

## *L'uomo sotto i riflettori, Uno studio ottico dell'aura (parte II).*

Questo secondo testo segue: "L'uomo nell'osservatore, un'indagine ottica sull'aura, parte I". Si presuppone che il lettore o la lettrice abbiano una sufficiente familiarità con i concetti ottici ivi spiegati. Approfondendo il discorso, per chi volesse dare un senso a questi esperimenti, eventualmente per chi volesse rifarli sul banco ottico stesso.

L'esperimento di Michelson e Morley, condotto nel 1887, occupa un posto importante in questo testo. Ha poi cercato di dimostrare che nell'universo non è necessario supporre l'esistenza di una sostanza fine uniformemente distribuita chiamata "etere". Tuttavia, in una forma leggermente modificata che presentiamo qui, e con un'accuratezza che forse all'epoca non era possibile, questo esperimento risulta dimostrare l'esistenza stessa di una sostanza estremamente fine, anche se in modo non uniforme. E questo ci sembra un curioso scherzo del destino: lo stesso esperimento porta prima a una falsificazione e 125 anni dopo, in una forma leggermente modificata, a una verifica. Tutto questo, e molto altro, vogliamo spiegarlo in dettaglio qui di seguito.

In tutti i tempi e in molte culture si sentono testimonianze di persone che sostengono che non solo abbiamo un corpo biologico, ma che possediamo anche un insieme di corpi materiali sottili, la cosiddetta "aura". Nella filosofia occidentale contemporanea, il tema non viene quasi mai affrontato. Anche le attuali scienze naturali - per usare un eufemismo - non sono troppo interessate a questo argomento e non sono davvero piene di ricerche in questo campo. È comprensibile che non si cerchi qualcosa di cui si nega l'esistenza. Eppure è stato uno dei temi più importanti tra i fondatori della nostra filosofia: gli antichi pensatori greci. Anche nel cristianesimo - il secondo pilastro della nostra civiltà occidentale - la credenza nell'esistenza di una sostanza sottile non è mai lontana. Alla fine del XIX secolo, il tema sembrò tornare brevemente all'interesse scientifico, e questo nel bel mezzo di tutte le controversie che all'epoca circondavano il famoso "esperimento di Michelson e Morley". Un motivo sufficiente per dare un'occhiata più da vicino.

### *1. L'esperimento di Michelson e Morley.*

Tutti hanno vissuto l'esperienza di sedersi in un treno fermo accanto a un secondo treno. Se poi un treno partiva dolcemente, non era subito chiaro se si trattava del proprio o dell'altro, e ci voleva un po' di tempo per cercare un punto di orientamento fisso, come la stazione o il binario stesso. Riflettendo ulteriormente, trovare un punto di orientamento fisso, ovunque, sembra tutt'altro che semplice. La Terra ruota intorno al suo asse e intorno al Sole, che a sua volta fa parte di una galassia in rotazione, e tutti appartengono a un universo in espansione. Esiste quindi un punto fisso da qualche parte nello spazio?

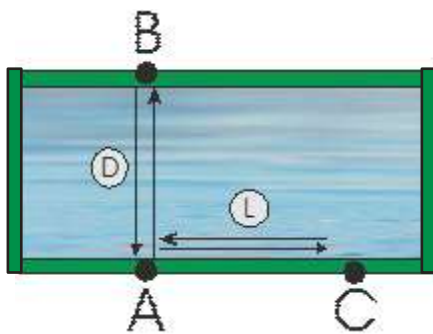
Nella sua *Philosophia Naturalis* (1687), Isaac Newton adottò i concetti di tempo assoluto e spazio assoluto. Egli ha ipotizzato che il tempo passi in modo uniforme, completamente indipendente da qualsiasi altra cosa. E lo spazio era anche una sorta di standard fisso, che permetteva di determinare la posizione corretta di ogni oggetto nell'universo. Qualcosa nello spazio ha svolto il ruolo di sistema di coordinate fisse e ha garantito che il luogo e il movimento potessero essere fissati in modo assoluto. A suo tempo, questo non rappresentò un problema immediato per Jan Modaal.

La scienza avanzata ha riscontrato una difficoltà in questo caso. Se tutti i movimenti sono solo movimenti relativi a qualcos'altro, esiste un punto di riferimento fisso nello spazio o l'intera meccanica celeste poggia sulle sabbie mobili?

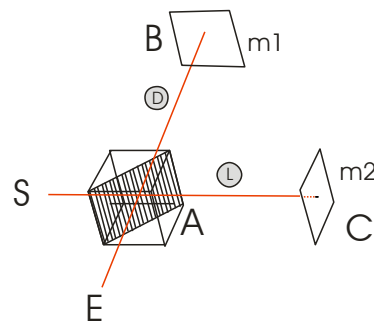
Le onde che si muovono nell'acqua hanno come mezzo l'acqua stessa, mentre il suono utilizza l'aria per propagarsi. Non sembra quindi così azzardato ipotizzare che la luce del sole e delle stelle che raggiunge la Terra lo faccia attraverso un mezzo. Così la fisica accolse un ipotetico mezzo, una sostanza intermedia estremamente sottile chiamata "etere", che riempisse uniformemente tutto lo spazio e che potesse servire anche come standard per le misure assolute di tempo e spazio. La questione era se e come si potesse dimostrare sperimentalmente la sua esistenza. Un esperimento di questo tipo fu condotto nel 1887 da Michelson e Morley - d'ora in poi abbreviato in questo testo come "esperimento M&M" - con un dispositivo basato sull'interferenza della luce.

Chiarire di seguito. Il disegno a sinistra (1a) rappresenta un'acqua ferma, ad esempio una piscina, con i punti A, B e C ai suoi bordi, in modo che la distanza AB sia uguale ad AC. D e L sono due nuotatori che nuotano alla stessa velocità. D attraversa la vasca da A a B e ritorno, L nuota longitudinalmente da A a C e ritorno. È quindi ovvio che entrambi raggiungono il punto A nello stesso momento.

Ora guardate il disegno a destra (1b). Si tratta di una rappresentazione schematica dell'apparato, un cosiddetto "interferometro", con cui è stato eseguito l'esperimento M&M. Qui, S ("S" da Source) è una sorgente luminosa che illumina un beamsplitter BS, un cubo con uno specchio semitrasmissivo in diagonale, di cui A è il centro. Le figure m1 e m2 (due volte la "m" minuscola di specchio) sono due specchi piani. Sono posizionati in modo che la distanza AB sia uguale alla distanza AC.



1a

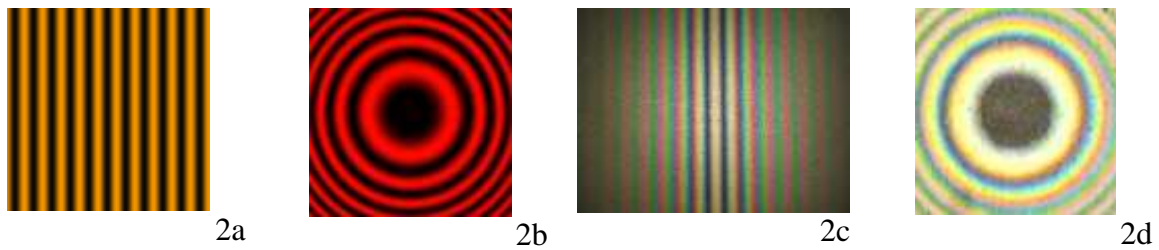


1b

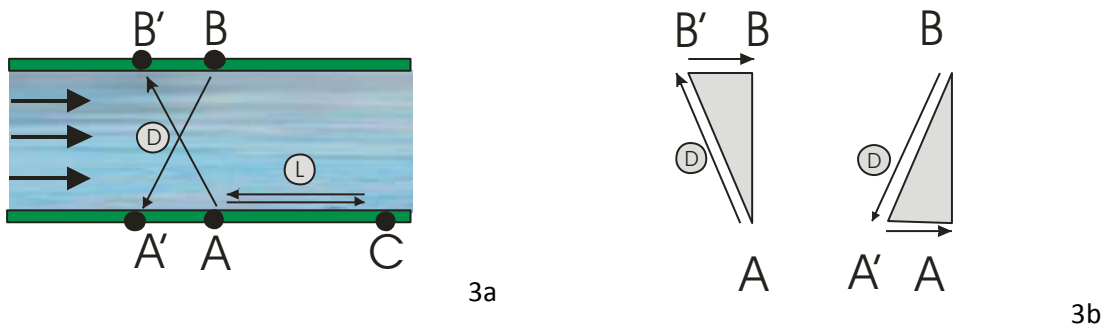
La luce proveniente da S si divide al centro di Bs, che chiamiamo punto A. Un raggio parziale va in B, si riflette in A e raggiunge l'osservatore in E. L'altro raggio parziale va in C, si riflette in A e raggiunge anch'esso E. Si può notare l'analogia tra i due diagrammi in 1a e 1b. Se (in 1b) i due fasci parziali percorrono un percorso comune AE, si può prevedere un'immagine di interferenza.

Se si lavora con luce monocromatica, si vedono effettivamente una serie di strisce o cerchi paralleli chiari e scuri. Se si lavora con la luce bianca, questi avranno i colori dell'arcobaleno. Abbiamo cercato su Internet e abbiamo trovato le immagini mostrate da 2a a 2c, come risultati dell'esperimento M&M. L'immagine 2d non lo è. Si tratta di un'immagine di alcuni anelli di Newton. Forse abbiamo cercato male, ma non abbiamo trovato cerchi colorati come risultati di un esperimento M&M. Forse si possono trovare. In tal caso, saranno molto simili a quelli

rappresentati nella Figura 2d. Torneremo sulla formazione di tali linee e cerchi in dettaglio più avanti nel testo.



Torniamo alla piscina. Lo sostituiamo con un fiume con acqua che scorre (3a). Ora è tutt'altro che certo che entrambi i nuotatori D e L arriveranno insieme in A dopo la loro nuotata. Perché supponiamo che l'acqua scorra abbastanza velocemente nella direzione da A a C, il nuotatore L farà una partenza straordinaria, ma una volta in C nuoterà molto più faticosamente contro corrente. Perderà più tempo del nuotatore D per tornare in A.



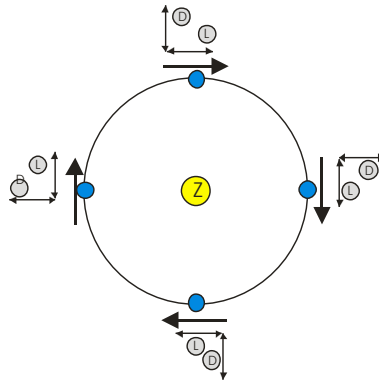
Lo si può dimostrare in modo semplice utilizzando il teorema di Pitagora (3b). Se c'è una corrente, D deve nuotare ininterrottamente da A alla direzione B', a sinistra di B, per raggiungere B. Ma allora ha percorso una distanza pari all'ipotenusa (AB') del triangolo rettangolo AB'B.

