

DISPENSE

**CROLLO DELLE IPOTESI SULL'ETERE
E AVVENTO DELLA RELATIVITA' RISTRETTA**

Prof.ssa Angela Donatiello

INDICE

<i>Le origini del concetto di etere</i>	pag 3
<i>La teoria ondulatoria della luce e il ritorno dell'etere</i>	pag 4
<i>La costante c e la natura elettromagnetica della luce</i>	pag 6
<i>Newton o Maxwell: chi ha ragione?</i>	pag 9
<i>Il riferimento privilegiato</i>	pag 11
<i>Trascinato o stazionario: le due ipotesi sull'etere</i>	pag 12
<i>L'aberrazione della luce stellare e la sconfitta dell'etere trascinato</i>	pag 13
<i>L'esperimento di Michelson e Morley e il crollo dell'etere stazionario</i>	pag 19
<i>L'ipotesi della contrazione di Lorentz e Fitzgerald</i>	pag 28
<i>Le trasformazioni di Lorentz</i>	pag 30
<i>L'abbandono dell'etere e l'avvento della relatività ristretta di Einstein</i>	pag 32
<i>Bibliografia</i>	pag 34

Le origini del concetto di etere

Nel corso dell'evoluzione della scienza, la parola *etere* ha più volte cambiato significato. Il problema dell'etere affonda le sue radici nel lontano **380 a.C.** grazie alle teorie di *Aristotele* relative al moto dei corpi celesti. Aristotele divise infatti la realtà sensibile in due sfere fra loro nettamente distinte: da un lato vi era il cosiddetto mondo sublunare, mentre dall'altro vi era il mondo sopralunare o celeste. Il primo veniva visto da Aristotele come un mondo caratterizzato da tutte quante le forme di mutamento e pertanto rappresentava l'imperfezione e la corruzione. I cieli, al contrario, nella visione aristotelica, erano caratterizzati dal solo movimento circolare, simbolo di perfezione geometrica, in quanto privo di inizio e di fine. La differenza sostanziale fra la sfera sublunare e la sfera sopralunare risiede essenzialmente nella diversa materia di cui sono costituite. Nella *Metaphisica* Aristotele afferma che:

“Se c'è qualcosa di eternamente mosso, neppure esso può essere mosso secondo potenza, se non da un punto all'altro (come appunto si muovono i cieli). E nulla vieta che ci sia una materia propria di questo tipo di movimento. Per questo il sole, gli astri e tutto il cielo sono sempre in atto; e non c'è da temere che essi ad un certo momento si fermino, come temono i fisici. Né essi si stancano di compiere il loro percorso, perché il loro movimento non è, come quello delle cose corruttibili, connesso con la potenza dei contrari, il che renderebbe faticosa la continuità del movimento.”

Questa materia che Aristotele chiama la *potenza dei contrari* è data dai quattro elementi empedoclei, terra, aria, acqua e fuoco, interpretati come elementi trasformabili l'uno nell'altro e pertanto corruttibili. Con la visione dei quattro elementi, Aristotele riprende in parte la *mistica del quattro* introdotta da Pitagora, apportando però una variazione. Egli fu infatti il primo a rompere tale mistica con l'introduzione di un quinto elemento, noto anche come *“quinta essenza”*, che doveva

rappresentare la perfezione del moto circolare dei corpi celesti. Un tale elemento doveva pertanto essere eterno ed immutabile: nacque così l'*etere* (*aei qein*), ovvero "*ciò che corre sempre*". Secondo Aristotele, l'etere è ingenerato, incorruttibile, non soggetto ad accrescimento e ad alterazione, né ad altre affezioni che implicino mutamenti. Da ciò ne seguiva che anche i cieli erano incorruttibili, in quanto costituiti di etere e tale visione del mondo proseguì per molto tempo, prolungandosi lungo tutto l'arco del Medioevo. Solo all'inizio dell'età moderna le cose iniziarono a cambiare nell'interpretazione del cosmo, con l'avvento della rivoluzione copernicana. Le sorti dell'etere invece non finirono lì, ma ritornarono in auge alla fine del 1600 con la nascita della teoria ondulatoria della luce.

La teoria ondulatoria della luce e il ritorno dell'etere

*“Haec quoniam fiunt, tenuis quoque imago
Ab rebus mitti, summo de corpore earum ...
Ergo ...
... effigias quoque debent mittere tenues
Res quaeque ; ex summo quoniam jaculantur utraeque :
Sunt igitur jam formarum vestigia certa,
Que volgo volitant, subtili praedita filo,
Nec singillatim possunt secreta videri.”*

(Lucrezio, De Rerum Natura, libro IV)

Tali versi estratti dal poema *De Rerum Natura* di Lucrezio, contengono una specie di teoria corpuscolare della luce, nata dalla mente del poeta. Tradotti recitano così:

“Questi esempi sono sufficienti a convincerci che dalla superficie si liberano le immagini delle cose, e tutte le cose emettono le loro delicate effigi perché queste

specie di immagini hanno la loro sorgente sulla superficie dei corpi. Abbiamo quindi rivelato l'esistenza di simulacri, che percorrono lo spazio aereo con forma così delicate che se ce ne allontaniamo sfuggono ai nostri occhi.”

