assorbire infiniti ***fotoni***.

- Alla fine degli anni ’40 Richard Feynman e Julian Schwinger negli USA, Tomonaga Shin’ichiro in Giappone, risolsero autonomamente tali problemi.
- Per liberasi degli “infiniti” ricorsero a un processo noto come “***rinormalizzazione***”.
- La ***rinormalizzazione*** accetta tutti i possibili infiniti e poi consente che tutti gli infiniti positivi annullino i negativi.

Esempi

- Massa e carica dell’***elettrone***, infinite nella teoria, vengono poi ridefinite nei loro valori effettivamente misurati.
- Il ***momento magnetico dell’elettrone*** calcolato con la ***QED*** si avvicina a quello misurabile.

- Risolti questi problemi, la ***QED*** funziona con sorprendenti risultati.
- È la più accurata ***teoria del campo quantistico*** a disposizione.
- Per questo Feynman, Schwinger e Tomonaga ebbero in Nobel nel 1965.
- Paul Dirac era già stato insignito nel 1933 del medesimo riconoscimento.

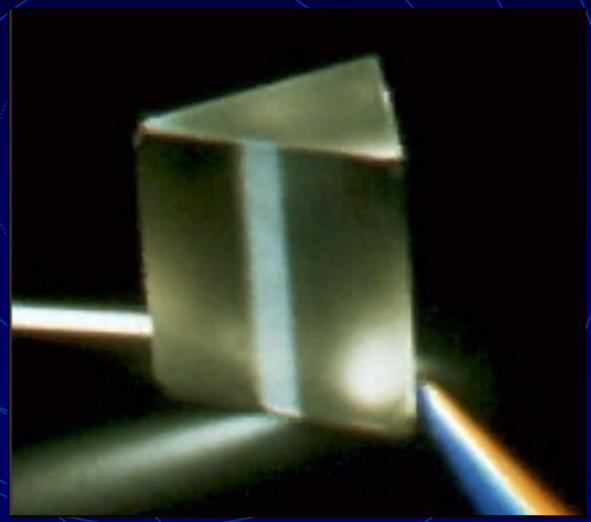
La teoria e i suoi metodi

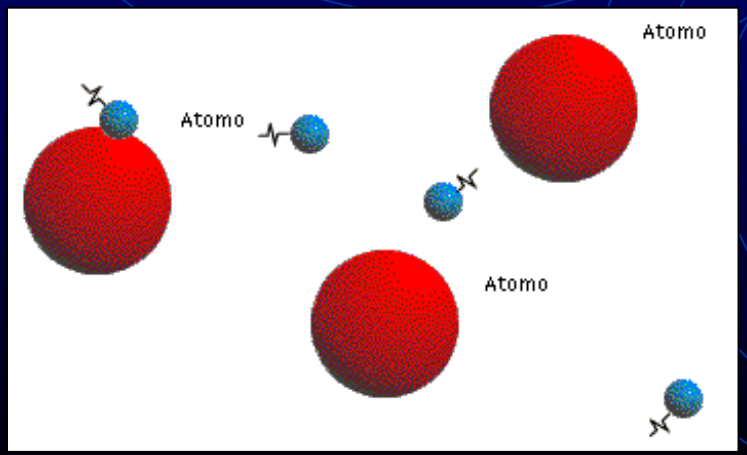
- Si occupa delle ***interazioni tra luce ed elettroni***.
- È "***quantistica***": la luce è di natura corpuscolare.
- Va contro il buon senso ed è "sorprendente".
- Serve a spiegare molti aspetti macroscopici e microscopici della realtà fisica e della chimica.
- Ha avuto applicazioni significative nella tecnologia.
- È più precisa della ***meccanica classica***.
- Descrive la natura solo in ***termini probabilistici***.
- La teoria risente del ***principio di indeterminazione***.
- La teoria non descrive la ***radioattività*** e la ***gravità***.
- È il gioiello della fisica moderna…

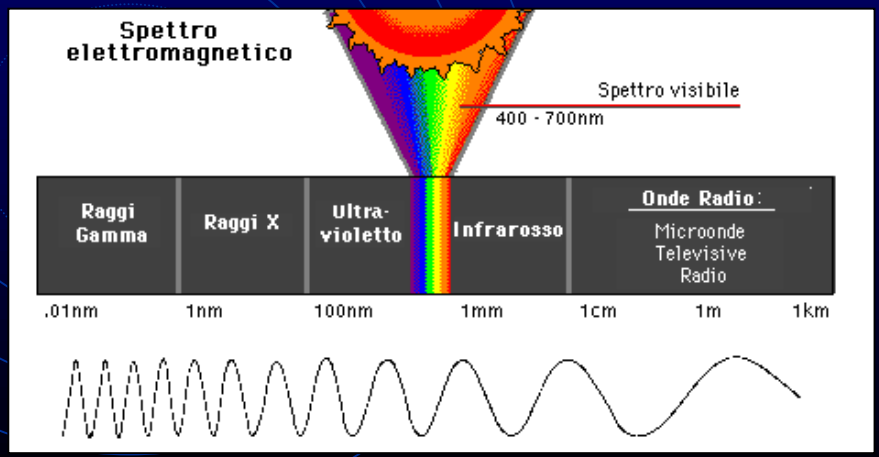
- …perché:
  - Verifiche dimostrano che non c'è discrepanza al momento tra teoria e gli esperimenti.
  - In circostanze molto semplici e con pochi ***elettroni*** i risultati dà molto precisi.
  - È diventata prototipo di teorie più recenti che cercano di spiegare i ***fenomeni nucleari***, come la ***cromodinamica quantistica*** (***QCD***).

La luce e la sua natura

- La luce bianca è sovrapposizione caotica di vari colori.
- Il colore della luce è dato dalla sua ***frequenza***.
- Si manifesta in quantità discrete, in particelle chiamate ***fotoni***, e viene coinvolta negli scambi energetici.

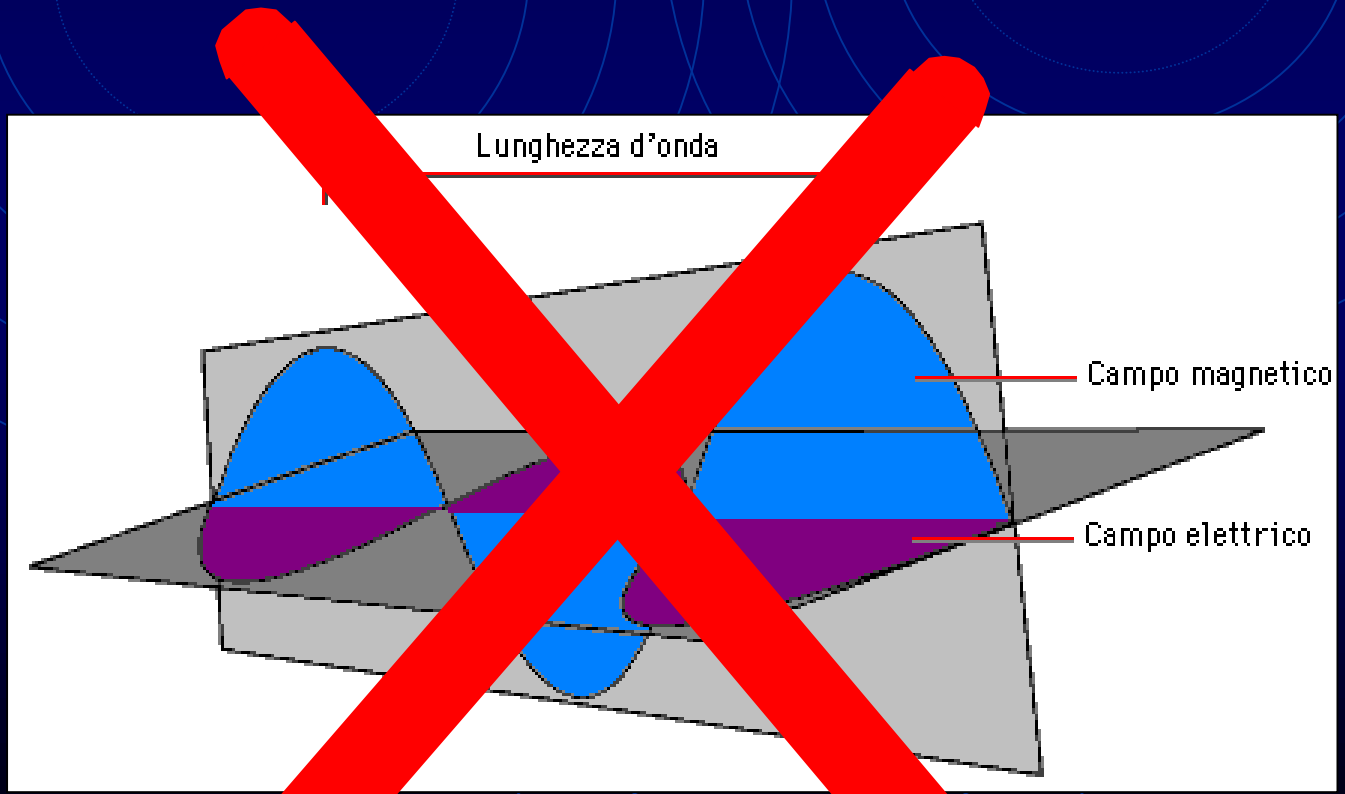






ATTENZIONE!

- Nella ***QED***, la natura della luce è dimostrata essere solo ***corpuscolare*** e non ***ondulatoria***: si risolve in questo modo il ***dualismo onda-particella***.



Fotomoltiplicatori e frecce

- Il fotomoltiplicatore: ad ogni “clic” d’intensità uniforme rileva la natura ***corpuscolare*** della luce.

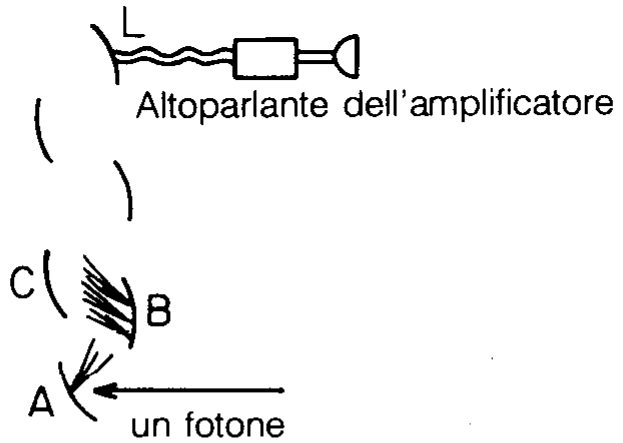


Fig. 1. Il fotomoltiplicatore è in grado di rivelare un singolo fotone. Quando un fotone colpisce la placca A, libera un elettrone che, attratto dalla placca B, carica positivamente, la urta liberando nuovi elettroni. Questo processo si ripete molte volte e miliardi di elettroni arrivano sull’ultima placca, L, dando luogo a una corrente elettrica che viene amplificata da un normale amplificatore. Collegando a quest’ultimo un altoparlante, ogni volta che un fotone di un dato colore colpisce la placca A, si sente un « clic » di intensità uniforme.

Osservazioni:

- Il “clic” è sempre di intensità fissa se parte un solo ***fotone***: “o tutto o niente”.
- La luce non si dovrebbe dividere (come invece farebbe un’***onda***).
- Si è dimostrato sperimentalmente che se la luce è più fioca i “clic” prodotti dal fotomoltiplicatore con la stessa intensità ma gli scatti sono meno frequenti.

- Ecco come avviene la ***riflessione parziale*** del vetro considerando una superficie…

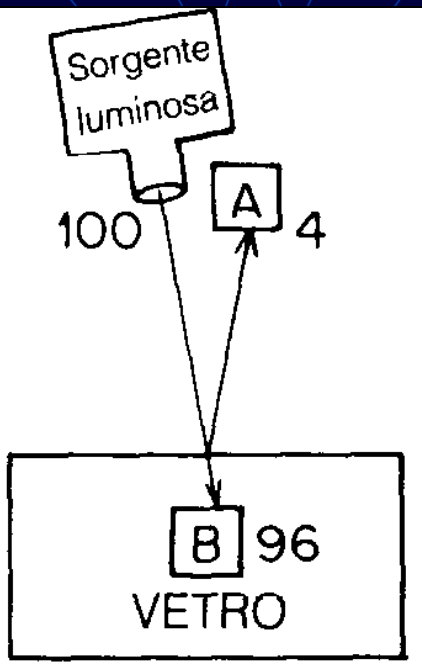


Fig. 2. Esperimento per misurare la riflessione parziale della luce da parte di una singola superficie di vetro. Su 100 fotoni che partono dalla sorgente luminosa, 4 sono riflessi dalla superficie frontale e finiscono nel fotomoltiplicatore in A, mentre gli altri 96 l'attraversano e finiscono nel fotomoltiplicatore in B.