Se poi D vuole tornare ad A a nuoto da B, dovrà mantenere la direzione verso A', a sinistra di A. Allora avrà percorso una distanza pari al lato obliquo (BA') del triangolo rettangolo ABA'. In entrambi i casi, questa distanza è maggiore dell'incrocio diretto AB o BA.

A sua volta, il nuotatore L ha inizialmente la velocità dell'acqua che scorre con lui, ma al ritorno da C ad A ce l'ha contro. Un esempio numerico mostra che il nuotatore L impiegherà più tempo rispetto al nuotatore D.

Consideriamo quest'ultimo fatto, ma ora situato nell'interferometro come rappresentato nel disegno 1b. Entrambi i fasci di luce D e L attraversano l'etere statico. Ma poiché la terra non è mai ferma, l'interferometro, situato da qualche parte sulla terra, non mantiene sempre la stessa posizione rispetto all'etere.

Osserviamo il disegno 4. Se effettivamente l'intero spazio è riempito da una sostanza centrale statica e uniformemente distribuita, allora la terra (il cerchio blu), tra l'altro a causa del suo movimento intorno al sole (il cerchio giallo), nel corso di un anno fenderà questa sostanza centrale in una direzione sempre diversa.



4

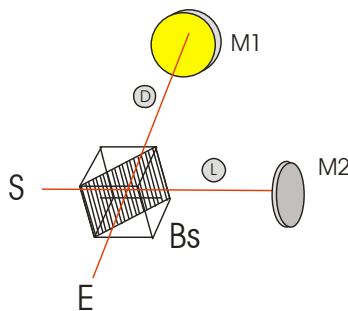
Con il cambio delle stagioni, la Terra si muove attraverso questa sostanza a volte in direzione trasversale, a volte in direzione longitudinale. Ma allora i due fasci di luce non arriveranno sempre insieme in A, così come non lo faranno i nostri nuotatori D e L.

Nell'esperimento M&M, l'aspettativa era che questa differenza di tempo si manifestasse attraverso un'immagine di interferenza alterata. Tuttavia, se eseguiti in modo meticoloso ed efficace, si scopre che i raggi luminosi D e L arrivano sempre insieme in A. E questo indipendentemente dalla posizione dell'interferometro rispetto alla sostanza presunta centro. Questo risultato, l'immagine di interferenza invariata ripetutamente osservata, portò Einstein a concludere che non è possibile stabilire un moto uniforme rispetto all'etere. E se nemmeno la sua esistenza in sé può essere dimostrata, sembra anche inutile sostenere che la terra e i corpi celesti si muovono attraverso di essa. Questo per quanto riguarda la descrizione di questo famoso esperimento e la sua interpretazione scientifica.

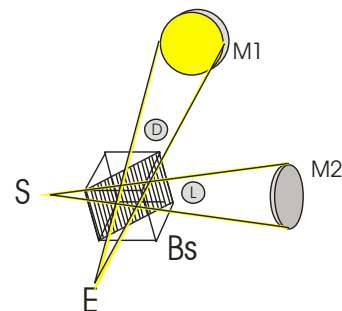
**2. Si cerca qualcosa e si trova qualcos'altro**

Anni fa, un po' ingenuamente e con troppa sicurezza, abbiamo tentato di rifare l'esperimento M&M, o meglio, una sua variante autoconcetta. Non abbiamo utilizzato specchi piani, ma due specchi cavi M1 e M2 (la "M" maiuscola di Mirror). Abbiamo allineato tutto con un laser (5a) e ci siamo assicurati che tutta la luce del laser fosse su un unico piano.

Successivamente (disegno 5b), abbiamo sostituito il laser con una sorgente di luce puntiforme bianca, una fibra di vetro con un diametro di 0,3 mm. In questo caso, entrambi i fasci di luce divergono da S e Bs verso entrambi gli specchi M1 e M2 per convergere nuovamente verso E dopo la riflessione.



5a

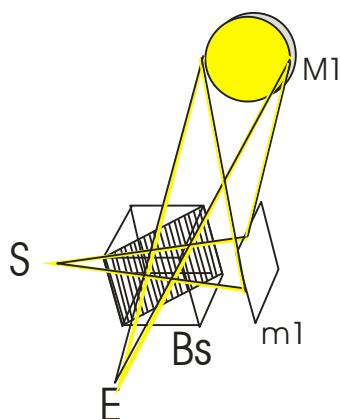


5b

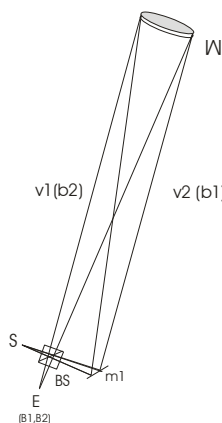
Una volta pronto il setup, abbiamo cercato con un po' di impazienza in E l'immagine di interferenza che si sarebbe dovuta formare. Come si è visto, non c'era la minima traccia di

un'interferenza, nemmeno incipiente. Frustrazione a tutto campo. Perché? È semplicemente impossibile per un dilettante mettere gli specchi M1 e M2 alla stessa distanza da Bs, entro una componente di poche onde luminose. Ma all'epoca non ce ne rendevamo affatto conto.

Poi, per una sorta di insoddisfazione, semplicemente perché non volevamo pensare di non aver ottenuto nulla con la nostra configurazione, abbiamo sostituito lo specchio cavo M2 con lo specchio piano più piccolo m1 (6a). Ma questa doveva essere molto più vicina a Bs, data la divergenza del fascio. Nel disegno 6b, le proporzioni sono leggermente più realistiche. Lo specchio M si trova infatti a circa 2500 mm (distanza del centro di curvatura  $k$ ) dallo splitter Bs.



6a

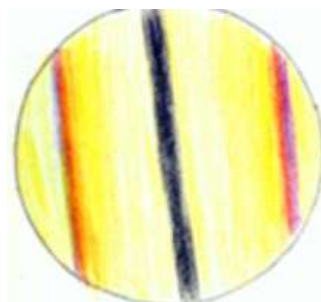


6b

L'immagine che si formò in E ci colpì con assoluto stupore. Abbiamo visto due superfici speculari - una superficie speculare per ogni percorso luminoso - che quasi coincidevano, con linee di interferenza che iniziavano a formarsi (7a). Se si regola leggermente lo specchio m1, le linee diventano improvvisamente molto più larghe (7b). Cambiando nuovamente la posizione di m1, abbiamo visto la superficie dello specchio riempirsi di alcuni cerchi concentrici, nei colori dell'arcobaleno (7c). Confrontando queste linee e questi cerchi piuttosto ampi con i risultati (da 2a a 2d) dell'esperimento con le M&M, può essere chiaro che, quasi per caso, ci siamo davvero imbattuti in qualcosa di insolito.



7a



7b

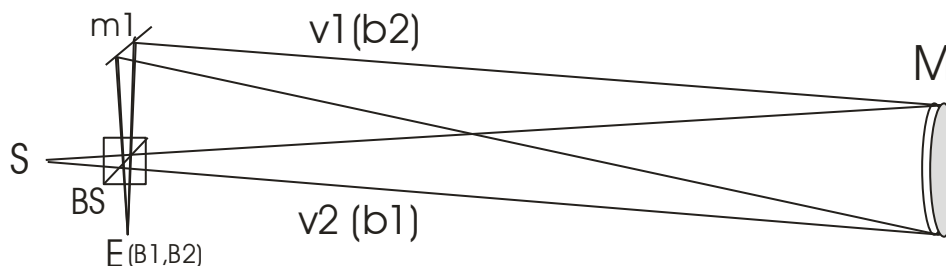


7c

E non avevamo alcuna spiegazione. Quando non si sa cosa si sta cercando, non si sa cosa si troverà. È quindi giunto il momento di informarsi seriamente e dettagliatamente su tutto questo. E questo è stato l'inizio di una ricerca affascinante, che alla fine ci ha fatto capire cosa stava succedendo. Inoltre, ci ha permesso di pensare e proporre una serie di altri esperimenti, alcuni dei quali sono stati effettivamente realizzati... ed è di questo che parla il presente testo.

### 3. Il nostro setup di base: un tipo di interferometro radiale..

Come già accennato, in un interferometro la luce viene divisa in due sottofasci che poi si ricongiungono e, in condizioni ben definite, possono dare luogo a interferenze, a spostamenti di colore. Di seguito descriviamo un tipo di interferometro radiale. Otteniamo:



8

S = Sorgente, sorgente luminosa puntiforme, luce bianca.

M = Specchio, (maiuscolo) specchio concavo, diametro 155 mm,  $f = \pm 1250$  mm

m = specchio, piccolo specchio piatto, con strato riflettente sulla parte superiore

BS = cubo di beam splitter per luce visiva, 50/50, 20 mm<sup>3</sup>.

E = occhio, luogo dell'osservatore

v = (minuscolo) distanza dell'oggetto

b = distanza dell'immagine (minuscola)

B = punto immagine (maiuscolo)

K (lettera maiuscola) = punto centrale di curvatura

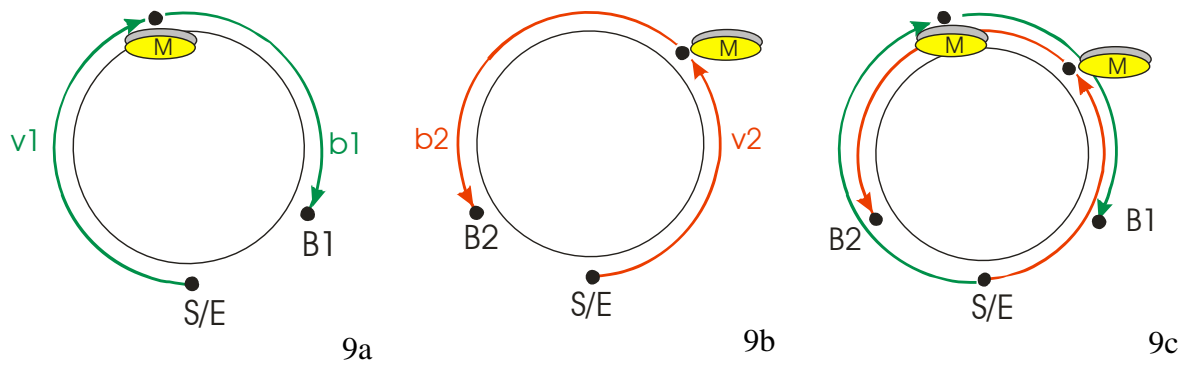
k (minuscolo) = distanza del punto centrale della curvatura

Questa disposizione è chiamata "disposizione di base".