Tuttavia non si può pensare che questi versi costituiscano una dottrina scientifica sulla natura della luce. L'inizio della scienza ottica può essere fatto invece risalire ai tempi di **Cartesio** che, con la sua **Dioptrique** del **1638**, pose le basi relative alle leggi fondamentali della propagazione della luce. Cartesio fu il primo a sviluppare il concetto di un mezzo capace di propagare la luce, anticipando in un certo senso la teoria ondulatoria, formulata in maniera rigorosa da **Christiaan Huygens** nel **1678**. Nel suo trattato sulla luce, Huygens scrisse:

“ Se oltre ciò, il passaggio della luce richiede tempo, il che non tarderemo a vedere, ne conseguirà che questo movimento impresso alla materia interposta sarà progressivo e pertanto si propagherà, come fa il suono, per superfici sferiche e per onde; poiché le chiamo onde per la loro somiglianza con quelle che vediamo formarsi nell'acqua allorché vi si getta un sasso e la cui propagazione si effettua in circoli successivi, sebbene queste ultime traggano origine da un'altra causa e si estendano soltanto su di una superficie piana.”

Secondo Huygens dunque la luce è un'onda, un trasferimento cioè di energia e non di sostanza. Al contrario, **Newton**, grande scienziato vissuto quasi contemporaneamente ad Huygens, può essere considerato come l'iniziatore della dottrina opposta, ovvero della teoria corpuscolare. Essa afferma che ogni corpo luminoso emette piccole particelle, il cui moto avviene secondo le leggi della meccanica, che colpendo l'occhio producono la sensazione della luce. D'altro canto la teoria ondulatoria di Huygens stabilisce un'analogia tra la propagazione della luce e il moto di un'onda sulla superficie dell'acqua o quello delle onde sonore nell'aria.

La disputa tra la natura ondulatoria e quella corpuscolare della luce si protrasse per lungo tempo e tuttora non si ha ancora un'immagine completamente chiara sulla faccenda. Quando, però, intorno alla metà del XIX secolo, la visione ondulatoria prese il sopravvento, si comprese che, se dovevano esistere delle onde, cioè delle ondulazioni, allora doveva sicuramente esistere qualcosa che oscillasse e questo qualcosa fu chiamato *etere*, una sostanza estremamente fine e senza peso che permeava lo spazio astronomico attraversato dalla luce. L'etere veniva concepito come un mezzo elastico presente in ogni punto dello spazio e capace di trasmettere le onde luminose con le proprie vibrazioni.

L'invenzione di una tale sostanza artificiosa quale l'etere era nata dal tentativo di interpretare tutti i fenomeni naturali partendo da criteri meccanicistici, nella convinzione che ogni evento potesse essere inquadrato in tale schema. In realtà, anche se nel corso della seconda metà del XIX secolo la fisica fu pervasa da idee nuove e rivoluzionarie che aprirono un varco a nuovi orizzonti in contrasto con l'interpretazione meccanicistica, la presenza dell'etere non scomparve, ma anzi assunse un ruolo importante quale mezzo per la trasmissione di quel nuovo ente che Maxwell definì campo elettromagnetico.

La costante c e la natura elettromagnetica della luce

La determinazione della velocità della luce fu eseguita indipendentemente dalla controversia fra le due ipotesi sulla natura stessa della luce. Il fatto che dovesse trattarsi di una velocità elevatissima fu chiaro fin dalle prime osservazioni sulla propagazione luminosa. Nel **1607 Galileo Galilei** tentò di eseguirne una misura servendosi dei raggi emessi da una lanterna, ma non ottenne grandi risultati, in quanto la luce percorre le distanze terrestri in tempi troppo brevi. Per una tale misura è dunque necessario ricorrere alle enormi distanze esistenti fra i corpi celesti nello spazio. **Olaf Romer** nel **1676**, fu il primo a calcolare la velocità c della luce in base

ad osservazioni astronomiche relative alle eclissi dei satelliti di Giove. Il valore esatto di c a cui Romer si era avvicinato con estrema precisione è

$$c = 299\,793 \text{ Km/s}$$

Successivamente si è riusciti anche ad eseguire una misurazione terrestre della velocità della luce, mediante la costruzione di un dispositivo capace di misurare con buona precisione il brevissimo intervallo di tempo necessario alla luce per percorrere distanze terrestri. *Fizeau* nel **1849** e *Foucault* nel **1865**, in tal modo, misurarono e confermarono il valore numerico di c , già trovato con metodi astronomici.