- …e con due superfici: cresce la percentuale di riflessione in A del quadrato!

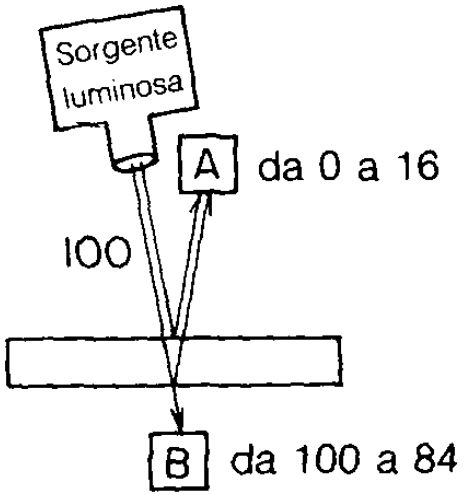


Fig. 4. Esperimento per misurare la riflessione parziale della luce da parte di due superfici di vetro. I fotoni possono arrivare nel fotomoltiplicatore in A riflettendosi sia sulla superficie frontale sia su quella posteriore della lamina; oppure possono attraversare entrambe le superfici finendo nel fotomoltiplicatore in B. Secondo lo spessore della lamina, nel rivelatore in A arrivano da zero a 16 fotoni ogni 100. Questo risultato mette in difficoltà qualunque teoria ragionevole, compresa quella della fig. 3. La riflessione parziale, a quanto sembra, può essere « smorzata » o « amplificata » dalla presenza di altre superfici.

- La probabilità è espressa da una sinusoidale e mostra la cosiddetta "***interferenza***".

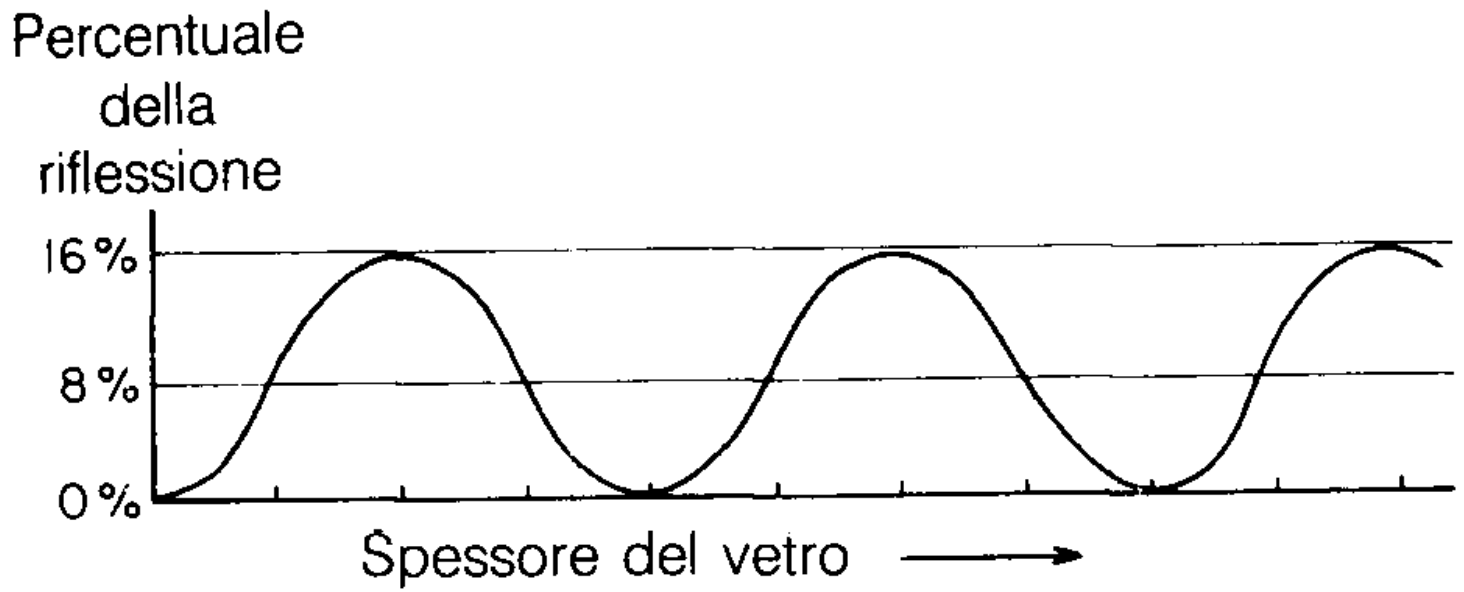


Fig. 5. I risultati di un esperimento in cui si misura attentamente la relazione tra lo spessore della lamina di vetro e la riflessione parziale mostrano il fenomeno noto come « interferenza ». Con l'aumentare dello spessore del vetro, la riflessione parziale varia ciclicamente tra zero e il 16 %.

- Il ***metodo delle frecce*** è stato utilizzato per rappresentare la probabilità di ***riflessione parziale*** della luce.
- Le frecce sono anche chiamate ***ampiezze di probabilità***.
- Il quadrato delle frecce rappresenta appunto tale probabilità.

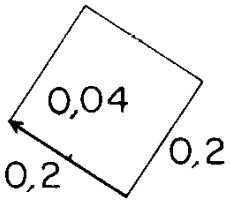


Fig. 6. Le strane proprietà della riflessione parziale da parte di due superfici hanno costretto i fisici ad abbandonare ogni previsione assoluta e a limitarsi a calcolare la probabilità di un evento. Per questi calcoli l'elettrodinamica quantistica fornisce un metodo che consiste nel tracciare piccole frecce su un foglio di carta. La probabilità di un evento è rappresentata dall'area del quadrato costruito su una freccia. Ad esempio, una probabilità dello 0,04 (il 4 %) è rappresentata da una freccia lunga 0,2.

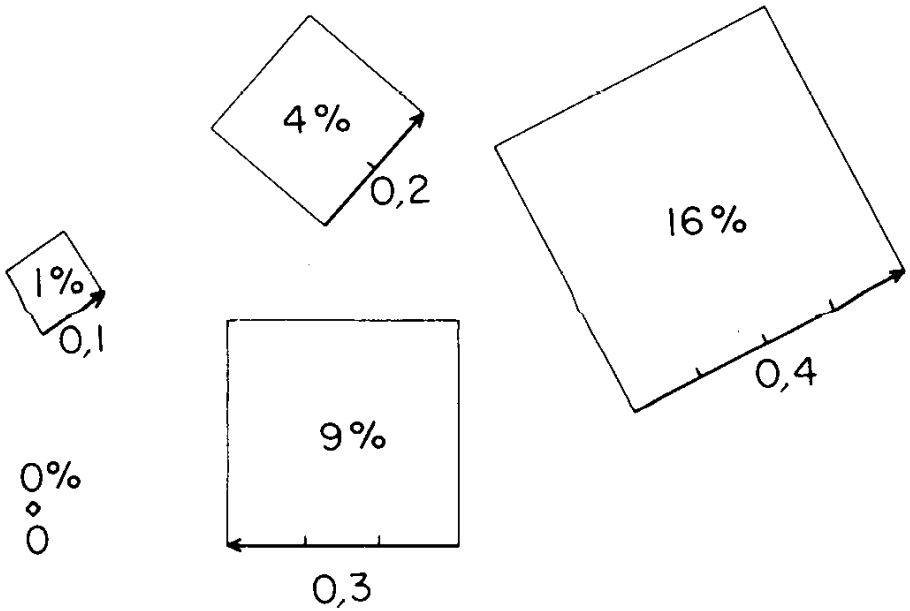
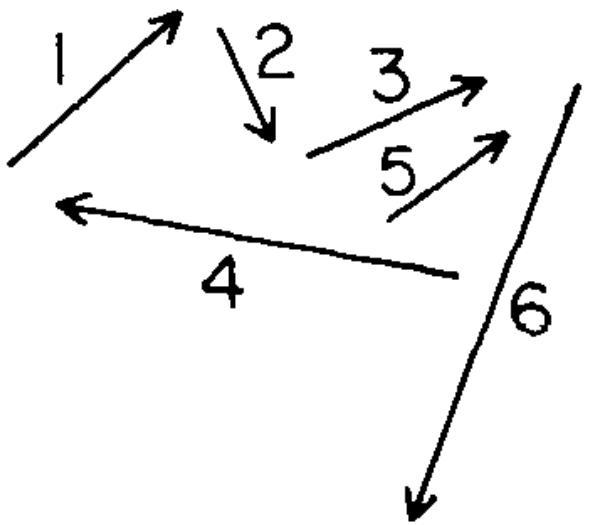


Fig. 7. Frecce che rappresentano probabilità tra zero e il 16 % hanno una lunghezza che va da zero a 0,4.

- Con più eventi alternativi si usa in genere la somma di frecce (***metodo della punta-coda***).



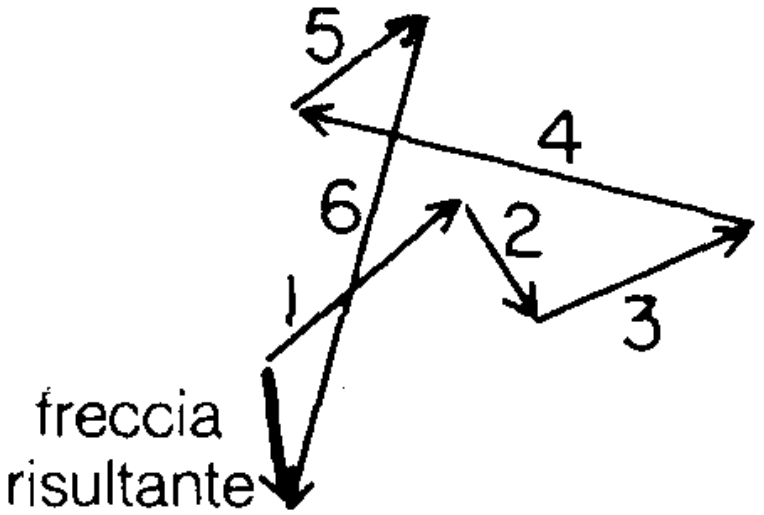


Fig. 9. Un qualsiasi numero di frecce può esser sommato nel modo descritto alla fig. 8.

- Il cronometro ideale parte simultaneamente al ***fotone***.

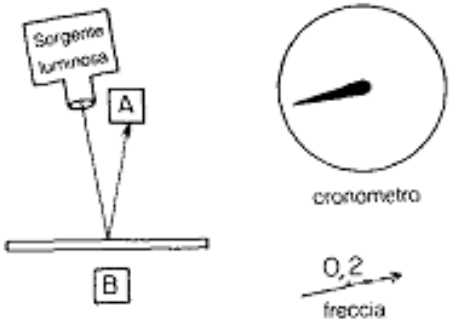


Fig. 10. In un esperimento in cui si misura la riflessione parziale da due superfici si può dire che ogni fotone ha due modi per arrivare in A: riflettendosi o sulla superficie frontale o su quella posteriore. A ciascuno di questi modi corrisponde una freccia di lunghezza 0,2, la cui direzione è determinata dalla lancetta di un « cronometro » che ruota mentre il fotone è in viaggio. La freccia relativa alla riflessione frontale va disegnata nel verso *opposto* a quello in cui si ferma la lancetta del cronometro.