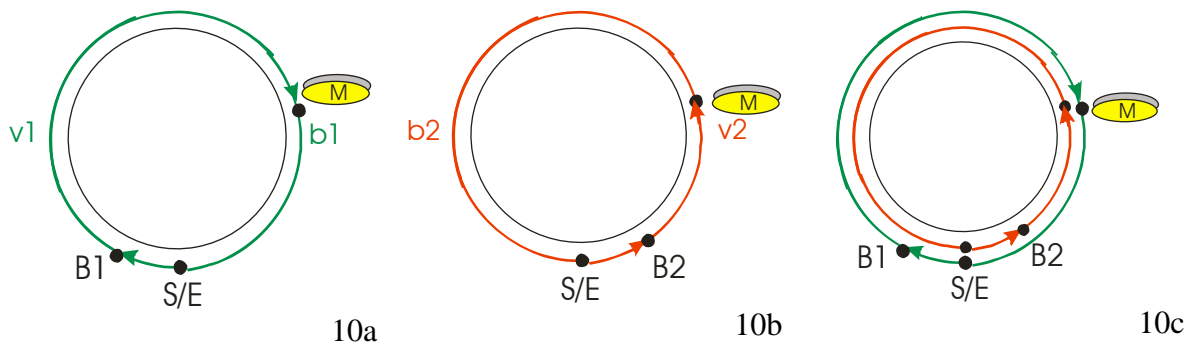
Si ha (disegno 8):  $v_1$ , la distanza dell'oggetto in senso orario. Questa va divergendo da S attraverso BS e  $m_1$  verso M, e riflette come immagine la distanza  $b_1$ , convergendo attraverso BS verso il punto  $B_1$ , di fronte all'occhio dell'osservatore E. La parte di luce che va verso S viene persa.

Abbiamo anche:  $v_2$ , la distanza dell'oggetto in senso antiorario, che diverge da S attraverso BS direttamente verso M, e che si riflette come distanza dell'immagine  $b_2$ , convergendo attraverso  $m_1$  e BS verso il punto  $B_2$ , di fronte all'occhio dell'osservatore E. Teoricamente, i punti  $B_1$  e  $B_2$  possono coincidere in E, ma possono anche trovarsi l'uno accanto all'altro, o dietro l'altro.

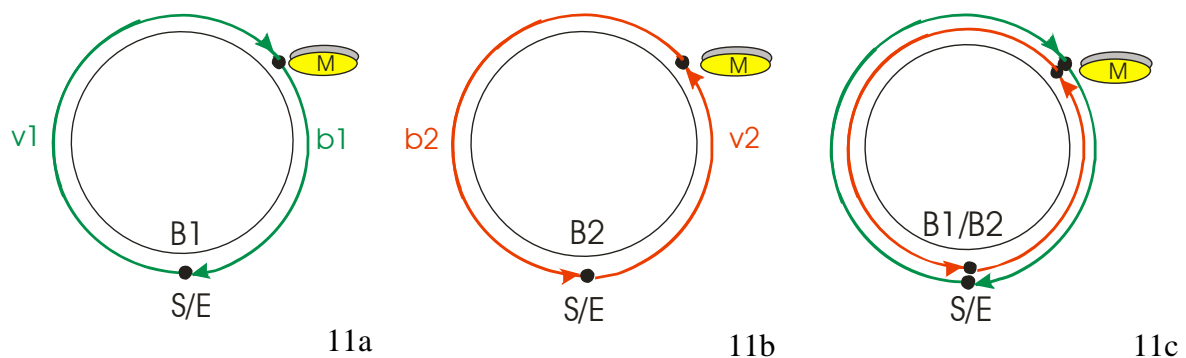
Cerchiamo di spiegarlo schematicamente come segue. Nel disegno 9a vediamo la sorgente luminosa S in basso, da cui parte il fascio di luce  $v_1$  in senso orario verso lo specchio M, che poi si riflette come  $b_1$  nel punto immagine  $B_1$ . Tuttavia, vediamo che  $B_1$  non raggiunge il punto E. L'intera circonferenza circolare non è stata percorsa. Il disegno 9b ci mostra  $v_2$  che raggiunge M in senso antiorario e poi converge attraverso  $b_2$  al punto immagine  $B_2$ . Anche in questo caso, il punto immagine  $B_2$  non coincide con E. Infine, il disegno 9c cerca di riassumere entrambi i disegni 9a e 9b. Si nota che entrambi i punti immagine  $B_1$  e  $B_2$  non coincidono, né raggiungono il punto E.



Ora guardate il disegno 10a. La luce parte da S in senso orario. Dopo la divergenza e la convergenza, il punto immagine B1 si trova ora oltre il punto E. La distanza percorsa è superiore alla circonferenza del cerchio. Nel disegno 10b, la luce parte da S in senso antiorario e il punto immagine cade oltre E dopo l'intera circonferenza. Il disegno 10c unisce i disegni 10a e 10b. I punti immagine B1 e B2 non si incontrano e cadono oltre E.



Nel disegno 11a, la luce diverge in senso orario verso M e converge in B1. Questo punto converge verso E. Il disegno 11b ci mostra la luce in senso antiorario, con B2 che converge anch'esso verso E. Il disegno 11c riassume i disegni 11a e 11b. Entrambi i punti, B1 e B2, coincidono l'uno con l'altro, e questo in E.



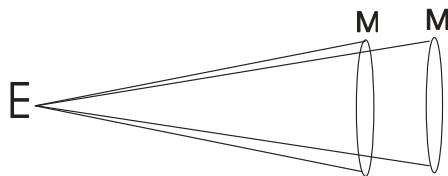
La spiegazione che segue è un tentativo di scegliere tutte le distanze nell'impostazione di base in modo tale che i punti immagine B1 e B2 coincidano effettivamente tra loro in E, cioè producano immagini di interferenza insolite per l'osservatore. Il margine entro il quale si manifesta l'interferenza è eccezionalmente ridotto. Se, ad esempio, B1 e B2 sono distanti solo mezzo millimetro, sono distanti mille (!) lunghezze d'onda e nella nostra configurazione non c'è più alcuna interferenza.



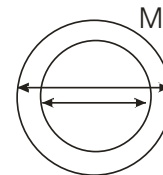


Se rifacciamo il calcolo per un altro valore, ad esempio  $y = 10$ , e ci atteniamo alla formula  $x = \sqrt{y^2 + f^2} - f$ , troviamo sempre che B1 e B2 coincidono. In altre parole, la nostra configurazione ci permette di far coincidere teoricamente due punti di luce coerenti in modo esatto.

Nella nostra configurazione di base, il percorso della luce b2 è più lungo del percorso della luce b1. La luce di M che ci raggiunge attraverso b2 ha percorso un cammino più lungo di quella di M che ci raggiunge attraverso b1. Quindi, per l'occhio, lo specchio M è più lontano nel primo caso che nel secondo. Questo ci illustra il disegno 13a.



13a



13b

Con i valori indicati, questa differenza di distanza reciproca è di 2505,01 - 2495,01 o 10 mm. Da E, sembra che la superficie dello specchio che vediamo attraverso un percorso di luce differisca leggermente nelle dimensioni rispetto alla superficie dello specchio che osserviamo attraverso l'altro percorso. Proprio per questo è un interferometro radiale. Questo ci mostra, molto esagerato, il disegno 13b.

Costruite questo interferometro e regolatelo così finemente da riempire quasi tutta la superficie dello specchio con un colore dell'interferometro. Successivamente, portiamo la mano nel percorso di luce. Le immagini che vediamo sono quelle riportate di seguito (14a, 14b, 14c). La mano riscalda l'aria circostante e questa turbolenza crea un ostacolo per la luce, facendola divergere. Quest'ultimo porta a variazioni di colore. Si vedono ciuffi di aria calda che salgono costantemente verso l'alto. Il tutto è molto dinamico e ci offre uno spettacolo affascinante.



14a



14b



14c

Abbiamo cercato di catturare queste immagini in digitale. Tuttavia, la nostra sorgente luminosa puntiforme ha un diametro di soli 0,3 mm, il diametro di un ago da agopuntura, ed è molto debole. In alcuni tentativi di scattare foto, le immagini sono così piccole e leggere che, quando vengono ingrandite digitalmente, mostrano solo un insieme di pixel eccessivamente sfocati. In questo testo preferiamo quindi attenerci a una rappresentazione reale in disegni.

Se consideriamo il nostro interferometro, risulta chiaro che la radialità diminuisce al diminuire della differenza di lunghezza tra i due sottofasci. Questo ci permetterà di allargare le bande di interferenza. La nostra configurazione diventerà quindi ancora più sensibile. Tuttavia, c'è un limite. Lo specchio piano m1 (cfr. Fig. 12) non può essere compresso in Bs. La distanza

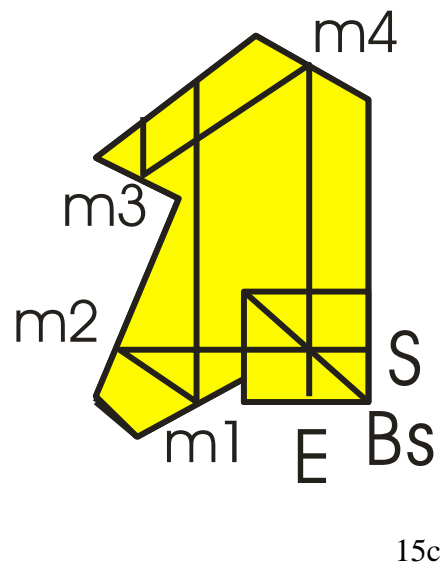
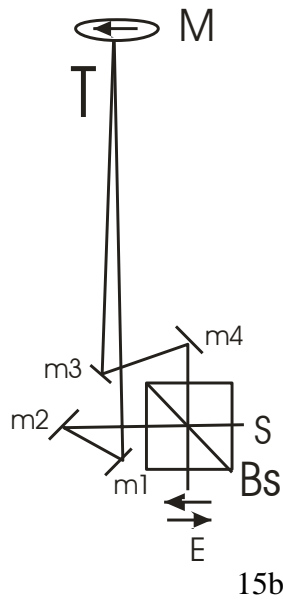
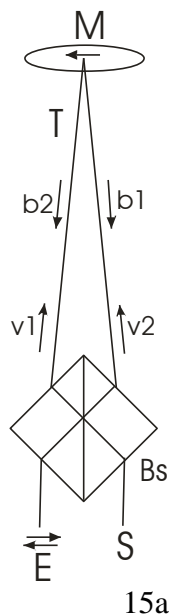
minima ottenuta per  $2y$  è stata di 7 mm. Tuttavia, questa differenza di percorso può essere eliminata in un altro modo. Vogliamo spiegarlo tra un attimo.