La costante c , che tanto affascinò i fisici nella ricerca di un metodo sperimentale per misurarla, assunse un ruolo di particolare rilievo nel **1864**, anno della pubblicazione delle celebri *equazioni di Maxwell*. Esse rappresentarono un importante elemento di unificazione delle teorie relative all'elettricità e al magnetismo, portando all'introduzione di un nuovo concetto quale quello di campo elettromagnetico e alla scoperta di un nuovo tipo di onde note appunto come onde elettromagnetiche e generate dalla variazione di tale campo.

$$\text{“ } \mu \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\text{“ } \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

$$\text{“ } \mu \mathbf{B} = \mathbf{j} + \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\text{“ } \mathbf{B} = 0$$

dove con \mathbf{E} e \mathbf{B} si indicano rispettivamente il campo elettrico e il campo magnetico.

Dalle sue celebri equazioni, Maxwell dedusse che le onde elettromagnetiche, in assenza di materia, si propagano con velocità:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

dove ϵ_0 e μ_0 rappresentano rispettivamente la costante dielettrica del vuoto, pari approssimativamente a $9 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$, e la permeabilità magnetica del vuoto, data da $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ henry/m}$. Sostituendo i valori delle costanti ϵ_0 e μ_0 in c , si ottiene che:

$$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

ovvero che, in assenza di materia, il valore della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche coincide con buona approssimazione con quello della luce. Tale clamoroso risultato mise in evidenza lo straordinario potere unificante delle quattro equazioni non solo rispetto ai fenomeni elettrici o magnetici, ma anche a quelli luminosi e indusse Maxwell a formulare *l'ipotesi che la luce avesse una natura elettromagnetica*. Purtroppo per i fisici del tempo non era concepibile che un'onda potesse propagarsi senza le vibrazioni di un mezzo, per cui lo stesso Maxwell, assumendo la luce come un'onda elettromagnetica, dovette accettare l'idea dell'esistenza di un *etere elettromagnetico*. Maxwell si comportò in modo ambivalente nei confronti della realtà eterea, in quanto etichettava l'etere come "... l'ipotesi scientifica che più si avvicina ad una congettura". Ciò nonostante se ne servì per dare una giustificazione alle sue scoperte. Rispetto all'inclinazione storica ad inventare "eteri", Maxwell disse:

" Gli eteri furono inventati per far sì che i pianeti potessero nuotarci dentro, per costituire atmosfere elettriche ed effluvi magnetici, per convogliare le sensazioni da una parte all'altra del nostro corpo e così via, finché tutto lo spazio era stato riempito tre o quattro volte di eteri vari ... L'unico vero etere sopravvissuto è quello ideato da Huygens per rendere conto della propagazione della luce. [...] Le proprietà di questo mezzo [...] sono precisamente quelle richieste dalla spiegazione dei fenomeni elettromagnetici."

Per la teoria di Maxwell, dunque, le onde elettromagnetiche nello spazio libero, ovvero nell'etere elettromagnetico, devono propagarsi alla velocità della luce c che, secondo la predizione maxwelliana, risulta *finita e invariabile*, ossia è la stessa per ogni osservatore e non dipende dalla sorgente che la emette. Tale predizione portò

non pochi problemi nel mondo scientifico del XIX secolo, in quanto generò un vero e proprio conflitto tra le due grandi teorie fisiche fino ad allora formulate.

Newton o Maxwell: chi ha ragione?

Verso la fine dell'Ottocento il mondo della fisica credeva di aver raggiunto un importante traguardo nello studio e nell'interpretazione dei fenomeni fisici. Se da un lato si pensava di conoscere tutto della meccanica grazie alla teoria di Newton, dall'altro si pensava di aver compreso tutto dell'elettromagnetismo con la splendida sintesi data dalle quattro equazioni di Maxwell. Newton e Maxwell, a distanza di due secoli l'uno dall'altro, avevano creato due teorie che organizzavano e spiegavano vaste aree di esperienze e fenomeni sperimentali, una nell'ambito del moto di corpi a velocità ordinarie, l'altra relativa a fenomeni ondosi propagantesi alla più alta velocità conosciuta. Anche se entrambe le teorie conservano tuttora la loro validità, fornendo spiegazioni e verifiche per tutti quei fenomeni fisici che ricadono nelle rispettive aree d'influenza, dopo la scoperta della natura elettromagnetica della luce ad opera di Maxwell, emerse inevitabile un conflitto.