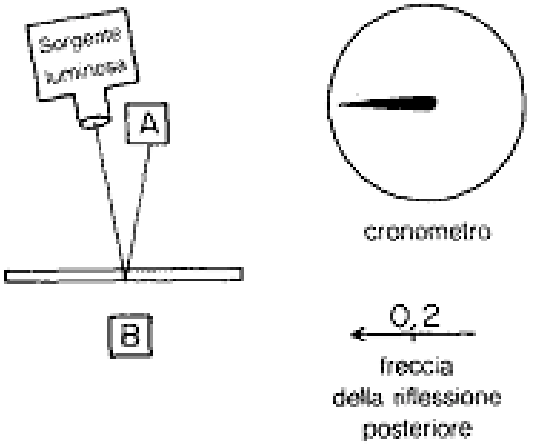


Fig. 11. Un fotone che rimbalza sulla superficie posteriore di una sottile lamina di vetro impiega un tempo leggermente maggiore per arrivare in A. Quindi la lancetta del cronometro che lo segue si trova alla fine in una posizione leggermente diversa da quella in cui si troverebbe seguendo un fotone riflesso dalla superficie frontale. La freccia relativa alla « riflessione » posteriore va tracciata nello *stesso* verso della lancetta del cronometro.

- Il verso delle frecce è opposto a quello della lancetta del cronometro (per la superficie superiore, il medesimo per quella inferiore.

- La risultante al quadrato rappresenta la probabilità totale.
- Nell'esempio di ***riflessione parziale*** in una lamina di vetro sottile la probabilità di riflessione è circa uguale a zero.

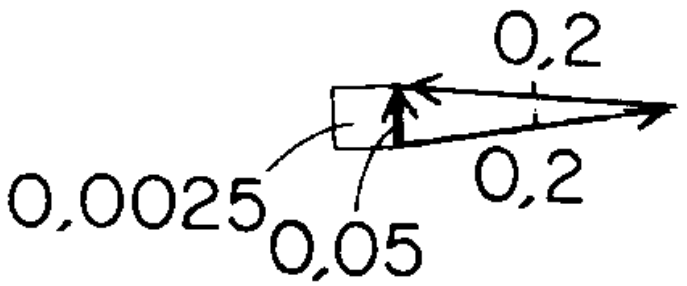


Fig. 12. La freccia risultante, il cui quadrato rappresenta la probabilità di riflessione su una lamina di vetro estremamente sottile, si ottiene sommando la freccia della riflessione frontale a quella della riflessione posteriore. Il risultato è quasi zero.

- Con una lamina più spessa la percentuale aumenta, fino ad un valore massimo…

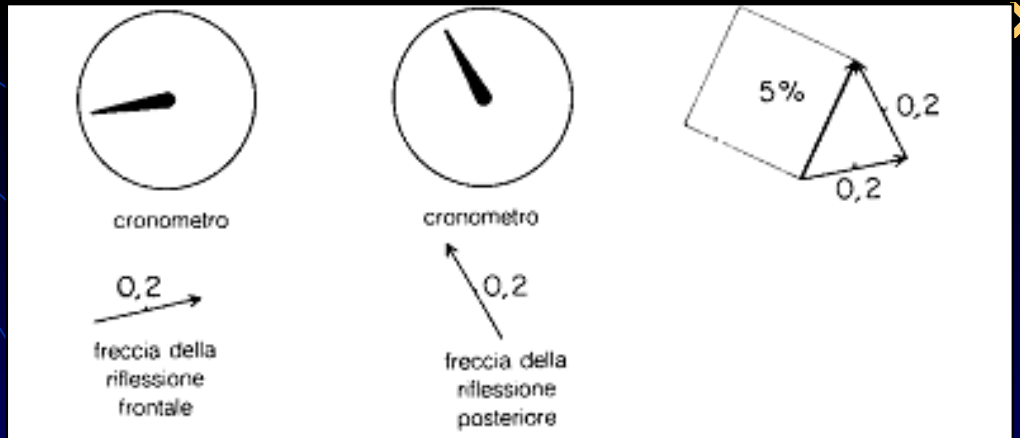


Fig. 13. Se la lamina di vetro è leggermente più spessa, la freccia risultante è un po' più lunga, perché è un po' più ampio l'angolo tra le frecce relative alla riflessione frontale e posteriore. Infatti un fotone che rimbalza sulla superficie posteriore impiega un po' più di tempo per arrivare in A rispetto all'esempio precedente.

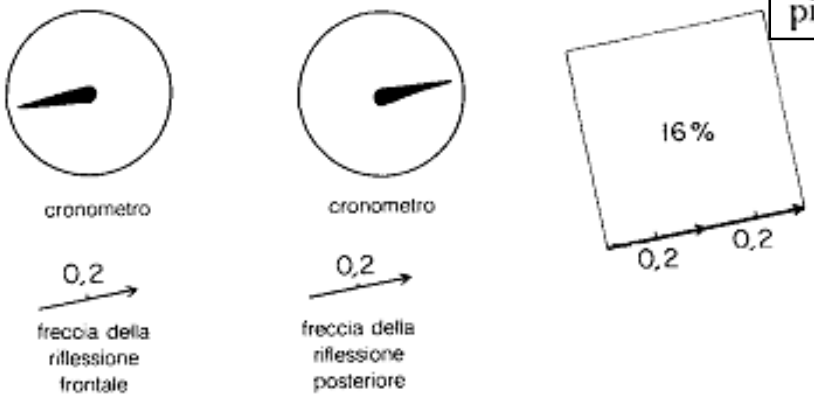


Fig. 14. Quando la lamina di vetro ha uno spessore tale da far compiere alla lancetta del cronometro che segue il fotone riflesso dalla superficie posteriore mezzo giro in più, le frecce relative alla riflessione frontale e posteriore hanno la stessa direzione e lo stesso verso e danno luogo a una freccia risultante di lunghezza 0,4, che rappresenta una probabilità del 16 %.

- …per poi calare ancora come mostrava la curva sperimentale.

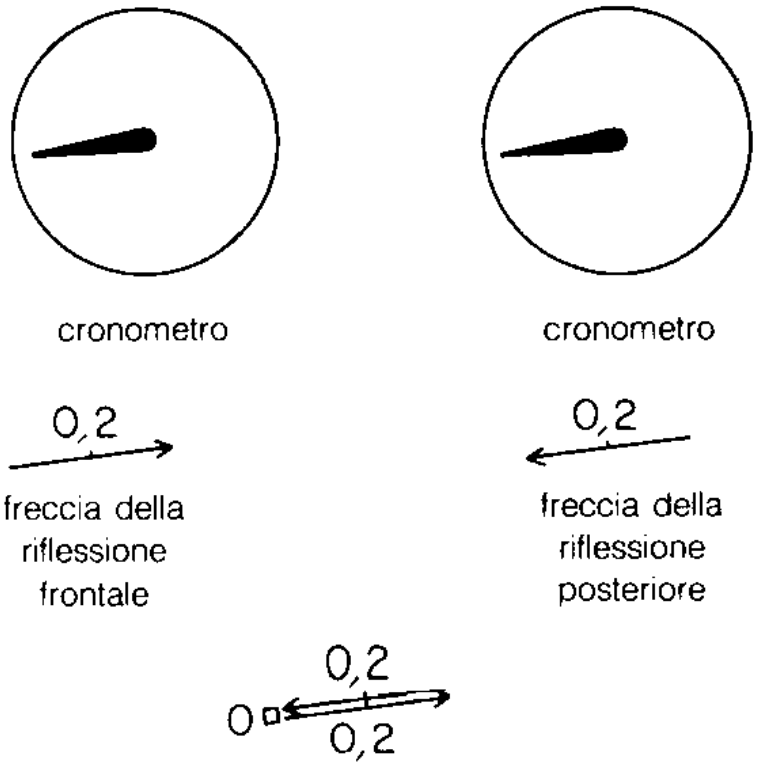


Fig. 15. Quando lo spessore della lamina di vetro è tale da far compiere alla lancetta del cronometro che segue il fotone riflesso dalla superficie posteriore un giro completo in più, la freccia finale è nuovamente zero e non si osserva nessuna riflessione.

- La percentuale della luce monocromatica riflessa varia la in funzione della sua frequenza.
- La ***frequenza*** è maggiore per luce monocromatica blu (il cronometro ideale è circa il doppio più veloce).

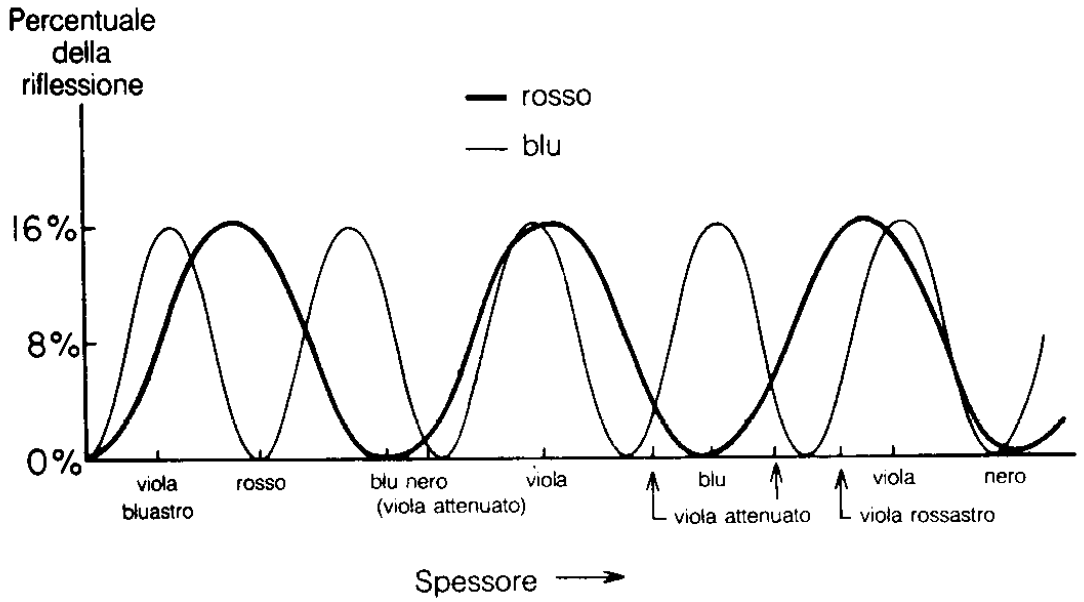


Fig. 18. Le due superfici di una lamina producono una riflessione parziale della luce monocromatica con probabilità che varia ciclicamente tra zero e il 16 % all'aumentare dello spessore. Poiché la velocità di rotazione della lancetta del cronometro immaginario varia col colore della luce, il ciclo si ripete a spessori differenti per colori differenti. Quindi, se sulla lamina arriva luce di due colori, ad esempio luce rossa monocromatica e luce blu monocromatica, un dato spessore potrà dare luogo alla riflessione solo del rosso, o solo del blu, o del rosso e del blu in proporzioni differenti, producendo varie sfumature di viola, o potrà anche non riflettere alcun colore (e allora si avrà una zona nera). Se lo spessore della lamina varia da punto a punto, come avviene per una goccia d'olio che si allarga su una pozzanghera, si verificano tutte le situazioni possibili. Con la luce del sole, che contiene tutti i colori, si producono tutte le combinazioni possibili e la gamma dei colori osservabili è ricchissima.

Nuove spiegazioni delle proprietà della luce

- Perché…
  - …in uno specchio l' ***angolo di incidenza della*** luce è uguale all'***angolo di riflessione***?
  - …cambiando il mezzo (es. l'acqua) la luce si piega?
  - …in un mezzo omogeneo si propaga in linea retta?
  - …ed altro ancora che per brevità è stato omesso in questa relazione…

Incidenza e riflessione

- È vero che nel suo percorso tutta la luce formi angoli di riflessione e incidenza per forza uguali?