**In sintesi**, abbiamo descritto e calcolato un tipo di interferometro radiale. Questa è radiale e perché, viste dall'osservatore E, le due immagini di M non hanno la stessa dimensione, non lo stesso diametro. Tuttavia, i punti immagine B1 e B2 sono molto più vicini tra loro di quanto si pensasse, ad esempio, nel noto esperimento a due fenditure di Young. In questo modo è possibile ottenere immagini di interferenza molto più ampie in modo relativamente semplice. Il nostro strumento è così sensibile che mostra la risalita dell'aria causata dal calore della nostra mano in molti colori di interferenza alternati.

**4. Un setup di inversione**

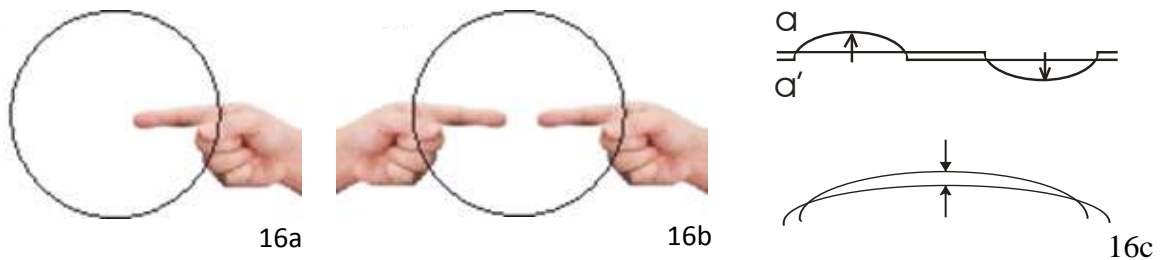
Un tipo di interferometro a inversione è già stato menzionato nel primo testo. Qui di seguito ne parleremo più approfonditamente. Il setup nell'immagine sottostante a sinistra (15a) ci mostra un'inversione con un Bs, come descritto in letteratura. Non siamo riusciti a generare un'ampia interferenza in questo senso. I raggi cadono già troppo obliquamente su Bs, dando luogo a linee di interferenza verticali, non a una superficie speculare in un unico colore di interferenza.

Abbiamo quindi aggirato il problema con la configurazione mostrata nell'immagine centrale (15b). Per rendere i percorsi luminosi il più possibile simili tra loro, abbiamo utilizzato una mappa (15c), un dettaglio del disegno 15b, in cui i due percorsi luminosi potevano essere resi quasi uguali in lunghezza, con una differenza di percorso inferiore a 1 mm. Gli specchi da m1 a m4 possono quindi essere posizionati con estrema precisione nel punto giusto.



La regolazione di tutte le parti in 15b con il laser richiede una grande precisione. Infatti, tutta la luce laser deve trovarsi sullo stesso piano. Utilizzando alcuni specchi ausiliari piatti e un pezzo di plastica trasparente, abbiamo verificato se i raggi laser distinti si intersecano effettivamente o se non si limitano a incrociarsi a una distanza reciproca.

In questo interferometro a inversione, una metà dell'immagine (16a) si fonde con l'immagine speculare dell'altra metà (16b). Se non superiamo manualmente la linea centrale dello specchio, un'onda disturbata interferisce con un'onda non disturbata. Immaginate l'onda perturbata come un arco e l'onda non perturbata come una linea orizzontale (16c in alto). La loro differenza reciproca, indicata dalla freccia, è molto più grande che in un interferometro radiale. Lo strumento è quindi molto più sensibile. Vediamo un cambiamento di colore molto più intenso. Si nota quindi che in un interferometro radiale (16c in basso) la differenza tra due curve è minore della differenza tra una curva e una retta.



Se si posiziona il dito nel percorso della luce, si ottiene un risultato piuttosto sorprendente (17). Lo abbiamo già descritto in dettaglio nel primo testo.

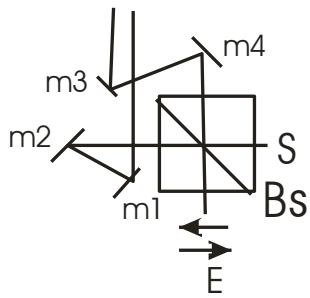


17

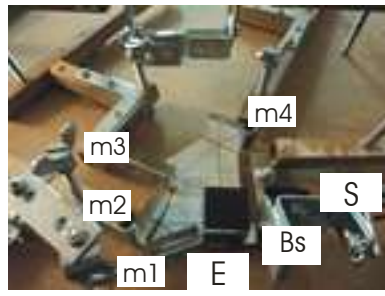
Tuttavia, l'immagine non è mai statica. Qualsiasi vibrazione del banco ottico, per quanto minima, è tale che una metà dell'immagine reagisce in modo "opposto" all'altra metà. Chiariamo questo punto come segue. Teniamo entrambe le mani con le punte delle dita unite, senza rilasciarle. Se muoviamo una mano in avanti o indietro, l'altra la segue simultaneamente. Ecco come funziona con le vibrazioni in un normale interferometro. Non è così in un interferometro a inversione. Per restare all'esempio delle mani: quando c'è una scossa, una mano si muove in avanti, ma l'altra indietro della stessa quantità. E poiché il nostro banco ottico vibra continuamente - stiamo parlando di movimenti estremamente minimi - l'immagine cambia continuamente e non è facile guardare con calma ciò che viene mostrato. Rimangono letteralmente delle "istantanee" di un evento estremamente dinamico.

Il disegno 18a mostra un dettaglio della configurazione di 15b. Nella figura 18b, prestare attenzione allo specchio verticale m4. In essa vediamo l'immagine speculare delle linee tracciate sulla mappa. Se regoliamo lo specchio m4 in modo da vedere allineate la linea tracciata e la sua immagine speculare, sappiamo che la regolazione è già abbastanza precisa. Facciamo attenzione che tutta la luce laser rimanga sullo stesso piano. Questo vale ovviamente per l'allineamento di tutti gli specchi. La foto 18c dà un'idea del banco ottico. Lo specchio M si

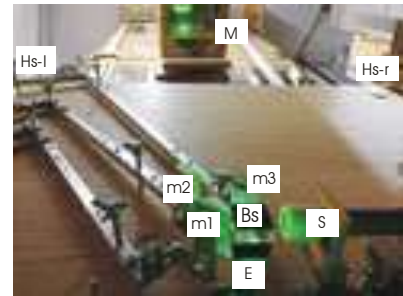
trova su un carrello, che può essere avvicinato o allontanato con precisione, o meglio "guidato", tramite una trave sotto il banco ottico con viti di regolazione.



18a



18b

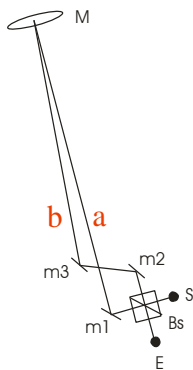


18c

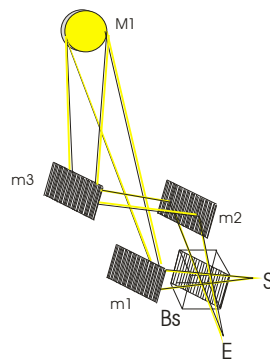
Questo è quanto per la descrizione di questo interferometro a inversione. Passiamo ora al prossimo esperimento.

**5. Una configurazione con radialità = 0**

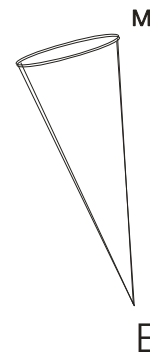
Per rendere più sensibile la nostra configurazione di base, riduciamo ulteriormente la differenza di percorso tra i due fasci parziali. In altre parole, rendiamo il percorso della luce a o v1 e il percorso della luce b o v2 ugualmente lunghi. A questo scopo, aggiungiamo alla configurazione di base gli specchi piani m2 e m3. Possiamo vedere che nel disegno (19a)



19a



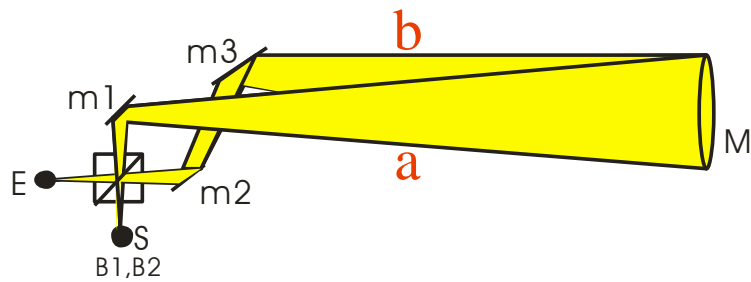
19b



19c

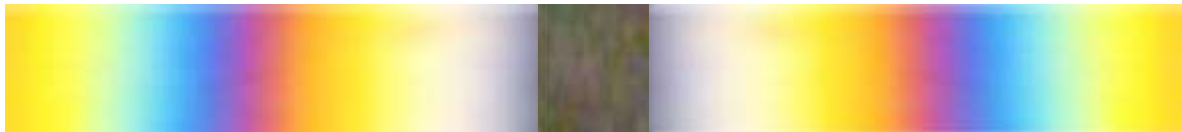
La Figura 19b mostra il diagramma che diverge e converge. La Figura 19c illustra che da E vediamo lo specchio M a distanze uguali a e b. In altri termini, lo specchio M è illuminato dal suo centro di curvatura K. Pertanto, v1, b1, v2 e b2 diventano tutti ugualmente lunghi. In altri termini, nella nostra formula  $x = \sqrt{y^2 + f^2} - f$ , x e y mirano a 0 e i punti immagine B1 e B2 coincidono in E. Di conseguenza, la nostra configurazione non è più un interferometro radiale. Tuttavia, abbiamo ottenuto uno strumento eccezionalmente sensibile che, secondo le nostre previsioni, riprodurrà piccolissime perturbazioni nel percorso della luce al variare del colore.

Costruite quindi la configurazione come mostrato nel disegno 20 qui sotto.



20

Una banda di interferenza bella e ampia si manifesta abbastanza rapidamente dopo l'allineamento. (21).



21

Alla fine, con un allineamento estremamente preciso, diventa così ampio da superare di molte volte il diametro del nostro specchio. Possiamo quindi regolare lo specchio in modo che l'intera superficie venga riempita ogni volta con un singolo colore di interferenza. Lo vediamo presentato di seguito (22).