Nella meccanica newtoniana, infatti, la velocità di un corpo rispetto ad un osservatore dipende dalla velocità dell'osservatore, per cui osservatori con velocità diverse misureranno valori diversi legati tra loro dalle celebri *trasformazioni di Galileo*.

$$\left\{ \begin{array}{ll} x = x' + v_0 t' & v_x = v_x' + v_0 \\ y = y' & v_y = v_y' \\ z = z' & v_z = v_z' \\ t = t' & \vec{a} = \vec{a}' \end{array} \right.$$

Ad esempio, un uomo che sta fermo sul bordo della strada ed osserva passare un'automobile a 60 Km/h, avrà misurato rispetto al suo sistema esattamente 60 Km/h, ma se anch'egli si muove a bordo di un'auto a 30 Km/h e viene sorpassato dall'automobile che viaggia a 60 Km/h, allora la sua misurazione della velocità della seconda automobile sarà non più di 60 Km/h, bensì di 30 Km/h. Con la luce, invece,

le cose sono un po' diverse, in quanto secondo le equazioni di Maxwell la velocità della luce è sempre uguale a c , indipendentemente dalla velocità dell'osservatore o dalla velocità della sorgente di luce.

Se un osservatore sta fermo sul bordo della strada e misura la velocità della luce che proviene dai fari di una macchina che si avvicina a 60 Km/h, secondo la meccanica newtoniana egli dovrebbe misurare una velocità pari a $c+60$, ma ciò andrebbe in disaccordo con le equazioni di Maxwell, per le quali la velocità della luce è sempre uguale a c , ossia è *finita e invariabile*. L'indipendenza della velocità della luce dal moto della sorgente fu dimostrata solo successivamente nel **1913**, dall'astronomo olandese **Willem De Sitter**, mediante l'osservazione dei sistemi di stelle doppie.

Le equazioni di Maxwell, dunque, per ciò che concerne la luce, non ammettono la possibilità che le velocità si sommino nel modo descritto dalla meccanica newtoniana e ciò comporta che tali equazioni non risultano invarianti per trasformazioni galileiane.

Alla fine del 1800 e verso gli inizi del nuovo secolo si presentava dunque agli occhi dei fisici il problema dell'esistenza di un principio di relatività anche per i fenomeni elettromagnetici. Il grande dilemma era: Cosa cambiare? Le equazioni di Maxwell o le trasformazioni di Galileo? Le due grandi teorie della fisica erano risultate tra loro inconciliabili.

Le possibilità di uscita erano essenzialmente tre:

- a) Per conservare intatte le trasformazioni galileiane ed accettare la validità di un unico principio di relatività sia per la meccanica che per l'elettrodinamica, andava trovato un errore nelle equazioni di Maxwell, in maniera tale da riformularle in modo che oltre al valore c comparisse anche qualcosa del tipo v_0+c ;
- b) Per accettare la validità di un unico principio di relatività sia per la meccanica che per l'elettrodinamica, lasciando però invariate le equazioni di Maxwell, era necessario cambiare le trasformazioni di Galileo;

- c) Fermo restando le trasformazioni galileiane, al fine di evitare di cambiare le leggi fisiche dell'elettromagnetismo, come ultima possibilità restava l'idea di un *riferimento privilegiato* in cui considerare valide le equazioni di Maxwell, ovvero accettare l'idea che ci fosse un principio di relatività per la meccanica non valido per l'elettromagnetismo.

All'epoca in cui era sorto tale problema, per il mondo scientifico e per l'opinione comune risultava particolarmente difficile accettare l'idea che le trasformazioni galileiane non fossero universalmente valide, in quanto alla fine del XIX secolo la concezione newtoniana del mondo si era consolidata da più di 200 anni. Coloro che si occupavano dell'apparente conflitto tra la teoria newtoniana e quella maxwelliana continuavano a pensare che ci fosse qualcosa di sbagliato nelle equazioni dell'elettrodinamica. In realtà, oggi è possibile affermare che tutte le teorie che tendono a modificare le equazioni di Maxwell non trovano un riscontro sperimentale. Ciò nonostante, lo stesso Maxwell, figlio del suo tempo, non se la sentì di attaccare le trasformazioni di Galileo, per cui fu egli stesso uno dei fautori dell'ipotesi del riferimento privilegiato: *il riferimento dell'etere*.