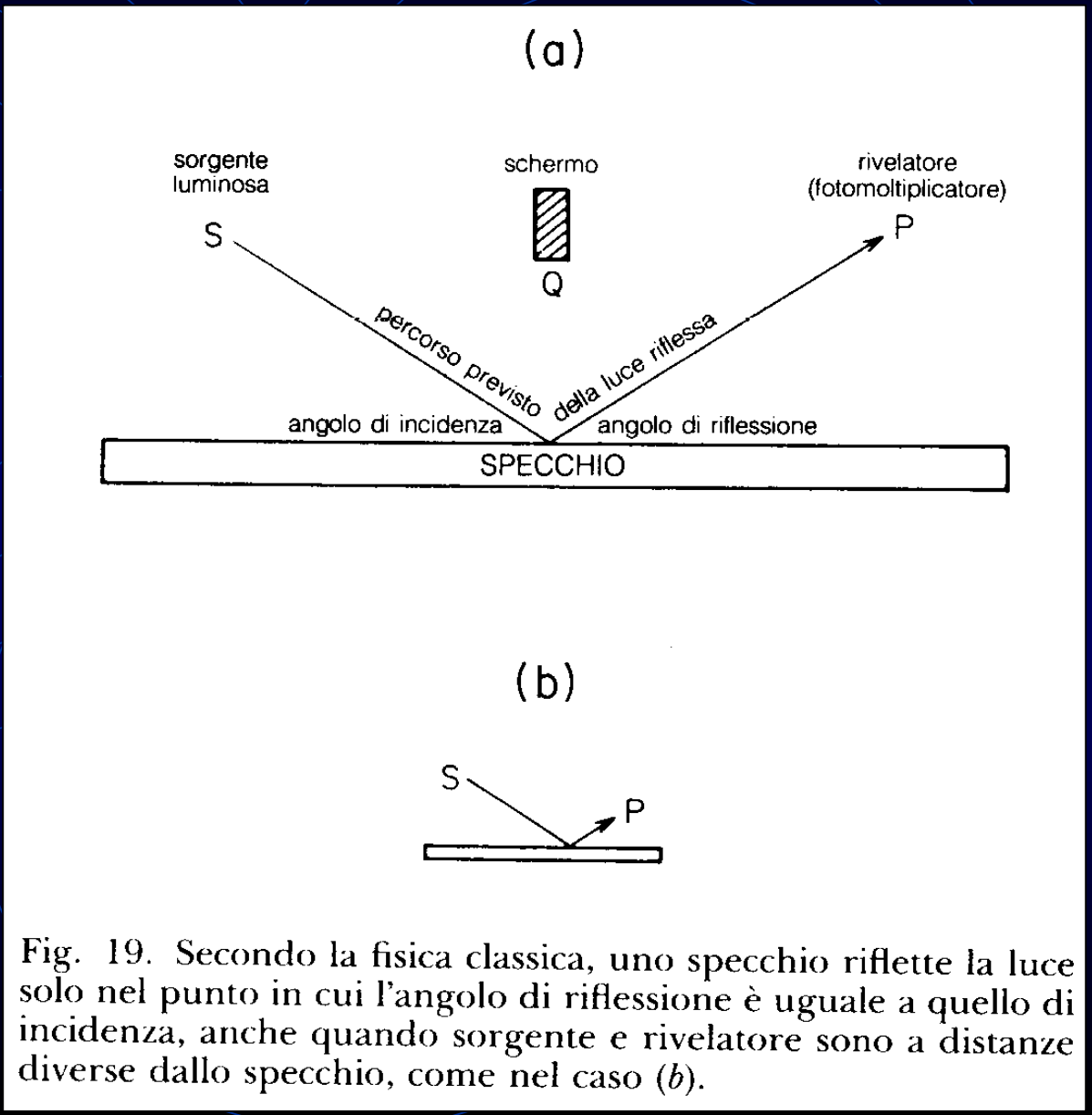


Fig. 19. Secondo la fisica classica, uno specchio riflette la luce solo nel punto in cui l'angolo di riflessione è uguale a quello di incidenza, anche quando sorgente e rivelatore sono a distanze diverse dallo specchio, come nel caso (*b*).

- Non è proprio così, perché ogni punto ha uguale ***ampiezza di probabilità*** (freccia).

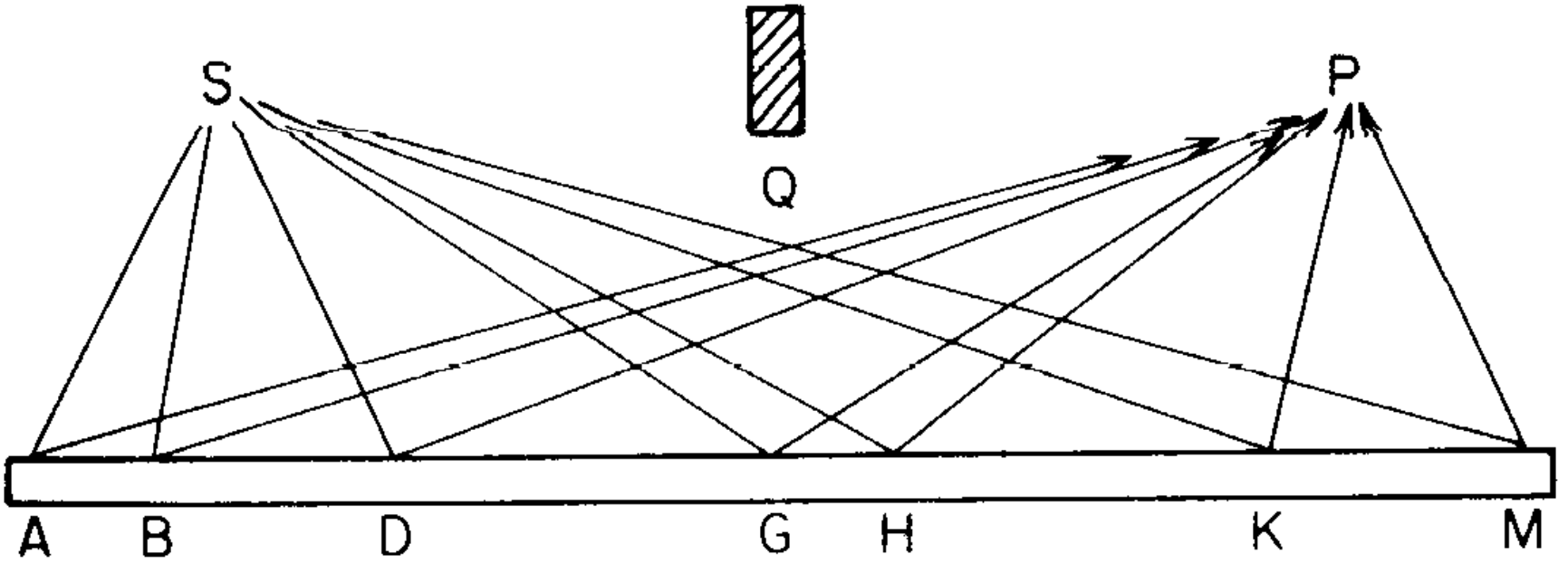


Fig. 20. Secondo l'elettrodinamica quantistica, la luce ha la stessa ampiezza di probabilità di riflettersi in ogni punto dello specchio, da A a M.

- Semplificazioni concettuali per capire meglio.

Fig. 21. Per calcolare più facilmente come si propaga la luce, si consideri momentaneamente solo una striscia di specchio divisa in tanti piccoli quadrati e un solo percorso per ciascun quadrato. Questa semplificazione non pregiudica in alcun modo l'accuratezza dell'analisi.

Fig. 22. Nei calcoli che verranno discussi, ogni percorso che la luce può seguire sarà rappresentato da una freccia di lunghezza arbitraria fissata, come in figura.

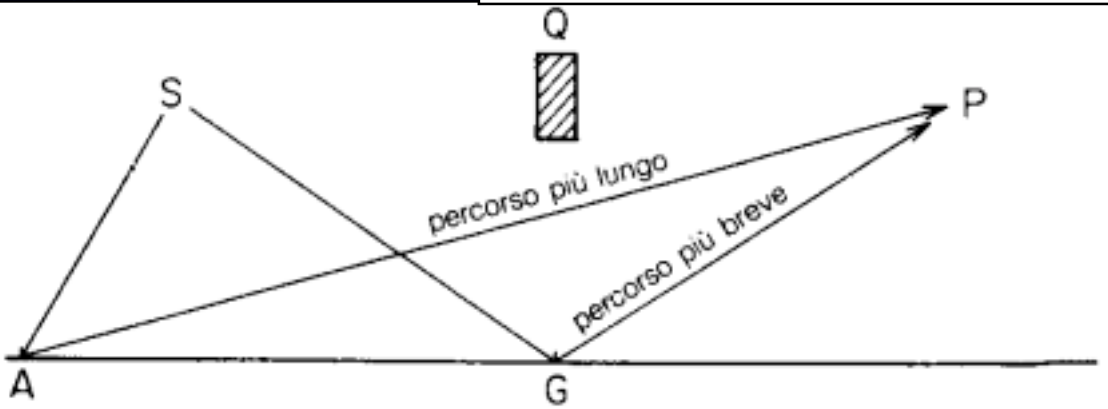
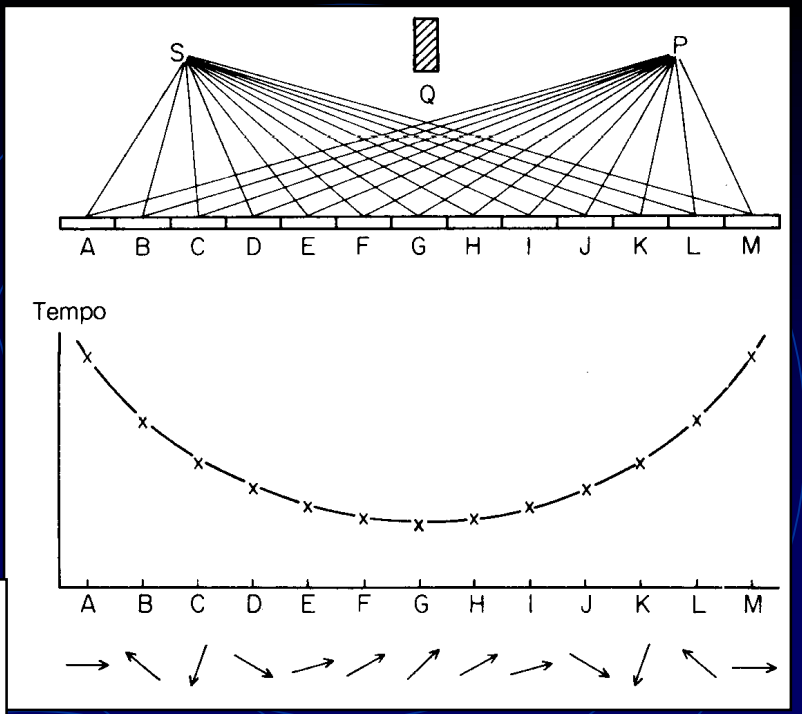


Fig. 23. Mentre la lunghezza delle varie frecce è essenzialmente la stessa, la loro direzione è diversa perché sono diversi i tempi impiegati da un fotone per seguire percorsi diversi. È evidente che occorre più tempo per andare da S in A e poi in P che non da S in G e poi in P.

- I percorsi possibili della luce: frecce uguali ma direzioni diverse (date dalle lancette del cronometro all'arrivo).

- Nella composizione della freccia risultante i vettori tra E ed I danno i maggiori contributi.