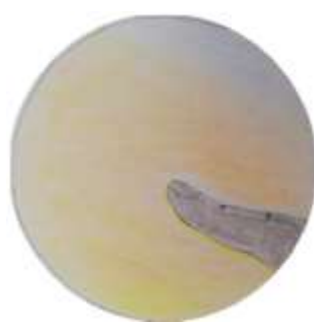


22

Se ci regoliamo su un colore di sfondo e posizioniamo la mano nel percorso di luce proprio davanti allo specchio, vediamo, a seconda del colore scelto, ciò che è disegnato e colorato sotto (23a, 23b, 23c). Non notiamo più la turbolenza violenta che si manifesta, ad esempio, con l'interferometro invertito (17), o anche con le immagini del nostro setup di base (14a, 14b, 14c). No, l'immagine è ora piuttosto statica. Possiamo continuare a guardare in silenzio.



23a



23b



23c

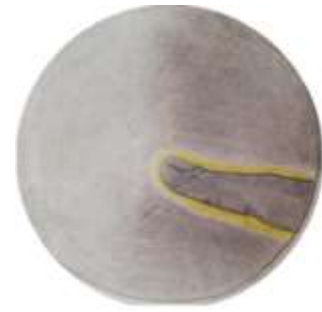
Infine, regoliamo gradualmente il setup per l'interferenza distruttiva (24a) e portiamo il dito nel percorso della luce (24b, 24c).



24a



24b

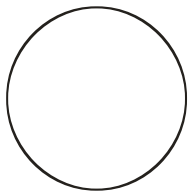


24c

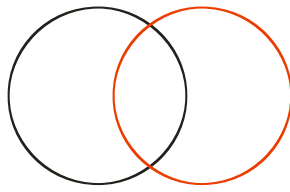
Si nota una banda bianco-gialla proprio intorno al dito. A quanto pare, c'è "qualcosa", una materia fine, che disturba la distruzione così sensibile, e forse in quel luogo rende l'interferenza persino costruttiva. Il fatto che la banda venga momentaneamente lasciata indietro quando si muove il dito avanti e indietro indica che si tratta di un fenomeno diverso dalla diffrazione.

**6. Young e Newton: due facce dello stesso evento.**

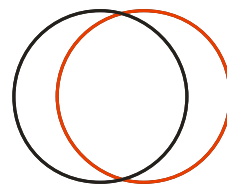
Far scorrere gradualmente due lucidi su cui è stampato un cerchio uno sull'altro. Si ottiene (da 25b a 25d) :



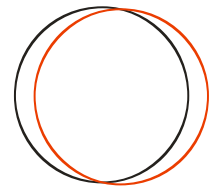
25a



25b



25c

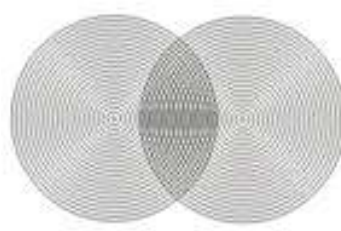


25d

Successivamente, facciamo scorrere gradualmente due lucidi, con una serie di cerchi concentrici stampati su ciascun lucido (26a), l'uno sull'altro. Iniziano a formarsi schemi ben definiti. Si ottiene (da 26b a 26d) :



26a



26b



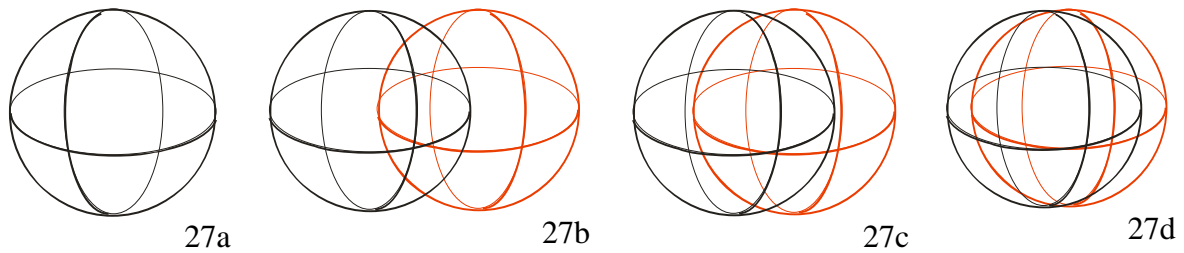
26c



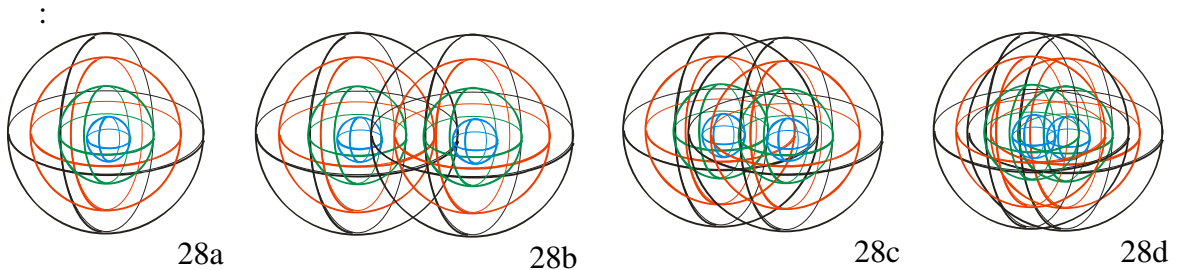
26d

I motivi scuri, che si formano più chiaramente nel disegno 26d, nascono dal fatto che due curve, ognuna con una curvatura leggermente diversa, si toccano e sembrano addirittura confluire l'una nell'altra per un pezzo. In questo modo sembrano formare insieme un arco leggermente più spesso.

Immaginiamo ora che non si tratti di cerchi, situati in un piano, ma di sfere, che hanno una lunghezza, una larghezza e un'altezza (27a). Immaginate che gradualmente scivolino sempre più l'uno nell'altro. Si ottiene (da 27b a 27d) :



Immaginiamo poi che ognuno sia un insieme di quattro sfere concentriche (28a). Queste due sequenze scivolano gradualmente l'una nell'altra. Si ottiene (da 28b a 28d) :

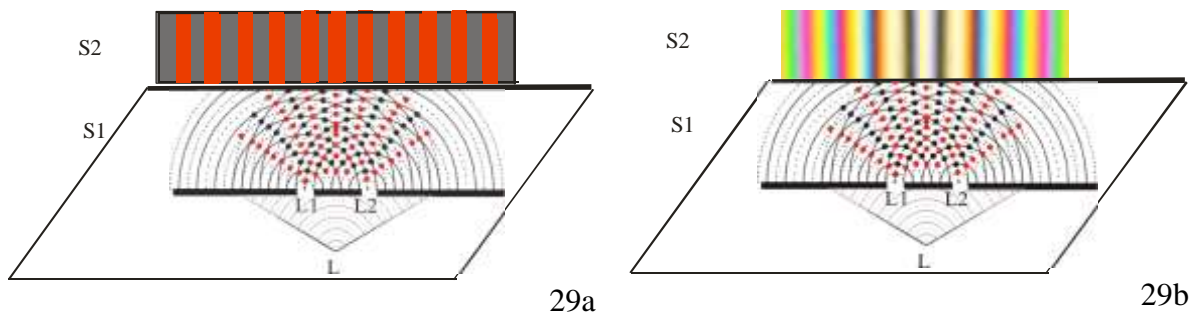


L'immagine cartacea o digitale ne fornisce una rappresentazione statica. Per maggiore chiarezza, nei disegni da 28a a 28d abbiamo utilizzato i colori. Tuttavia, nel caso delle sorgenti luminose, immaginiamo che siano di un solo colore: luce laser monocromatica o luce bianca. Quest'ultimo è una raccolta dei colori dell'arcobaleno.

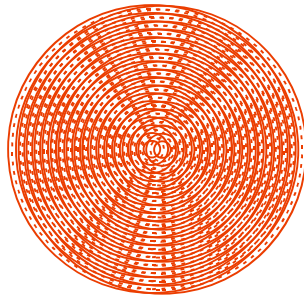
Immaginate che una di queste serie di sfere concentriche (28a) si espanda continuamente e uniformemente, ovviamente alla velocità della luce, e che dal centro si generino continuamente nuove sfere. Tenendo ben presente questo aspetto, si può approssimativamente immaginare cosa succede con una sorgente luminosa puntiforme, ad esempio una sottile fibra di vetro, che emette luce in tutte le direzioni.

Anche se nei nostri disegni (da 28a a 28d) ogni punto di luce genera ancora solo 4 onde, il quadro diventa già piuttosto complicato.

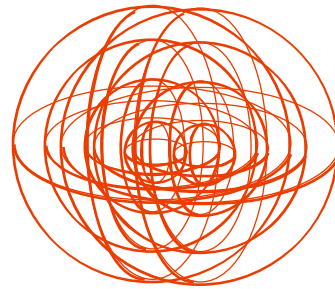
Nel primo testo abbiamo discusso in dettaglio l'esperimento di Young a due fenditure, sia per la luce monocromatica (ad esempio la luce rossa del laser), sia per la luce bianca. Ricordiamo i disegni 31 e 32 del primo testo, che riproduciamo qui. Ora i disegni 29a e 29b.



Riproduciamo il disegno 26d qui sotto, ora come disegno 30a, accanto al quale (in 30b) troviamo il disegno 28d. Entrambi, però, di colore rosso.



30a



30b

Provate ora a immaginare che il disegno a sinistra (30a) non sia una rappresentazione di cerchi in un piano, ma una rappresentazione spaziale di due serie di sfere concentriche schiacciate l'una sull'altra. Se integrassimo il disegno 30b con tante sfere quante ne sono rappresentate nel disegno 30a, il disegno 30b avrebbe lo stesso aspetto del 30a, compresi i modelli di interferenza simili.

Ricordiamo che l'occhio non vede le singole onde luminose. Vede la loro interferenza. Come nel disegno 26d i motivi nascono perché le parti di due cerchi, ciascuno con una curvatura quasi simile, si toccano e in qualche modo si compenetrano, così anche qui. Solo che ora non si tratta di cerchi, ma di sfere. Dove due sfere, con curvatura quasi uguale, si toccano e si compenetrano, si vede in quel punto il guscio sferico comune.

Ciò ha dato origine alle strisce di interferenza rosse e nere del disegno 29a, che sono state tracciate sullo schermo S2. Si noti che le sorgenti luminose puntiformi L1 e L2, viste dall'osservatore L, sono adiacenti l'una all'altra.

Tuttavia, questo non è l'unico punto di vista possibile. I punti luce possono anche trovarsi uno dietro l'altro. Provate a chiarirlo con il disegno 31 qui sotto. Vediamo due punti di luce rossa A e B, ciascuno dei quali genera una serie di sfere concentriche.



31

Per l'osservatore 1 (in basso), i punti A e B sono vicini e generano sullo schermo A (in alto) una serie di linee parallele rosse e nere, linee di interferenza costruttiva e distruttiva, come ci ha mostrato l'esperimento di Young.