Il riferimento privilegiato

Quando Maxwell, nel **1864**, data della pubblicazione delle sue celebri equazioni, osservò che in assenza di materia le onde elettromagnetiche viaggiano con velocità c @ $3 \cdot 10^8$ m/s, il quesito che maggiormente interessò il mondo fisico dell'epoca fu quello di stabilire a quale sistema di riferimento doveva essere riferita la velocità c della luce. Risulta chiaro che, ammessa l'esistenza di un sistema di riferimento privilegiato S in cui la luce viaggia con velocità c e ritenute valide le trasformazioni di Galileo, ne segue che la velocità di propagazione della luce per un sistema S_1 in moto rispetto ad S ha un valore diverso da c . Infatti, se S_1 è in moto rispetto ad S con velocità v , la luce nel sistema S_1 ha una velocità compresa tra $c - v$ e $c + v$, a causa

proprio delle trasformazioni di Galileo. Si consideri ad esempio un lampo di luce che oltrepassa una nave spaziale che si muove rispetto alla Terra con velocità costante v . Se si ammette che la luce viaggi rispetto alla Terra con velocità costante c , la velocità del lampo elettromagnetico della luce rispetto alla nave spaziale sarà quindi $c - v$. In modo analogo, un lampo di luce che si propaga in verso opposto al moto della nave spaziale ha rispetto ad essa la velocità $c + v$. In accordo con la convinzione dell'epoca per cui le onde non possono propagarsi nel vuoto, la cosa più naturale da fare era quella di *considerare come riferimento privilegiato per le equazioni di Maxwell un riferimento S collegato con l'etere.*

Trascinato o stazionario : le due ipotesi sull'etere

Nell'affannosa ricerca di una simile straordinaria sostanza quale l'etere, furono formulate diverse ipotesi e tentati molteplici esperimenti. La cosa che si comprese è che l'etere poteva essere di due tipi. Sapendo infatti che le onde luminose si propagano attraverso l'etere così come le onde sonore si propagano attraverso l'aria, sorse subito un interrogativo: dall'analogia evidenziata era fortemente probabile che l'etere potesse venire trascinato da una stanza chiusa ermeticamente allo stesso modo con cui essa trascina con sé l'aria in essa presente. Naturalmente questa non fu l'unica teoria sviluppata sulla natura dell'etere, ma si pensò anche che esso potesse essere piuttosto un etere stazionario.

Nell'espone la sua idea circa l'infondatezza dell'esistenza di una tale sostanza, Einstein prese in esame le diverse possibilità sulle caratteristiche di un eventuale etere: *“Nulla ci vieta di considerare l'ipotesi secondo cui la stanza in moto assieme alla sua sorgente luminosa trascinerrebbe seco l'etere, così come la stanza trascina l'aria che vi è rinchiusa ... Si può però anche pensare all'ipotesi opposta e cioè che la stanza si muova attraverso l'etere, come una nave filante con mare calmo, senza trascinare parte alcuna del mezzo ambiente, ma soltanto fendendolo.”* Le eventualità circa la natura dell'etere erano dunque due: la Terra orbitando intorno al Sole e

muovendosi nel mezzo etereo avrebbe trascinato l'etere nel suo moto, oppure, con le parole di *Thomas Young*, lo avrebbe lasciato scivolare attraverso di sé "...come il vento attraverso un boschetto di piante".

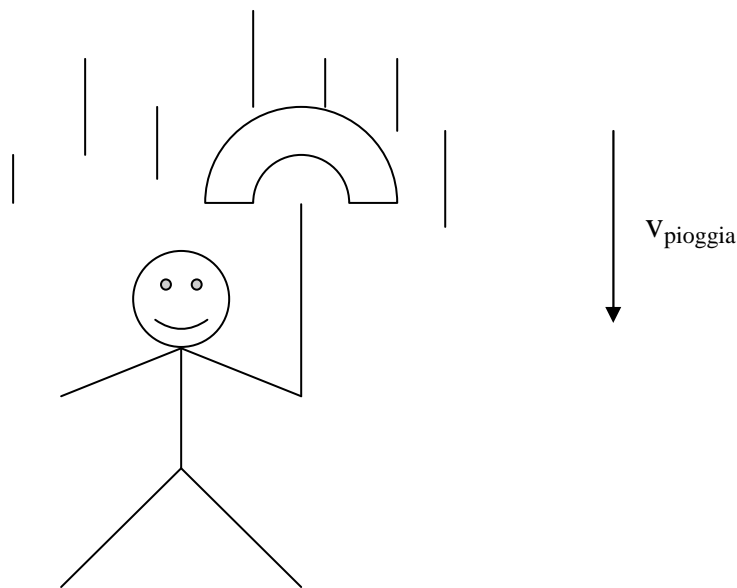
Le due ipotesi sull'etere possono essere schematizzate nel seguente modo. Si considerino due osservatori, uno interno ad una stanza che si muove di moto uniforme nello spazio con velocità v e l'altro esterno alla stanza e fermo. Assumendo che la stanza trascini con sé l'etere nel suo moto, il riferimento privilegiato in cui valgono le equazioni di Maxwell e in cui la luce ha velocità esattamente c , risulta essere quello della stanza, mentre l'osservatore esterno misurerà per la luce una velocità diversa da c e legata alla velocità v della stanza. D'altro canto, accettando l'ipotesi di un etere stazionario, il riferimento privilegiato risulterà essere quello relativo all'osservatore fermo, configurandosi come l'oceano d'etere in cui viaggia la stanza a velocità v . Per l'osservatore fermo la velocità della luce sarà sempre c , mentre l'osservatore che si muove solidalmente con la stanza avvertirà l'etere come un vento e misurerà un valore per la velocità della luce diverso da c .