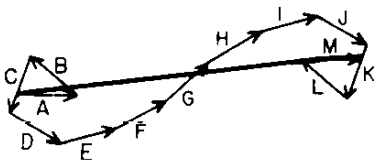
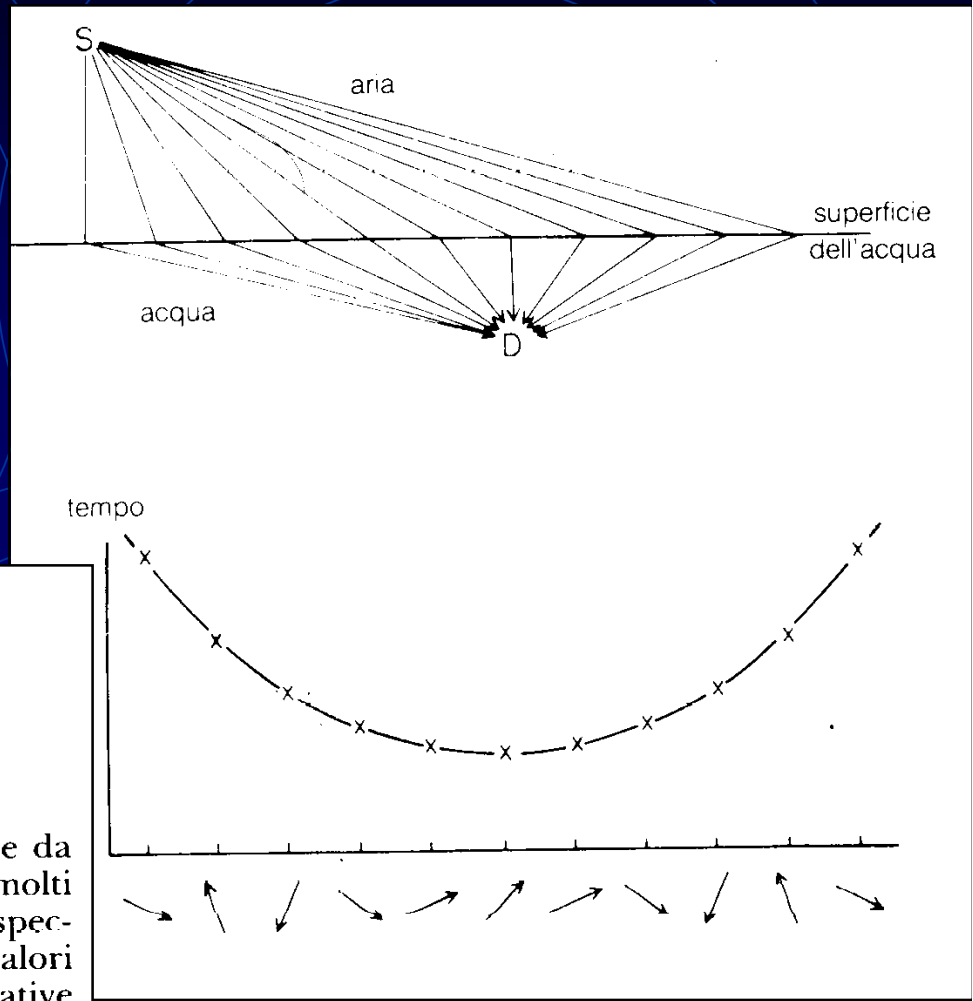


Fig. 21. Nella parte superiore della figura sono mostrati i percorsi che la luce può seguire (nella nostra situazione semplificata), mentre i punti corrispondenti nel grafico sottostante indicano il tempo che un fotone impiega per andare dalla sorgente a quel punto e di lì al fotomoltiplicatore. Subito sotto il grafico sono rappresentate le direzioni delle varie frecce e, sotto ancora, il risultato della loro somma. È evidente che il contributo principale alla lunghezza della freccia finale proviene dalle frecce comprese tra E ed I, le cui direzioni sono quasi le stesse, perché i tempi relativi ai corrispondenti percorsi sono quasi gli stessi. Questa è anche la zona in cui il tempo impiegato è minimo. È perciò approssimativamente corretto dire che la luce segue il percorso che richiede il minimo tempo.

- Si può interpretare il risultato affermando che la luce segue il percorso di minimo tempo.

Passaggio da un mezzo all'altro

- Come si comporta la luce passando dall'aria all'acqua?
- Si osservino ora tutti i percorsi possibili come nel caso della riflessione.



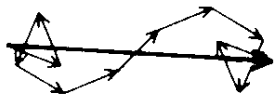


Fig. 29. Secondo la teoria quantistica, la luce può andare da una sorgente nell'aria a un rivelatore nell'acqua seguendo molti percorsi. Se si semplifica il problema, come nel caso dello specchio, si può riportare in un grafico il tempo relativo ai valori percorsi, e sotto di esso tracciare la direzione delle relative frecce. Anche questa volta i contributi maggiori alla lunghezza della freccia risultante vengono da quei percorsi le cui frecce puntano pressappoco nella stessa direzione, perché i tempi corrispondenti sono quasi gli stessi, e anche questa volta ciò avviene quando il tempo impiegato è minimo.

- Anche qui la luce segue il percorso di minimo tempo (viaggia più veloce nell'aria che nell'acqua) ma c'è un "compromesso", come nell'esempio del bagnino che cerca di soccorrere un bagnante.

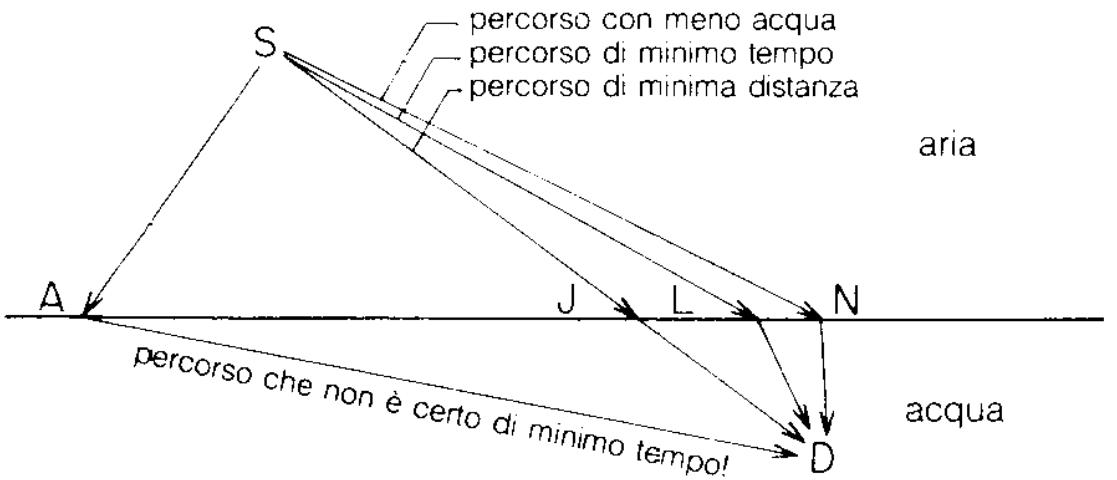


Fig. 30. Trovare il percorso di minimo tempo per la luce è come trovare il percorso che richiede meno tempo a un bagnino che deve attraversare di corsa una spiaggia e poi nuotare per salvare una persona che affoga: lungo il percorso più corto c'è troppa acqua, mentre lungo quello con meno acqua c'è troppa spiaggia; il percorso che richiede il minimo tempo è un compromesso tra i due.

- Un ulteriore esempio è dato dal perché d'estate la luce che attraversa aria calda ed aria fredda produca i miraggi.

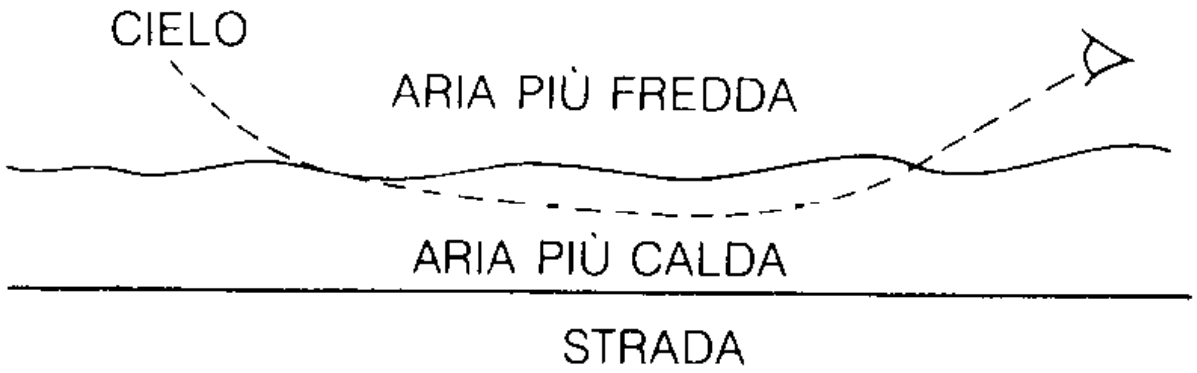


Fig. 31. Trovare il percorso di minimo tempo spiega anche come si produce un miraggio. La luce viaggia più velocemente nell'aria calda che in quella fredda. Quando si vede il riflesso del cielo sulla strada è perché parte della luce del cielo che arriva nell'occhio proviene dalla strada. Poiché l'unica altra situazione in cui si vede il cielo sulla strada si verifica quando c'è acqua che lo riflette, il miraggio viene attribuito alla presenza di acqua.

Propagazione in linea retta (?)

- La luce “annusa” i percorsi possibili, sembra viaggiare in linea retta.
- Ma non è tutto…

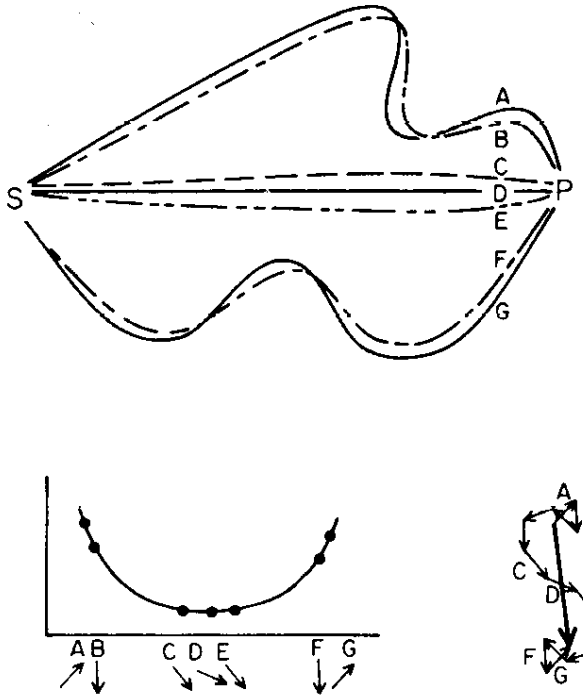


Fig. 32. Usando la teoria quantistica, si può capire perché la luce sembra viaggiare in linea retta. Se si prendono in considerazione tutti i percorsi possibili, si vede che per ogni percorso contorto ce n'è uno vicino di lunghezza notevolmente inferiore, che richiede perciò molto meno tempo e la cui freccia ha una direzione notevolmente diversa. Solo i percorsi vicini a quello rettilineo che passa per D hanno frecce che puntano tutte quasi nella stessa direzione, perché i tempi relativi sono quasi gli stessi. Soltanto tali frecce risultano importanti, perché sono le uniche a dar luogo a una freccia finale apprezzabile.

- *Primo caso)* I due blocchi sono lontani: quasi tutti i ***fotoni*** vanno in P come mostrano le frecce.

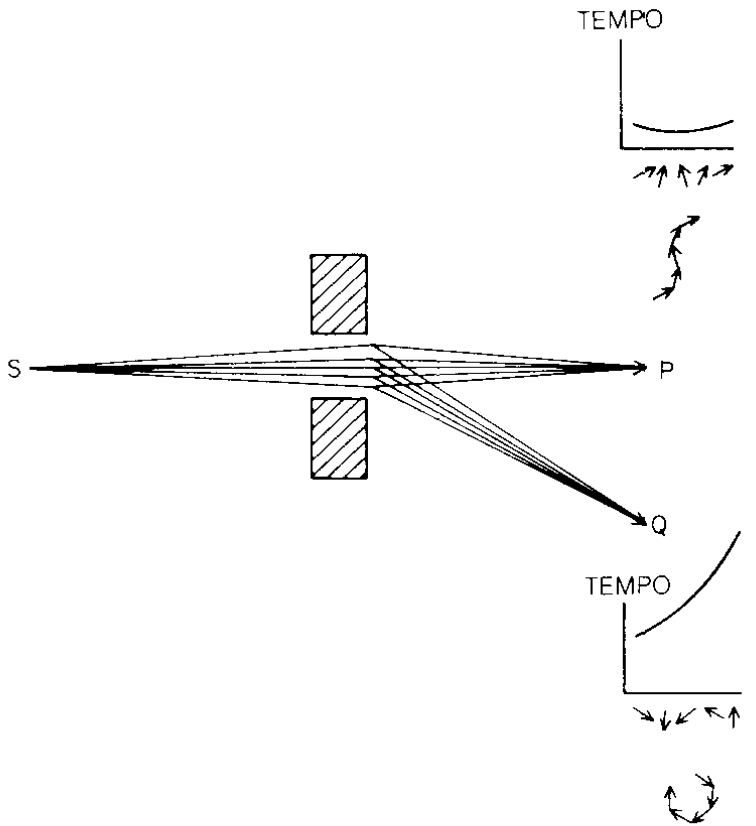


Fig. 33. La luce non segue solo il percorso rettilineo, ma anche tutto il fascio dei percorsi vicini. Se due blocchi sono abbastanza separati da lasciar passare questo fascio, i fotoni vanno normalmente in P e quasi mai in Q.

- *Secondo caso)* I due blocchi sono vicini: anche Q individua ***fotoni***: non c'è più differenza di tempo.