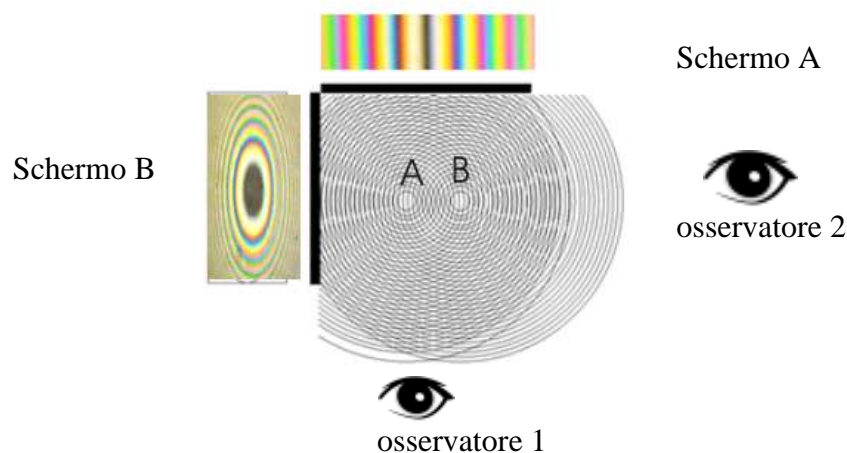
Per l'osservatore 2 (a destra), i punti A e B non sono vicini, ma dietro l'altro e generano sullo schermo B (a sinistra) una serie di cerchi concentrici rossi e neri, cerchi di interferenza



costruttiva e distruttiva, i ben noti anelli newtoniani. Newton le scoprì ma non riuscì a spiegarle, perché per lui la luce consisteva in particelle, non in onde.

Il disegno 31 mostra il collegamento tra l'esperimento a due fenditure di Young e gli anelli di Newton. Sono come due facce dello stesso evento di interferenza. Inoltre, se posizioniamo i due punti A e B non uno accanto all'altro o sotto di esso, ma un po' più in diagonale, le curve si mostrerebbero su uno schermo, situato tra gli schermi A e B, come una transizione tra cerchi e linee. Torneremo su questa importante distinzione, la posizione dei punti A e B, uno accanto all'altro o uno dietro l'altro, più avanti nel testo.

Sopra abbiamo parlato essenzialmente di luce di un solo colore. Tuttavia, noi lavoriamo con la luce bianca. Sui nostri schermi vedremo quindi strisce o cerchi di interferenza colorati, come illustrato nel disegno 32. Questo chiarisce perché all'inizio dei nostri esperimenti (disegni 7a, 7b e 7c) ci sono stati mostrati alcuni cerchi e linee di cui non abbiamo capito il significato.



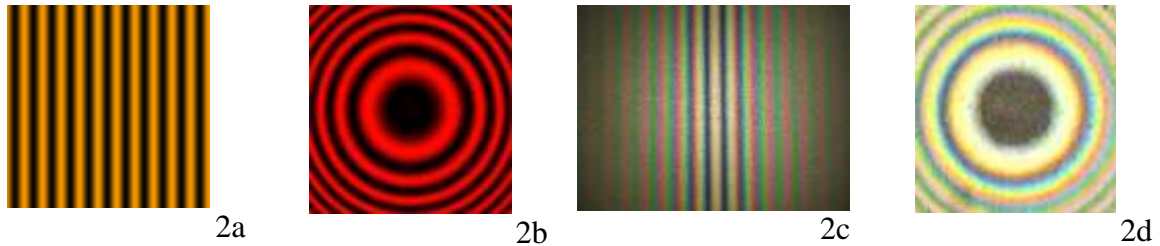
32

E questo per quanto riguarda la connessione tra gli esperimenti di Young e quelli di Newton, come due facce dello stesso evento.

### 7. E cos'altro?

Tutto ciò porta ad alcune affascinanti riflessioni sull'esperimento M&M. Chiariamo. Richiamare le immagini da 2a a 2d. Li ripetiamo qui. Come già accennato, l'esperimento M&M condotto nel 1887 mostrava, da un lato, una serie di linee verticali di interferenza costruttiva intervallate da linee di interferenza distruttiva (disegni 2a e 2c). Dall'altro lato, una serie di cerchi di interferenza costruttiva intervallati da cerchi di interferenza distruttiva (disegni 2b e 2d). Le figure 2a e 2b mostrano la luce di un colore. Le figure 2c e 2d mostrano l'interferenza della luce bianca.

La Figura 2a mostra noi linee, non bande larghe. Al centro dell'immagine 2c si vede una linea nera, non una banda larga. Nelle figure 2b e 2d, vediamo al centro un cerchio di interferenza distruttiva. Tuttavia, questo non riempie l'intera superficie dello specchio.



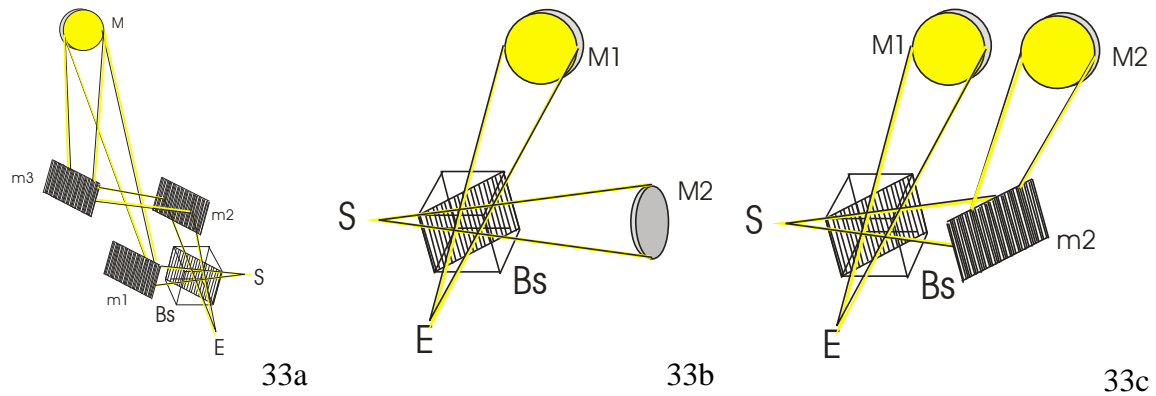
Osservando il disegno 32, che ci ha mostrato il collegamento tra l'esperimento di Young e gli anelli di Newton, possiamo allora supporre che i due punti B1 e B2, per l'"osservatore" in E "non coincidano realmente", ma al contrario, per quanto riguarda le linee, si trovino uno accanto all'altro? Per quanto riguarda i cerchi (2b e 2d), i punti immagine B1 e B2 non coincidono, ma si trovano uno dietro l'altro. In caso contrario, il cerchio scuro riempirebbe l'intera superficie dello specchio.

Allora ci si può chiedere se l'esperimento M&M, con la nostra tecnica attuale, possa essere messo a punto in modo che i due punti immagine in E non si trovino uno accanto all'altro o dietro l'altro, ma coincidano (quasi). Questo è evidente almeno dagli esperimenti con la cosiddetta "interferometria di Nulling" o è anche evidente dalla precisione con cui sono allineati, ad esempio, i 18 segmenti del telescopio James Webb. Chiariamo.

*'Interferometria di annullamento'*. Pensate al mondo stellare. La domanda se esistano altri pianeti come la nostra Terra in altre parti dell'universo è di grande attualità nel nostro tempo. Trovare tali pianeti, tuttavia, non è così facile. Se sono troppo lontani da una stella, sono troppo poco luminosi. Se sono troppo vicini, l'intensità della luce accecante di questo oggetto celeste impedisce di osservare il pianeta. Per questo motivo si ricorre, tra l'altro, all'interferenza distruttiva: i fasci di luce possono, in determinate condizioni, spegnersi da soli. Lo abbiamo già spiegato. La luce di due telescopi equivalenti e strettamente distanziati, sintonizzati sulla stessa stella, può essere unita, ma con una differenza di mezza lunghezza d'onda o di un multiplo non accoppiato. In questo modo, la luce delle stelle viene neutralizzata. Ma questo non vale necessariamente per la luce del pianeta che si trova vicino a quella stella. In conclusione, la luce della stella viene attenuata o spenta, ma non quella del pianeta, che si trova a una distanza diversa dai telescopi. Così, quest'ultimo diventa visibile.

Questa accuratezza di ampio respiro la ritroviamo anche nella sintonizzazione *del telescopio James Webb*. I 18 singoli segmenti esagonali dello specchio principale sono sintonizzati tra loro in modo tale che la luce proveniente da questi segmenti possa essere allineata al nanometro più vicino ( $1 \times 10^{-9}$  m, ovvero un milionesimo di millimetro (!)).

La domanda che sorge spontanea è: chi ha bisogno oggi di un esperimento M&M eseguito in modo molto più preciso? Probabilmente nessuno, almeno non nella configurazione a specchio piatto. Ma cosa succede se viene ripetuto con grande precisione, non con la luce laser, ma con la luce bianca, come mostrato nella configurazione con uno specchio cavo e un percorso di luce uguale (33a), o con due specchi cavi (33b o 33c).



: E se anche qui si ottiene un'interferenza distruttiva e poi si porta la mano sul sentiero della luce? Oppure pensiamo oltre. Cosa fare se si lavora con specchi più grandi? Cosa si mostrerà allora dell'uomo? Per ora, queste rimangono domande particolarmente affascinanti.

Osserviamo il disegno 33b. Se, ad esempio, la mano viene portata davanti a uno degli specchi M1 o M2, in E si mescolano un'immagine distorta e una non distorta. Noi stessi abbiamo ottenuto qualcosa di simile con il setup di inversione (34) di cui abbiamo già parlato al punto 4 (e al disegno 17).

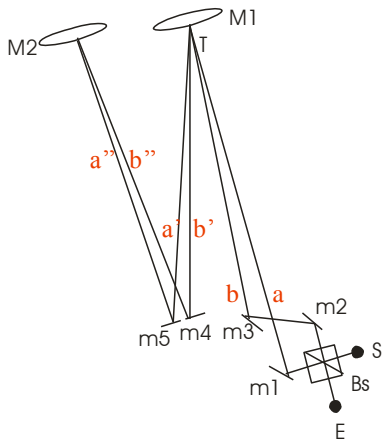


34

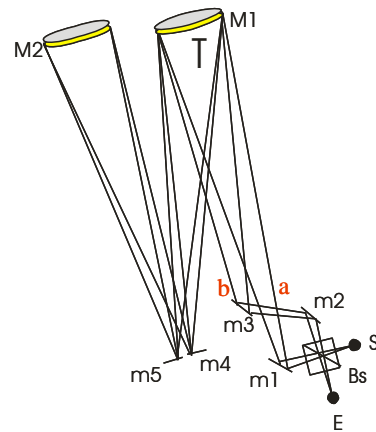
Come già detto, in questo tipo di interferometro una metà dell'immagine si mescola con l'immagine speculare dell'altra metà. Se non superiamo manualmente la linea centrale dello specchio, un'onda disturbata interferisce con un'onda non disturbata. Questo porta a turbolenze molto violente e a un'immagine instabile che vibra continuamente.