L'aberrazione della luce stellare e la sconfitta dell'etere trascinato

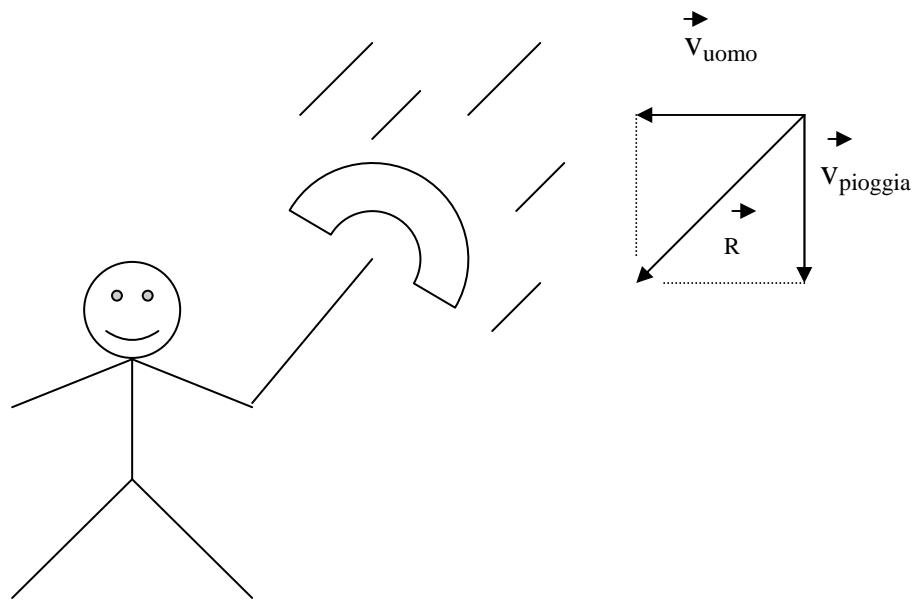
L'inesistenza di un etere trascinato fu provata sperimentalmente da *James Bradley* nel 1727, mediante l'osservazione astronomica del fenomeno *dell'aberrazione della luce stellare*, che produce l'apparente variazione di posizione di una stella. Tale esperimento ha un'importanza cruciale, in quanto, oltre a dimostrare l'infondatezza dell'ipotesi di un etere trascinato, servì soprattutto come prova diretta a sostegno della teoria copernicana sul sistema solare e fornì una misura indiretta della velocità della luce.

Il moto apparente di una stella fissa nel corso di un anno è evidentemente dovuto al moto di rivoluzione della Terra intorno al Sole. La direzione di una data stella dovrebbe dunque essere diversa dopo sei mesi, quando cioè la Terra si trova dalla parte opposta rispetto al Sole. Un simile effetto è familiare quando si osserva lo

spostamento apparente di un oggetto vicino, prima con un occhio chiuso e poi con l'altro. Ciò che stupì Bradley fu un'osservazione di tale fenomeno relativamente alla posizione di una stella che passava direttamente sulla verticale di Londra e per la quale lo spostamento apparente massimo si verificava in momenti sbagliati dell'anno, ossia quando la Terra era spostata rispetto alla posizione prevista, di un quarto della sua orbita. Riflettendo sulle sue osservazioni, Bradley comprese che l'effetto osservato sull'aberrazione della luce non era prodotto dalla posizione della Terra nella sua orbita, bensì dalla direzione del moto che variava nel tempo lungo l'orbita. Per comprendere meglio tale fenomeno è possibile fare un'analogia con un passante che si trova per strada sotto la pioggia con un ombrello in mano. Supponendo che la giornata sia priva di vento, la pioggia cadrà dritta a filo a piombo, per cui un passante fermo sul marciapiede, per ripararsi dalla pioggia, dovrà tenere l'ombrello verticale sulla sua testa.