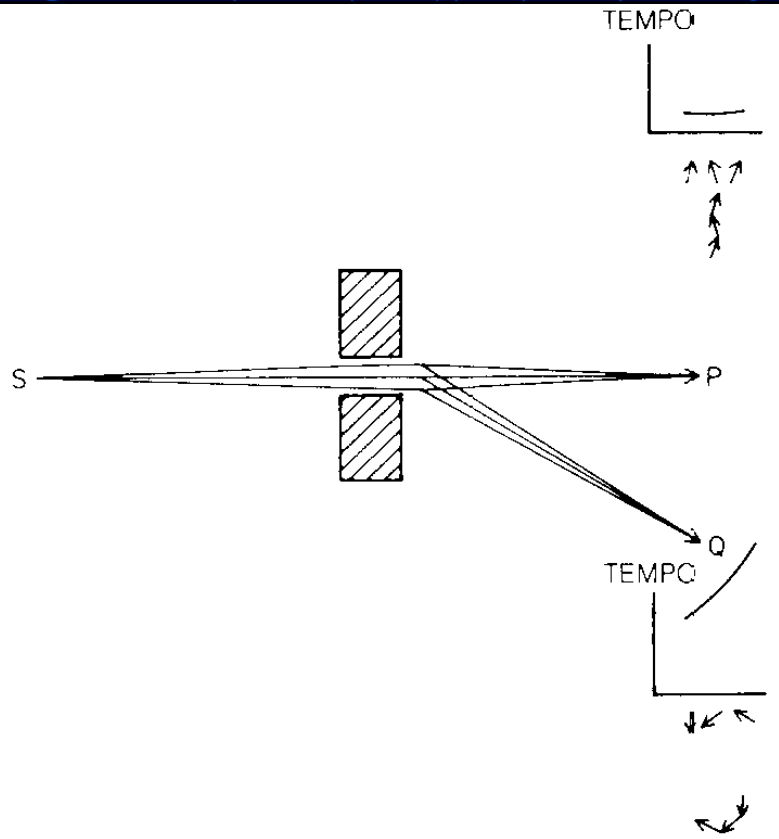


Fig. 34. Se si avvicinano i blocchi in modo che solo pochi percorsi diventino possibili, attraverso la stretta fenditura arriva in Q quasi altrettanta luce che in P, perché non ci sono abbastanza frecce che rappresentano i percorsi fino a Q per elidersi a vicenda.

- Osservazioni:
  - Dire che la luce si propaga in linea retta è solo un'approssimazione.
  - Si può vedere il ***principio di indeterminazione***: non si può determinare allo stesso tempo un percorso della luce e il suo successivo.
  - Il ***metodo delle frecce*** supera questo principio: esso stesso descrive in modo univoco la probabilità degli eventi, non eventi certi.

Un passo in avanti: eventi composti

- Per eventi composti si moltiplicano le frecce: questo può essere visto come ***contrazioni/rotazioni*** in successione di una "***freccia unitaria***".

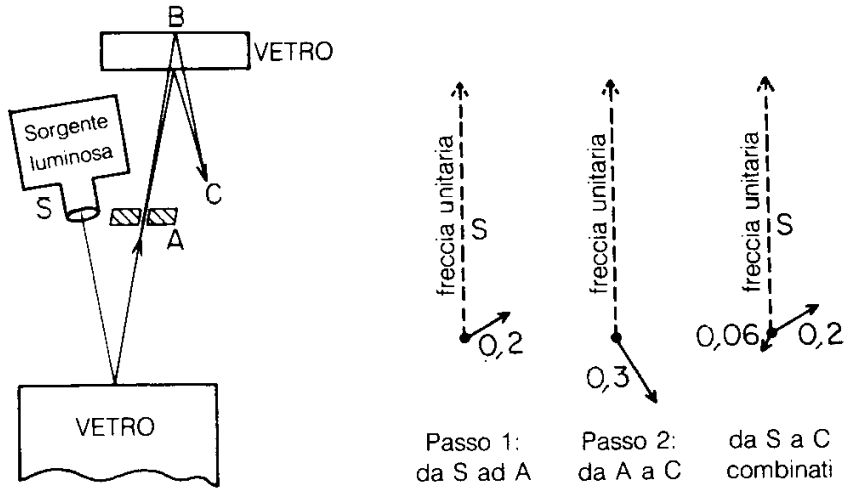


Fig. 37. Un evento composto può essere analizzato come una successione di passi. In questo esempio il percorso seguito da un fotone per andare da S a C può venire diviso in due passi: 1) il fotone va da S ad A; 2) il fotone va da A a C. Ogni passo, analizzato separatamente, dà luogo a una freccia che può essere considerata da un punto di vista nuovo: come una freccia unitaria (cioè di lunghezza 1 e che segna le 12) che ha subìto una contrazione e una rotazione. In questo esempio il passo 1 comporta una contrazione a 0,2 e una rotazione fino alle 2; il passo 2 una contrazione a 0,3 e una rotazione fino alle 5. L'ampiezza per due passi consecutivi si ottiene contraendo e ruotando in successione: la freccia unitaria iniziale viene ridotta e ruotata in modo da ottenere una freccia di lunghezza 0,2 che segna le 2, la quale viene a sua volta ridotta a 0,3 e ruotata dalle 12 alle 5, come se fosse la freccia unitaria; si ottiene così una freccia di lunghezza 0,06 diretta verso le 7 sul quadrante dell'orologio. Questo procedimento di contrazioni e rotazioni successive viene chiamato « moltiplicazione » delle frecce.

- Questo è necessario perché ciascun evento, semplice o composto che sia, deve avere una sola ***ampiezza di probabilità***.

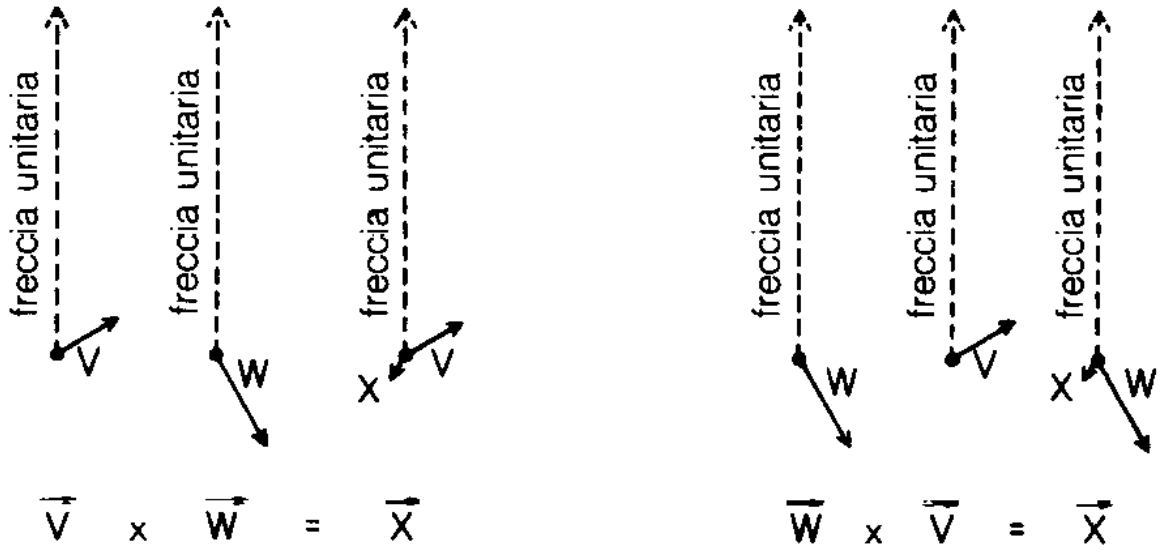


Fig. 39. I matematici hanno osservato che la moltiplicazione tra frecce può essere espressa come successione di trasformazioni di una freccia unitaria, nel nostro caso mediante contrazioni e rotazioni. Come nella comune moltiplicazione, l'ordine non è importante: si ottiene la stessa risposta, freccia X, moltiplicando la freccia V per W o W per V.

Interazioni tra elettroni e fotoni

- Nella ***QED*** si hanno tre eventi elementari:
  - Un fotone si propaga da un punto a un altro.
  - Un elettrone si propaga da un punto a un altro.
  - Un elettrone emette o assorbe un fotone.
- Sono eventi nello ***spazio-tempo*** (definito da tre coordinate X,Y, Z più il tempo T).
- Il valore ***c*** rappresenta la velocità della luce.

1) Un fotone si propaga da un punto a un altro

- L'ampiezza di questo evento è ***F (da A a B)*** e dipende solo da ***I***, definito come:

$$I = (X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2 - (T_2 - T_1)^2$$

- ***I*** è uguale a 0 per la velocità ***c*** (che da il contributo maggiore), ma può essere che la luce vada più/meno veloce di ***c***!
- A brevi distanze si devono considerare anche tali contributi.
- Tale evento descrive quasi tutta l'ottica e la ***teoria della luce***.

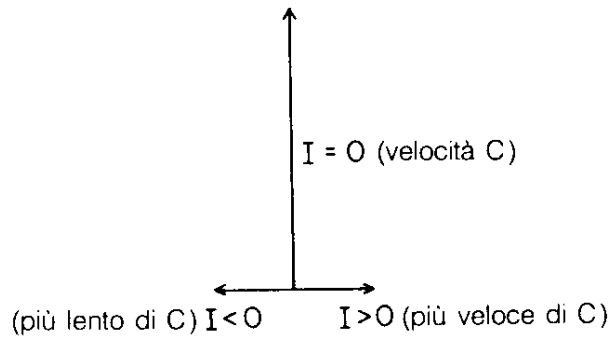


Fig. 56. Se la luce viaggia a velocità *c*, l'« intervallo » *I* è nullo e si ha un grosso contributo diretto verso le 12. Se *I* è maggiore di zero, si ha un piccolo contributo diretto verso le 3 e inversamente proporzionale a *I*; se *I* è minore di zero, si ha un contributo analogo ma diretto verso le 9. Dunque la luce ha ampiezza non nulla per propagarsi con velocità sia maggiore che minore di *c*, ma tali ampiezze si elidono a vicenda per percorsi lunghi.

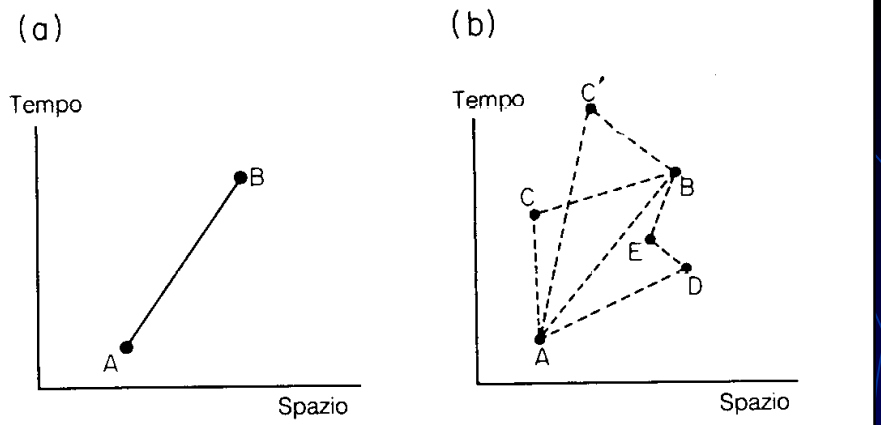


Fig. 57. L'ampiezza di probabilità che un elettrone si propaghi da un punto a un altro dello spazio-tempo sarà indicata con E(da A a B). Rappresento E(da A a B) con una linea retta tra i due punti (*a*), ma la si può pensare come la risultante di tante ampiezze (*b*), tra cui quelle per i percorsi con « due salti », in cui l'elettrone cambia direzione nei punti C o C′, quelle per i percorsi con « tre salti », in cui cambia direzione in D e in E, oltre all'ampiezza relativa al percorso diretto da A a B. Nel suo viaggio nello spazio-tempo da A a B, l'elettrone può cambiare direzione un qualunque numero di volte (tra zero e infinito), e sono infiniti i punti in cui può farlo. Tutti questi contributi sono inclusi in E(da A a B).