Con la tecnologia attuale, dovrebbe essere possibile eliminare le vibrazioni. Se si realizza la disposizione descritta in 33b (o in 33c), non si ha più un'immagine con l'immagine speculare, ma una singola immagine che interferisce con un'immagine indisturbata. Anche in questo caso, resta da chiedersi che cosa emergerà se la mano viene portata nel percorso della luce. E cosa succede se, inoltre, si regola questo interferometro per l'interferenza distruttiva?

Nel setup 36a è stato aggiunto un secondo specchio M2. Si riconosce in questo una configurazione derivata di 33a. Abbiamo mostrato solo le linee laser. Il disegno 36b mostra la stessa configurazione, ma ora con fasci divergenti e convergenti. Se ci si pensa un attimo, si nota che un disturbo (turbolenza T, ad esempio la mano nel percorso della luce di M1) viene attraversato ancora una volta, quindi i disturbi diventano cumulativi e lo strumento diventa due volte più sensibile. Gli specchi m4 e m5 in realtà non sono vicini, ma appena sopra m2 e m3, quindi la parallasse diventa trascurabile. Abbiamo costruito questa configurazione, ma non siamo riusciti a regolarla senza vibrazioni.

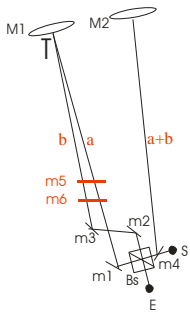


36a



36b

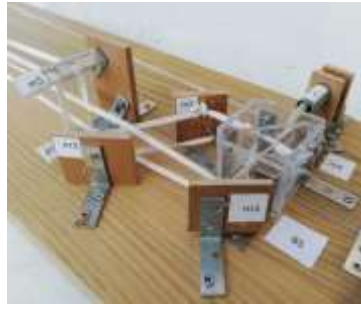
Infine, il disegno 37a mostra una vista dall'alto di una disposizione che porta a un'interferenza di due interferenze. Gli specchietti rossi m5 e m6 indicano la presenza di due livelli. Le figure da 37b a 37d cercano di chiarire tutto questo con l'aiuto di alcune foto di un modello. L'immagine E1, che si presenta nella parte inferiore di Bs (37d), fornisce un'interferenza iniziale del sistema M1. L'immagine in E2, che si presenta in Bs appena sopra E1, dopo che la luce passa attraverso il sistema M1, M2 e di nuovo M1, ci dà l'immagine di questa doppia interferenza. Tuttavia, l'immagine in E2 è più debole di quella in E1 perché ha attraversato Bs una seconda volta nel suo percorso luminoso. Se non lavorassimo su due livelli, i punti E1 ed E2 coinciderebbero in Bs e l'immagine di E2 sarebbe oscurata dalla luce più intensa di E1. Non faremo ulteriori commenti su questo accordo. Chi ha un po' di dimestichezza con questi diagrammi e ci riflette un po' su, troverà sicuramente la sua strada. Abbiamo costruito anche questa configurazione, ma non siamo riusciti a metterla a punto con precisione.



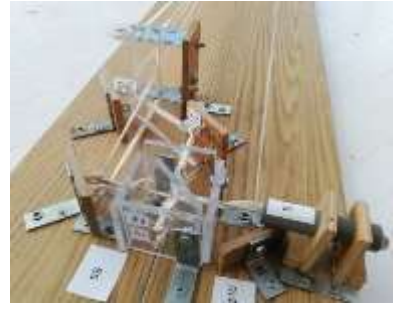
37a



37b



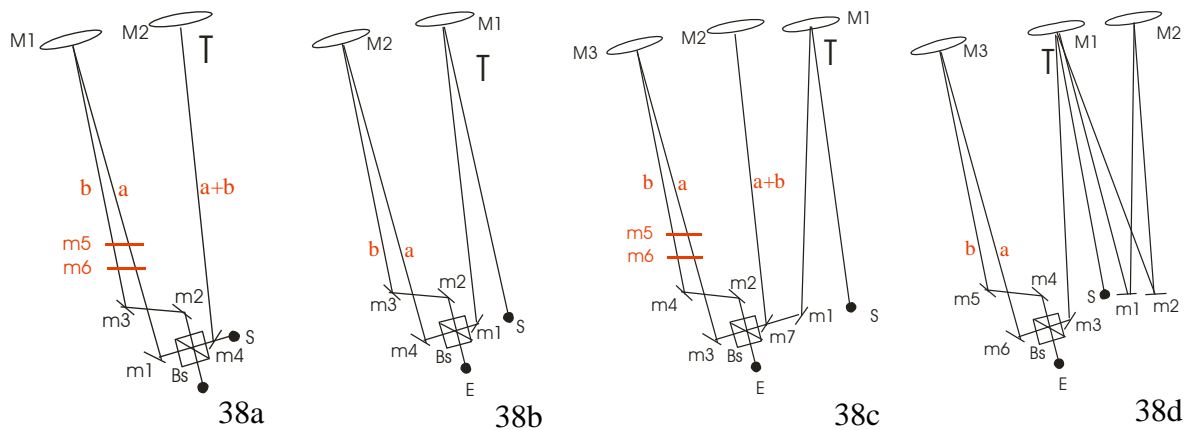
37c



37d

Se una singola interferenza rivela già una tale ricchezza cromatica, che dire dell'interferenza di due interferenze descritta sopra? Se questo sistema verrà mai costruito con successo, sarà uno strumento incredibilmente sensibile che potrebbe mostrarci molte cose altrimenti nascoste all'occhio comune.

E oltre a questo, si possono pensare molte varianti. Nei diagrammi sottostanti, si noti la posizione della turbolenza T, dove l'interferenza, ad esempio la mano, viene portata nel percorso della luce.



Lo schema 38a è analogo al 37a, tranne che per il fatto che l'interferenza avviene subito prima di M2. Un'immagine di interferenza indisturbata (nel sistema M1) viene disturbata nel sistema M2 e interferisce nuovamente nel sistema M1.

Lo schema 38b è la configurazione di base derivata, con un percorso di luce uguale. Poiché l'interferenza avviene prima di M1, non c'è più parallasse nel sistema M2.

Lo schema 38c è derivato dal 37a, ma la perturbazione T avviene al di fuori dell'interferometro vero e proprio, quindi anche in questo caso non c'è più parallasse.

Lo schema 38d è analogo allo schema 38b, tranne che per il fatto che la perturbazione T viene eseguita per un tempo supplementare, rendendo lo strumento doppiamente sensibile.

Si può apparentemente continuare a proporre variazioni... Tuttavia, queste ultime configurazioni superano di gran lunga i limiti di ciò che è possibile fare per un dilettante. Pensando a tutti i nostri armeggi, più di una volta abbiamo pensato che con l'interferenza della luce bianca c'è ancora un intero campo aperto alla scienza e tanto da scoprire.

## 8. Per concludere.

L'esperimento M&M fece decidere a Einstein di non considerare un etere la cui esistenza non può essere dimostrata. Dopo tutti i nostri esperimenti, è davvero questa l'ultima parola e l'unica decisione possibile? Sarebbe un'ipotesi troppo azzardata supporre che con un esperimento M&M condotto con molta più attenzione e con la luce bianca si potrebbe comunque dimostrare l'esistenza di una sostanza sottile? E se così fosse, non sarebbe un curioso scherzo del destino? Lo stesso esperimento fornisce poi prima una smentita, poi una conferma di quanto ipotizzato all'inizio....

Il paragrafo iniziale del nostro testo, Parte I, recita: "In quasi tutti i tempi e in quasi tutte le culture non occidentali si sentono e si leggono testimonianze di persone che sostengono che non solo abbiamo un corpo biologico, ma che abbiamo anche un insieme di corpi sottili, che insieme costituiscono la cosiddetta aura. Si dice che sia localizzato in diversi strati sottili intorno al corpo biologico".

Sebbene non sia uniformemente distribuita come si ipotizza nell'esperimento M&M, l'idea dell'esistenza di una sostanza fine è peculiare di tutta la nostra storia culturale.

Questo testo intendeva affrontare in modo scientifico l'esistenza o meno della "materia fine". Rifiutare a priori qualsiasi ricerca su questo argomento non sarebbe un atteggiamento scientifico. Cosa c'è di male nel formulare un'ipotesi, ideare un esperimento per indagare

quell'ipotesi, realizzare l'esperimento in modo efficace e rassegnarsi ai suoi risultati: verifica o falsificazione. Ci sembra di essere stati fedeli a questo metodo nei nostri esperimenti.

Forse, così facendo, alcuni risultati vanno contro la mentalità corrente. Vogliamo vedere la realtà attraverso le lenti dei nostri pregiudizi? O vogliamo adeguare la nostra mentalità a ciò che è fedele alla realtà? La storia ci insegna che quando si esprimono giudizi che vanno contro l'opinione prevalente, non è un male esercitare ancora cautela. Si rimanda ad esempio a J. Margolis, *Ces savants excommuniés*, e ci si limita a un esempio tratto dalla traduzione di un articolo, pubblicato sul Sunday Times.

"Prima che la loro teoria venisse accettata, L. Pasteur (1822/1895), il fondatore della microbiologia, e A. Einstein (1879/1955), noto per la sua teoria della relatività, furono liquidati come "pericolosi devianti". Quando l'inventore Th. Edison (1847/1931) mostrò la sua lampadina elettrica, fu accusato di "mistificazione". I fratelli Wilbur (1867/1912) e Orville (1871/1948) Wright, che avevano realizzato per la prima volta nella storia un volo a motore con un aeroplano autocostruito, per due anni non furono nemmeno creduti "perché la scienza aveva stabilito che una macchina, se pesa più dell'aria, non può assolutamente volare". Quando il geologo Alfred Wegener (1880/1930), recitò la teoria della 'deriva' delle terre solide, il movimento che i continenti compiono l'uno rispetto all'altro, fu ridicolizzato". Alla faccia del Sunday Times.

Si può aggiungere, tra l'altro, che G. Cantor (1845/1918), il fondatore della moderna teoria degli insiemi, subì la stessa sorte e morì in un istituto psichiatrico, mezzo matto per l'incomprensione. Il suo lavoro è oggi ampiamente accettato e apprezzato. Copernico (1473/1543) fece pubblicare le sue scoperte solo alla fine della sua vita per paura di sanzioni. Galilei (1564/1642) fu condannato nel 1633 per aver sostenuto che era il sole a girare intorno alla terra e non viceversa. La sua richiesta di testare le sue affermazioni nel suo visore è stata ignorata. Solo nel 1978 (!) è stato riabilitato dalle autorità religiose. Chiunque si informi un po' di più può aggiungere qualcosa a queste valutazioni errate e scoprirà che non è sempre facile avere un'opinione che va contro la mentalità prevalente.