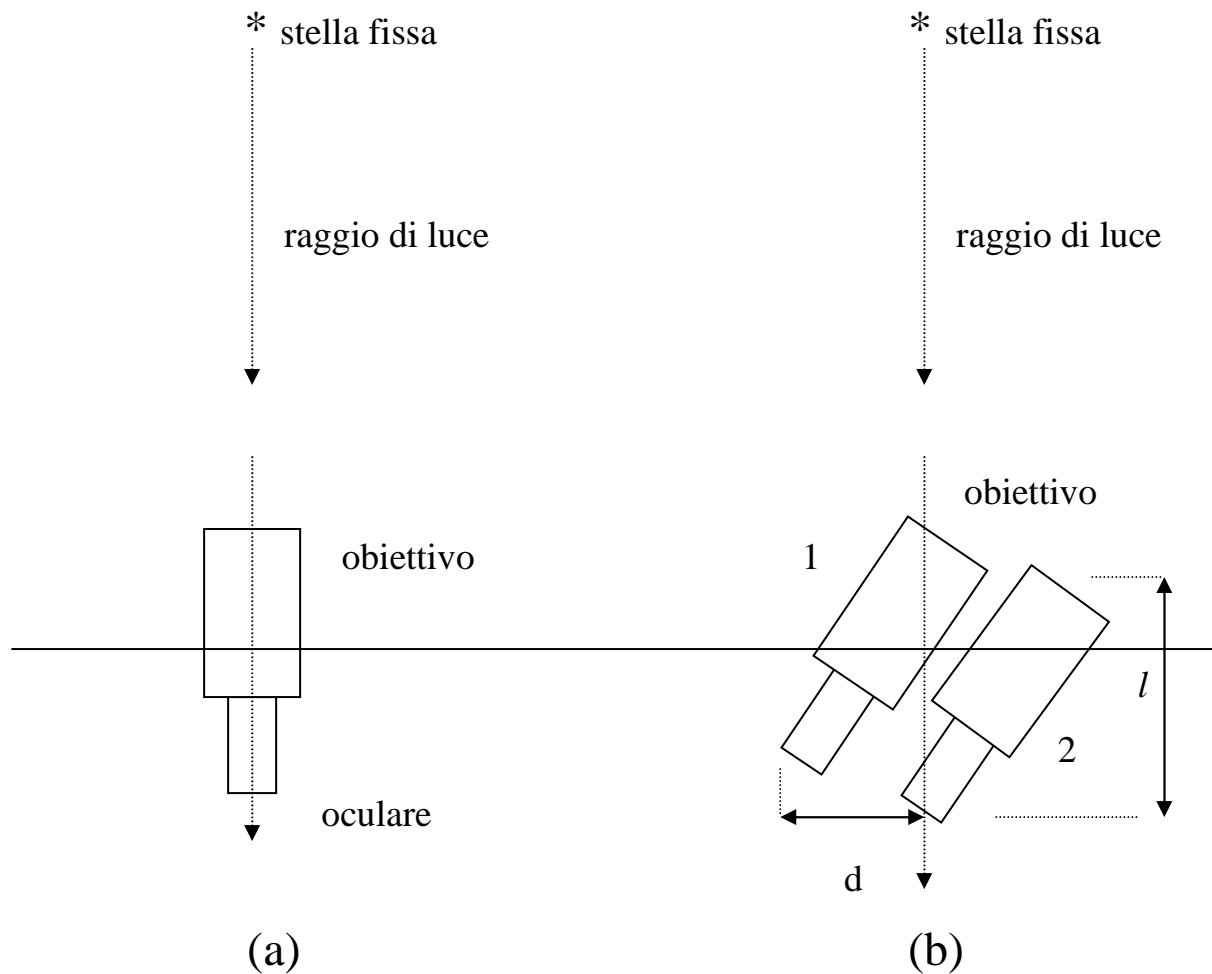


Si consideri ora il caso in cui il passante non sia più fermo, ma cominci a correre con una certa velocità \vec{v}_{uomo} . In questo caso, per evitare di bagnarsi, non sarà più possibile tenere l'ombrello dritto sulla testa, ma sarà necessario inclinarlo di un certo angolo che dipenderà dalla velocità con cui l'uomo sta correndo. Maggiore è la velocità, maggiore sarà l'angolo di inclinazione dell'ombrello.



La stessa osservazione può essere fatta relativamente alle stelle. Per comprendere l'origine di questo fenomeno in analogia con l'esempio della pioggia, sarà conveniente avvalersi dell'interpretazione molto semplice fornita dalla teoria corpuscolare. Si immagini di osservare una stella con un cannocchiale. La stella in esame invierà dei fotoni e se la Terra fosse ferma si dovrebbe orientare il cannocchiale direttamente sulla stella. In realtà, poiché la Terra si muove con una certa velocità \vec{v} , per poter osservare la stella sarà necessario posizionare il cannocchiale inclinato di un angolo α rispetto alla verticale. Tale angolo è detto **angolo di aberrazione** la cui tangente è data dal rapporto v/c , dove v rappresenta la velocità con cui si muove la Terra e c la velocità della luce nel sistema privilegiato.