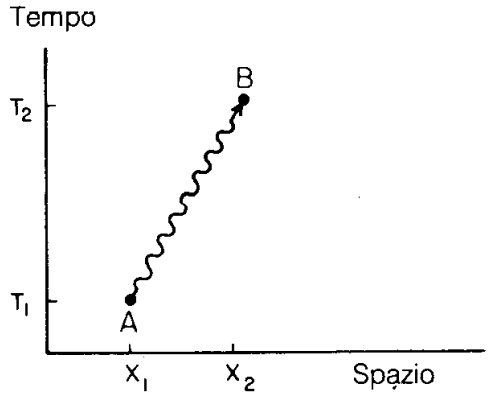


Fig. 55. Un fotone, rappresentato come una linea ondulata, ha un'ampiezza di probabilità per andare da un punto A a un punto B dello spazio-tempo che è indicata con F(da A a B) ed è espressa da una formula che dipende solo dalla differenza di posizione $(X_2 - X_1)$ e dalla differenza di tempo $(T_2 - T_1)$. In effetti è semplicemente l'inverso della differenza dei loro quadrati, cioè dell'« intervallo » I che può essere scritto $(X_2 - X_1)^2 - -(T_2 - T_1)^2$.

2) Un elettrone si propaga da un punto a un altro

- L'ampiezza di questo evento è ***E (da A a B)*** e dipende anch'esso da ***I***, ed inoltre da un numero ***n***.
- Se si pone n = 0 ***F (da A a B)*** corrisponde ad ***E (da A a B)***.

- ***E (da A a B)*** può essere espresso come la somma di n ***F (da A a B)*** (percorso diretto) più n ×F (da A a C) × n × F (da C a B) … e così via, tenendo conto di tutti possibili salti, moltiplicando ciascun F (da P_1 a P_2) per $n^{\text{numero salti}}$.

1. La formula che esprime E(da A e B) è complicata, ma c'è un modo interessante per spiegarne la struttura. Si può rappresentare E(da A a B) come somma dell'enorme numero di modi differenti in cui l'elettrone può andare dal punto A al punto B (fig. 57). L'elettrone può fare « un solo salto » andando direttamente da A a B, può fare « due salti » fermandosi prima in C, oppure « tre salti » fermandosi in D e in E e così via. L'ampiezza per un salto diretto da F a G è data da F(da F a G), cioè è la stessa dell'ampiezza per un fotone che vada tra gli stessi due punti. Ogni « fermata » introduce un'ampiezza n^2, dove n è il numero che abbiamo appena visto e che serve per ottenere il risultato giusto.

L'espressione di E(da A a B) è dunque una somma del tipo: F(da A a B) [cioè « un salto »] + F(da A a C) × n^2 × F(da C a B) [« due salti » con fermata in C] + F(da A a D) × n^2 × F(da D a E) × n^2 × F(da E a B) [« tre salti » con fermata in D e E] + ... per *tutte le possibili posizioni* dei punti C, D, E, ecc.

Si osservi che al crescere di n i percorsi meno diretti danno un contributo maggiore alla freccia finale. Se $n = 0$ (come per il fotone) tutti i termini che contengono n sono nulli e resta solo il primo, cioè F(da A a B). Dunque E(da A a B) e F(da A a B) sono strettamente connesse.

3) Un elettrone emette o assorbe un fotone

- Questo evento è chiamato "***accoppiamento***" o "***interazione***".
- L'ampiezza di tale evento è ***j***, detta "***carica***" (per l'***elettrone*** j vale circa –0,1).

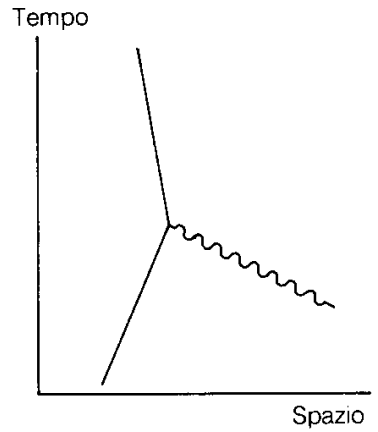


Fig. 58. Un elettrone, rappresentato dal tratto rettilineo, ha una certa ampiezza per assorbire o per emettere un fotone, rappresentato dal tratto ondulato. Poiché l'ampiezza per emissione e quella per assorbimento sono le stesse, entrambe le situazioni verranno chiamate « accoppiamento ». L'ampiezza di accoppiamento è un numero, indicato con j, che vale circa $-0{,}1$ per l'elettrone. Tale numero viene a volte chiamato « carica » della particella.

Spostamento di due elettroni

- L'evento composto può avere moltissime complicazioni (ad es. fotoni emessi e assorbiti), come mostrano i grafici, e di conseguenza complicatissimi calcoli di ampiezza di probabilità (che di solito sono eseguiti al calcolatore).
- Il ***fotone*** è scambiato, senza considerare il suo verso ***spazio-temporale*** (è uguale in tutte le due direzioni perché è antiparticella di se stesso).

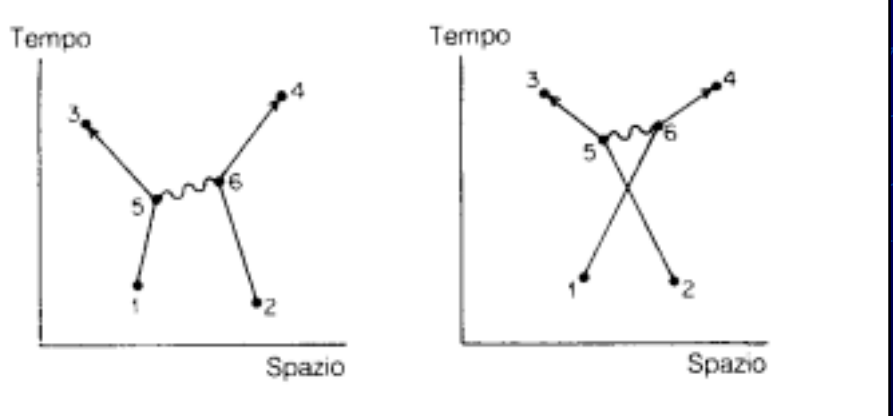


Fig. 60. Due « altri modi » in cui può verificarsi l'evento della fig. 59: in entrambi un fotone viene emesso in 5 e assorbito in 6. Queste alternative hanno condizioni finali identiche ai primi due modi: due elettroni partono e due elettroni arrivano; esse sono perciò indistinguibili dalle precedenti possibilità. Quindi, per ottenere un'approssimazione migliore della freccia risultante che descrive il fenomeno, le frecce relative a questi « altri modi » vanno sommate a quelle dei modi della fig. 59.

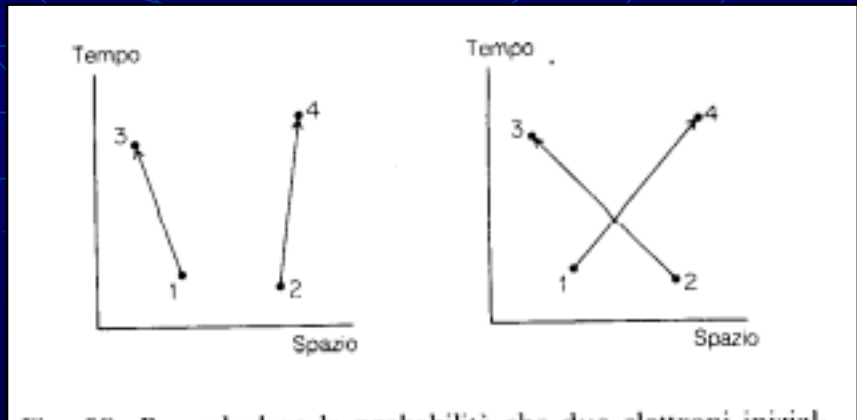


Fig. 59. Per calcolare la probabilità che due elettroni inizialmente nei punti 1 e 2 dello spazio-tempo finiscano nei punti 3 e 4, si deve calcolare, usando l'espressione di E(da A a B), la freccia per il « primo modo », in cui 1 va in 3 e 2 va in 4; poi si calcola la freccia per il « secondo modo », in cui 1 va in 4 mentre 2 va in 3 (una « intersezione »). Sommando queste frecce per il « primo » e per il « secondo modo » si ottiene una buona approssimazione della freccia finale. Ciò è vero per l'elettrone fittizio di « spin zero ». Se avessimo incluso la polarizzazione dell'elettrone, avremmo dovuto sottrarre, invece che sommare, le due frecce.

Diffusione della luce

- È lo spostamento di un ***elettrone*** e un ***fotone***.
- L'***elettrone*** che si muove indietro nel tempo è un ***positrone***!

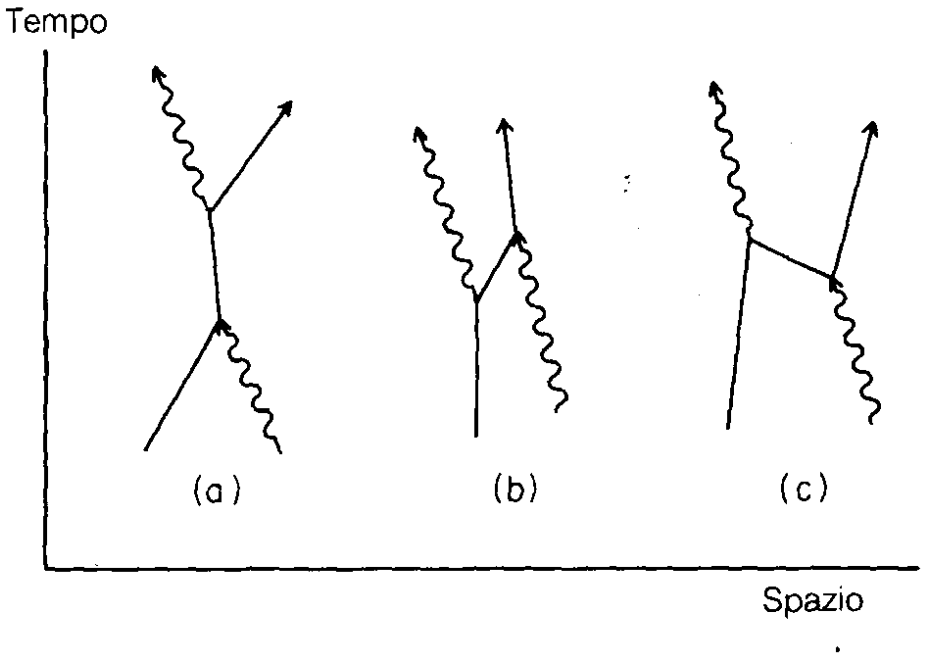


Fig. 63. La diffusione della luce consiste nell'assorbimento e nell'emissione di un fotone da parte di un elettrone. Come evidenziato in (*b*), questi due eventi non avvengono necessariamente in tale sequenza. L'esempio (*c*) mostra una possibilità strana ma reale: l'elettrone emette un fotone, poi si precipita all'indietro nel tempo ad assorbire un altro fotone e infine si propaga nuovamente in avanti nel tempo.

Una sintesi: nuove descrizioni per la luce

- Tra un ***nucleo*** e un suo ***elettrone*** (ad es. H) vi è uno scambio di ***fotoni*** che ne spiega l'attrazione reciproca.
- La direzione delle frecce è data in verità da quella della luce emessa da una sorgente monocromatica, che varia costante nel tempo, ma in senso antiorario.
- Applicando i tre eventi si possono descrivere con maggiore accuratezza i fenomeni precedentemente spiegati sulla luce (riflessione, focalizzazione, passaggio da un mezzo a un altro…).
- Nella tecnologia, si è potuta spiegare la teoria dell'emissione stimolata di luce che ha avuto come risultato il ***LASER***, già previsto da Einstein.

Una spiegazione per il LASER…

- Per due ***fotoni*** che vanno a coincidere, avendo ampiezza composta uguale, vi è probabilità è quadrupla.
- Si dice che i ***fotoni*** tendano a stare nello stesso "***stato***".
- Questo sta alla base del funzionamento del ***LASER***.