Ciò che ha guidato tutti i nostri esperimenti è la forte convinzione che esista un'aura e quindi una sostanza fine. Come già detto, i sensitivi affermano di percepire qualcosa di questa sostanza, i veggenti affermano di vederla e alcuni maghi affermano inoltre di essere in grado di manipolarla, ad esempio di ottenere cure con essa. È troppo facile dimenticarlo, ma una persona con un'educazione critica ne trova un uso responsabile oltre ai numerosi abusi. Alcune malattie (cancro, sciatica...) si manifestano, secondo chi è in grado di percepirlo in chiaroveggenza, come una macchia scura nell'aura, una macchia che gradualmente continua la sua ripercussione, il suo effetto patogeno, nel corpo biologico.

Coloro che, inoltre, riescono a percepire manticamente l'effetto di forza energetica di una preghiera, come un flusso di miriadi di sottilissimi punti di luce, sostengono che si tratta di un afflusso di una sottile energia materiale di guarigione che minaccia e - almeno in parte - distrugge le energie oscure, patogene. La convinzione, la profonda convinzione che in queste ipotesi ci sia una realtà, potrebbe essere un'idea forza per non trascurare nessuna ricerca fisica in questo vasto campo. Lasciamo che siano la scienza e il tempo a fare chiarezza.

Possiamo concludere tutto questo con il paragrafo conclusivo del nostro primo testo? "Forse tutti i nostri esperimenti e le nostre riflessioni possono stimolare ulteriori ricerche a un livello più alto e professionale. Resta da chiedersi cosa si vedrebbe se telescopi più grandi, con

specchi del diametro di 2 metri o più, e con una precisione incomparabilmente migliore della nostra, mettessero letteralmente sotto i riflettori l'intero uomo. Verranno allora alla luce altre prospettive, forse inedite, su noi esseri umani - letteralmente? E se così fosse, questo potrebbe arricchire la nostra visione di noi stessi e della vita, dal punto di vista scientifico, filosofico e religioso? Sicuramente queste rimangono domande estremamente affascinanti e intriganti".

Novembre 2022

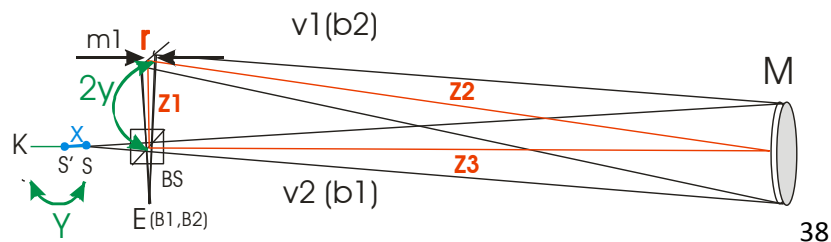
### Riferimenti

- 2a: <https://demonstrations.wolfram.com/MichelsonInterferometerWithEquallySpacedFringes/>  
 2b: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Michelson-Morley\\_experiment\\_conducted\\_with\\_white\\_light.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Michelson-Morley_experiment_conducted_with_white_light.png)  
 2c: [https://en.wikipedia.org/wiki/Michelson%E2%80%93Morley\\_experiment](https://en.wikipedia.org/wiki/Michelson%E2%80%93Morley_experiment)  
 2d: <https://sites.google.com/site/puenggphysics/home/Unit-II/newtons-ring>

Dopo un primo testo esplorativo, questa è stata la seconda parte, che ha cercato di concentrarsi principalmente sull'esperimento M&M. In una terza parte, l'attenzione non si concentra tanto sul contenuto scientifico, quanto sugli aspetti filosofici e religiosi dell'esistenza o meno delle "polveri sottili".

Infine: come annunciato, di seguito riportiamo l'elaborazione algebrica che porta alla formula:  $x = \sqrt{y^2 + f^2} - f$

**9. L'elaborazione algebrica.**



Pensando alla sorgente luminosa puntiforme in S', cerchiamo di definire algebricamente le distanze dei due oggetti. Otteniamo:

$v_1$ , la distanza dell'oggetto in senso orario, è uguale alla distanza da S' a S, poi a B, m1 e M, ovvero:  $v_1 = 2*f - (y - x) + 2*y = 2*f + y + x$ . (1)

$v_2$ , la distanza in senso antiorario, è uguale alla distanza da S' a S e da B a M o:  $v_2 = 2*f - (y - x) = 2*f - y + x$  (2)

Attraverso la formula dello specchio  $1/f = 1/b + 1/v$  troviamo:  $b = (v*f) / (v-f)$ , per cui  $b_1$ , la prima distanza dell'immagine, appartenente a  $v_1$ , e che va da M attraverso B verso E, è uguale a

$$b_1 = (2*f - y + x)*f / (2*f - y - x - f) \quad (3)$$

Per  $b_2$ , la seconda distanza dell'immagine, appartenente a  $v_2$ , e che passa da M attraverso m1 e B verso E troviamo:

$$b_2 = (2*f + y + x)*f / (2*f + y + x - f) \quad (4)$$

Quindi, vedendo sul disegno dove si trova  $b_1$ , scopriamo che il percorso disponibile per  $b_1$  è uguale a  $v_2$ . Quindi il punto immagine B1 (la lettera maiuscola per distinguerlo dalla lettera minuscola  $b_1$ , la distanza dell'immagine) si troverà a  $b_1 - v_2$  da E, ovvero:

$$B1 = b_1 - v_2$$

Vedendo in modo del tutto analogo dove si trova  $b_2$ , notiamo che il percorso disponibile è uguale a  $v_1$ . Il punto B2 si troverà quindi a  $b_2 - v_1$  da E in poi.

$$B2 = b_2 - v_1$$

Troviamo la distanza reciproca D tra i due punti dell'immagine B1 e B2 facendo la differenza tra questi ultimi due valori. Otteniamo:

$$D = B2 - B1 = (b_2 - v_1) - (b_1 - v_2) = (b_2 - b_1) - (v_1 - v_2) \quad (5)$$

Da (1) e (2) troviamo:

$$(v_1 - v_2) = 2 * f - y + x - 2 * f - y - x = -2 * y \quad (6)$$

Possiamo quindi riscrivere la (5) come:  $D = (b_2 - b_1) + 2 * y$  (7)

Ora sostituite nella (7) per  $b_2$  e  $b_1$  i valori ottenuti nelle (3) e (4):

$$D = ((2 * f - y + x) * f / (f - y + x)) - ((2 * f + y + x) * f / (f + y + x)) + 2 * y$$

Ora elaboriamo ulteriormente questa equazione.

$$= (((2f^2 - fy + fx) * (f + y + x) - (2f^2 + fy + fx) * (f - y + x)) / ((f - y + x) * (f + y + x))) + 2y$$

$$= (2f^3 + 2f^2y + 2f^2x - f^2y^2 - fyx + f^2x + fyx + fx^2) / ((f + y + x) * (f - y + x)) -$$

$$(2f^3 - 2f^2y + 2f^2x + f^2y - fy^2 + fyx - f^2x - fyx + fx^2) / ((f + y + x) * (f - y - x)) - 2 * y$$

$$= (2f^2y / ((f + y + x) * (f - y - x))) - 2y$$

$$= (2f^2y / (f^2 - fy + fx + fy - y^2 + yx + fx - yx + x^2)) - 2y$$

$$= (2f^2y / (f^2 + 2fx + x^2 - y^2)) - 2y$$

$$\text{o } D = (2f^2y / ((f + x)^2 - y^2)) - 2y \quad (8)$$

Con quest'ultima espressione, abbiamo ora una formula che ci dice a quale distanza si trovano i due punti immagine B1 e B2 nella nostra configurazione, e questo in funzione della lunghezza focale  $f$  del nostro specchio M, del valore di  $y$  e dello spostamento radiale  $x$  della nostra sorgente luminosa puntiforme.

In questa espressione, lasciamo che  $x$  aspiri a 0, ed elaborando ulteriormente otteniamo:

$$D = (2f^2y / (f^2 - y^2)) - 2y \quad D = (2f^2y - 2y(f^2 - y^2)) / (f^2 - y^2)$$

$$D = (2f^2y - 2yf^2 + 2y^3) / (f^2 - y^2) \quad D = 2y^3 / (f^2 - y^2)$$

Vediamo quindi che il valore di  $D$  diminuisce al diminuire del valore di  $y$  e/o all'aumentare di  $f$ . Pertanto, se vogliamo avvicinare i punti immagine B1 e B2 a  $x = 0$ , dovremo rendere le distanze degli oggetti  $v_1$  e  $v_2$  il più simili possibile e lavorare con specchi con punti focali lunghi.



L'importanza di un piccolo valore  $D$  diventerà chiara nella prossima sezione, dove si dimostrerà che in questo modo avremo una più ampia latitudine meccanica quando regoleremo il nostro setup.

La domanda più ovvia è quando i due punti dell'immagine coincidono davvero, o quando il valore di  $D$  diventa 0. Lo calcoleremo in funzione della distanza  $x$ , perché questo valore può essere modificato più facilmente in un setup spostando la sorgente luminosa in avanti o indietro. Calcolando questo, a partire dall'equazione data in (8), troviamo:

$$D = (2f^2y / ((f+x)^2 - y^2)) - 2y, \text{ oppure: } (2f^2y / ((f+x)^2 - y^2)) - 2y = 0$$

e ci occupiamo ulteriormente di questo aspetto:

$$2f^2y / ((f+x)^2 - y^2) = 2y, \text{ oppure } (f+x)^2 - y^2 = 2f^2y/2y$$

$$(f+x)^2 = f^2 + y^2 \quad f + x = \text{sqr}(y^2 + f^2), \text{ oppure}$$

$$x = (\text{sqr}(y^2 + f^2)) - f$$

Con quest'ultima formula, abbiamo quanto richiesto; un valore nullo per  $D$  in funzione di  $x$ . Pertanto, se  $x$  soddisfa la condizione descritta sopra, i due punti immagine  $B1$  e  $B2$  dovrebbero praticamente coincidere. Tuttavia, si noti che non è tanto la coincidenza il nostro obiettivo. Se si coprono completamente a vicenda, non c'è alcuna interferenza. Vogliamo verificare se possono avvicinarsi molto l'uno all'altro e cosa si dovrebbe fare a tal fine, nella convinzione che la pratica non sia in fondo un riflesso esatto di questi risultati teorici.