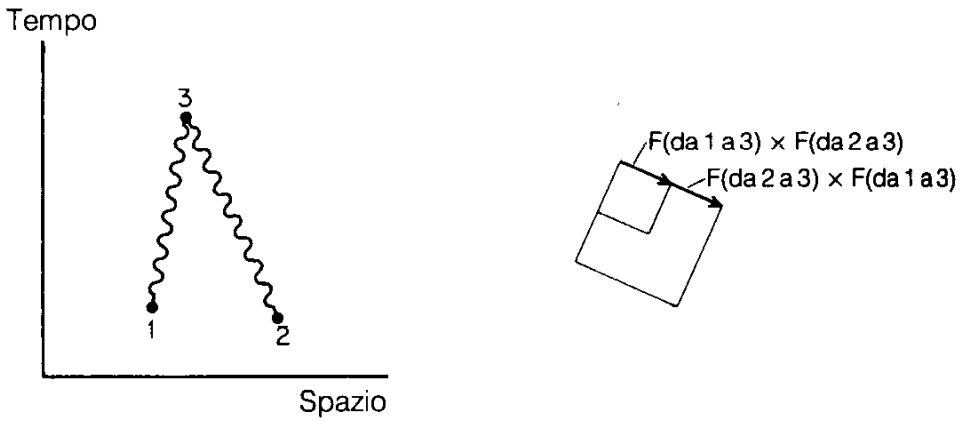
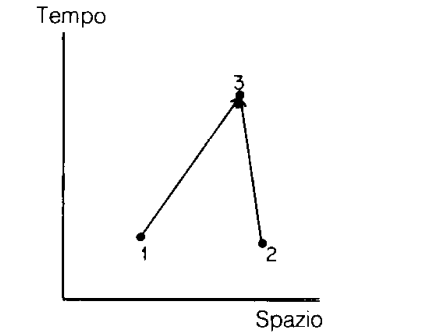


Fig. 71. Portando a coincidere i punti 3 e 4, le due frecce F(da 1 a 3) × F(da 2 a 3) e F(da 2 a 3) × F(da 1 a 3) diventano identiche in lunghezza e in direzione. Quando le si somma, essendo sempre « allineate », danno luogo a una freccia lunga il doppio di ciascuna di esse, il cui quadrato è quindi quattro volte maggiore. Pertanto i fotoni tendono a trovarsi nello stesso punto spaziotemporale. L'effetto è ancora più amplificato se sono coinvolti più fotoni. Questa proprietà sta alla base del funzionamento del laser.

…e per il principio di esclusione



E(da 1 a 3) × E(da 2 a 3) // E(da 2 a 3) × E(da 1 a 3)

Fig. 72. Se due elettroni (con la stessa polarizzazione) tentano di andare nello stesso punto dello spazio-tempo, si ha sempre interferenza distruttiva per effetto della polarizzazione: le due frecce identiche E(da 1 a 3) × E(da 2 a 3) e E(da 2 a 3) × E (da 1 a 3) si sottraggono e si ottiene una freccia finale nulla. L'avversione degli elettroni a occupare la stessa posizione spaziotemporale viene chiamata « principio di esclusione » ed è la ragione della grande varietà degli atomi nell'universo.

- Sono state introdotte molte grandezze e coefficienti (ad es. valenza, indice di rifrazione, ecc.) per "semplificare" tutte le complicazioni derivanti da ***j***, ***F(da A a B)*** ed ***E(da A a B)***.

- Negli ***elettroni*** fittizi di ***spin*** 0 (non esiste!) accade lo stesso.
- In quelli reali, invece, essendoci la ***polarizzazione*** (…), le due ampiezze composte si elidono perché gli elettroni tendono ad evitarsi: si tratta appunto del ***principio di esclusione*** di Pauli.
- L'***elettrone***, come è noto, può avere due (4) stati di ***polarizzazione***.
- I tre eventi fondamentali riescono a descrivere tutte le proprietà e la natura degli elementi (ad es. legami, conducibilità termica, elettrica).

Per concludere… m = 1,00115965221

- È calcolato ***m*** come risposta di un ***elettrone*** a un ***campo magnetico esterno***.
- Un ***fotone*** del campo magnetico interagisce con l'***elettrone***: Dirac calcolò ***m*** considerando il caso più semplice di ***E (da A a B)***.
- Nel 1948 Schwinger per primo ottenne $m = j \times j / 2\pi$ considerando anche altri percorsi più complicati.

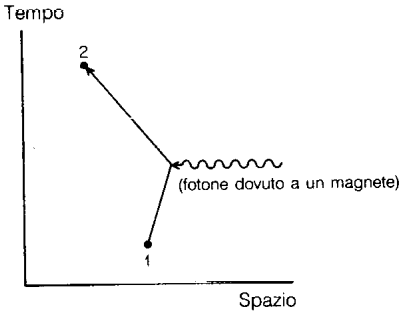


Fig. 73. Il diagramma che rappresenta il calcolo di Dirac del momento magnetico dell'elettrone è molto semplice. Il risultato del conto rappresentato da questo diagramma verrà posto uguale a 1.

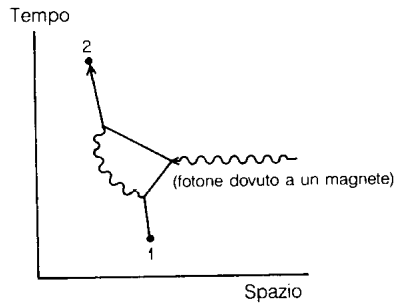


Fig. 74. Gli esperimenti di laboratorio mostrano che il valore reale del momento magnetico dell'elettrone non è 1, ma è leggermente maggiore. Ciò succede perché vi sono altre possibilità: ad esempio, l'elettrone può emettere un fotone e poi riassorbirlo, il che richiede due E(da A a B), una F(da A a B) e due *j* in più. La correzione che tiene conto di questa possibilità fu calcolata da Schwinger, che trovò $j \times j$ diviso 2π. Questa alternativa è sperimentalmente indistinguibile dal modo discusso prima, in cui l'elettrone va dal punto 1 al punto 2; pertanto le frecce per le due possibilità vanno sommate e si ha interferenza.

- Attualmente si sono superati gli 8 valori di ***j*** per un calcolo ancora più preciso di m grazie all'uso dei moderni calcolatori:

m (teorico) = 1,00115965246

m(QED) = 1,00115965221

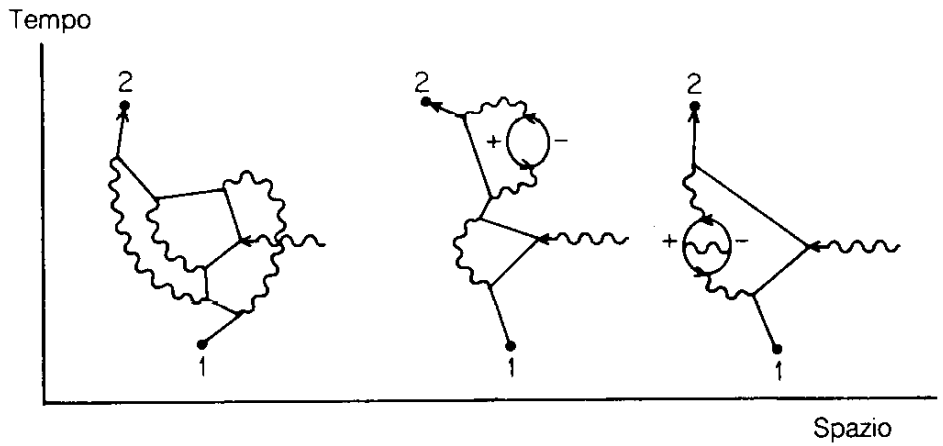


Fig. 76. Si stanno portando a termine i conti per rendere ancora più accurato il valore teorico del momento magnetico dell'elettrone. Il contributo successivo all'ampiezza, dovuto alle alternative con sei interazioni in più, comporta il calcolo di qualcosa come 10.000 diagrammi (ciascuno contenente 500 termini), tre dei quali vengono qui mostrati in figura. Nel 1983 il valore teorico era 1,00115965246, con un'incertezza di circa 20 sulle ultime due cifre, mentre il valore sperimentale era 1,00115965221, con un'incertezza di circa 4 sull'ultima cifra. Per avere un'idea di tale precisione, è come se la distanza tra New York e Los Angeles, di quasi 5.000 chilometri, fosse misurata con l'approssimazione di un capello umano.

Un breve cenno sulla polarizzazione

- Il ***fotone*** ha 4 differenti ***polarizzazioni*** (come le 4 dimensioni ***X***, ***Y***, ***Z***, ***T***, ma Z e T si elidono tranne che nei ***fotoni virtuali***).
- L'***elettrone*** può cambiare la polarizzazione (ecco perché ***E (da A a B)*** $\neq$ ***F (da A a B))***.
- La ***polarizzazione*** produce molti ***accoppiamenti*** diversi.
- Interazioni avvengono per particolari ***polarizzazioni***, con ampiezza ***j***.
- I tipi di ***polarizzazione*** possono essere ottenuti dalla ***QED*** più due ipotesi addizionali:
  1) Se l'apparato è ruotato il risultato finale non cambia.
  2) I risultati sono analoghi per velocità uniformi (***principio di relatività***).
- Le classi di particelle, in generale, sono date dallo spin, ad es. ***spin*** 0: una componente (non esiste!), 1 e ½: 4 componenti, 2: 10 componenti…

Il carattere della legge fisica di Richard P. Feynman

Appena scoperti gli elettroni parevano comportarsi, molto semplicemente, come particelle o proiettili. In seguito, gli esperimenti di diffrazione su fasci di elettroni ne misero in luce il carattere ondulatorio. Con il passare del tempo, cresceva la confusione in proposito: onde o particelle, particelle o onde? Tutto sembrava rendere valide entrambe le ipotesi.

La questione fu risolta tra il 1925 e il 1926, quando vennero scritte le equazioni corrette della meccanica quantistica. Ora conosciamo il comportamento sia della luce sia degli elettroni. Ma come definirlo? Se dicessi che si comportano come particelle, ne darei un'idea sbagliata e farei lo stesso se dicessi che si comportano come onde. In realtà, gli elettroni mostrano un comportamento del tutto particolare, che tecnicamente si potrebbe definire "quanto-meccanico", ed è completamente diverso da quanto vi potreste aspettare. Il comportamento delle cose su scala microscopica è infatti differente rispetto a quello che sperimentate ogni giorno e la vostra conoscenza delle cose è per questo incompleta. Un atomo non si comporta come un corpo dotato di peso che oscilla attaccato a una molla e neppure come un sistema solare in miniatura, con i suoi pianetini che ruotano su orbite stabilite. E non è neppure assimilabile a una sorta di nube o di nebbia che avvolge il nucleo. Si comporta come qualcosa che non avete mai visto prima.

C'è però almeno una semplificazione: gli elettroni si comportano in questo senso come i fotoni. Entrambi sono un po' stravaganti, ma esattamente allo stesso modo...

In realtà, la difficoltà è di natura psicologica e sta nel vostro continuo, tormentoso ripetervi "ma come può essere?". Questa è l'espressione di un desiderio incontrollabile, ma comunque vano, di vedere la questione nei termini di qualcosa di familiare. Qui non darò una descrizione che abbia analogie con qualcosa di consueto; cercherò semplicemente di descriverla. Ci fu un tempo in cui i giornali dicevano che solo 12 uomini al mondo capivano la teoria della relatività. Io penso che quel periodo non sia mai esistito. Ci può essere stato un momento in cui un solo uomo era in grado di comprenderla, perché era l'unico a conoscerla, prima di pubblicarla. Dopo averla letta, tuttavia, moltissime persone hanno capito la teoria della relatività, in un modo o nell'altro, e certamente più di 12. D'altra parte, credo di poter dire con sicurezza che nessuno capisce la meccanica quantistica. Perciò non prendete la lezione troppo seriamente, pensando di dover comprendere quello che sto per descrivervi nei termini di un qualche modello, ma rilassatevi e godetevi la lezione. Sto per raccontarvi come si comporta la natura. Se riuscirete semplicemente ad ammettere che quanto vi dico è vero, lo troverete incantevole. Non continuate a ripetervi "ma come può essere?", se riuscite a evitarlo. Vi perdereste in un vicolo cieco da cui nessuno ancora è riuscito a uscire. Nessuno sa "come può essere".

Questo brano è tratto da *The Character of Physical Law* (Il carattere della legge fisica, pagg. 127-128) del fisico teorico statunitense Richard P. Feynman, pubblicato dalla MIT Press nel 1967.

Bibliografia e riferimenti

- ***"QED, la strana teoria della luce e della materia"***, R. P. Feynman, ed. Adelphi
- ***Enciclopedia On-Line Britannica*** (sito: www.britannica.com, in lingua inglese)
- ***Enciclopedia Microsoft Encarta 99 Plus***

Domande e commenti