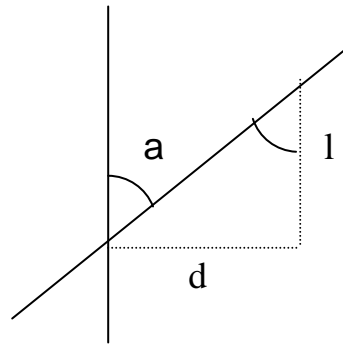
La dimostrazione analitica di ciò è molto semplice e può essere fatta osservando lo schema riportato in figura. Per semplicità si analizzerà il caso in cui la luce della stella giunga in direzione perpendicolare al moto della Terra.



Per poter osservare la stella è necessario che i corpuscoli luminosi, ossia i fotoni, colpiscano sia l'obiettivo che l'oculare. Sapendo che la Terra si muove, se lasciassimo il cannocchiale orientato sulla stella, il fotone attraverserebbe l'obiettivo, ma nel frattempo la Terra si sarebbe mossa e con essa anche il cannocchiale, per cui il fotone non attraverserebbe mai l'oculare e non sarebbe dunque possibile osservarla. La posizione corretta per il cannocchiale sarà dunque quella (b), in quanto mentre il corpuscolo percorre la lunghezza l del cannocchiale in un tempo l/c , la Terra e lo strumento ad essa solidale, si saranno mossi di un tratto $v\mu l/c$ fino alla posizione 2. Pertanto il fotone colpirà l'oculare solo se $v\mu l/c$ è uguale allo spostamento d del cannocchiale. Si ha dunque che:

$$d/l = v/c$$

Dai teoremi di trigonometria discende banalmente che d/l rappresenta proprio la tangente dell'angolo che il cannocchiale forma con la verticale.



Il telescopio, dunque, non deve essere orientato sulla posizione reale della stella, ma su un punto del cielo spostato nella direzione della velocità v . Il rapporto

$$b = \operatorname{tg} a = v/c$$

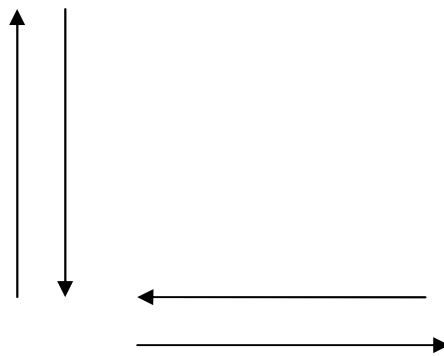
è detto *costante di aberrazione*, mentre a è detto *angolo di aberrazione*. Durante l'annuale rivoluzione della Terra intorno al Sole, ogni stella fissa descrive una piccola orbita ellittica, dalle cui dimensioni è possibile ricavare il valore di b . Essendo nota la velocità media della Terra nella sua orbita che è di circa 30 Km/s, è dunque possibile, con il metodo di Bradley ricavare ancora una misura della velocità della luce.

L'aspetto più interessante di tale esperimento, però, risiede non solo nell'aver fornito una prova del moto della Terra, ma anche una dell'inesistenza dell'etere trascinato. Infatti, in presenza di un mezzo etereo che verrebbe trascinato dalla Terra nel suo moto, non sarebbe più possibile osservare il fenomeno dell'aberrazione. Per guardare una stella fissa, non si dovrebbe inclinare il telescopio, ma puntarlo lungo la direzione della stella, in quanto l'etere seguirebbe la Terra e dunque anche i fotoni continuerebbero a colpire il cannocchiale in direzione ortogonale al moto della Terra. Se si ammettesse la presenza di un mezzo etereo trascinato, l'effetto sarebbe analogo alla situazione in cui mentre un passante inizia a correre sotto la pioggia, si alza un vento tale da trascinare la pioggia nella stessa direzione e con la stessa velocità della

persona che corre. Si intuisce che ciò non è possibile e stessa sorte tocca all'ipotesi dell'etere trascinato.

Naturalmente tale esperimento non fece crollare del tutto l'ipotesi dell'esistenza di un mezzo etereo, in quanto poteva essere tranquillamente conciliato con una natura stazionaria dell'etere stesso. Si cercò dunque di realizzare degli esperimenti che mostrassero l'esistenza di un etere stazionario. Sulla Terra, in moto attraverso il mezzo etereo, il moto relativo dell'etere sarebbe dovuto apparire "come il vento" e, proprio come il vento percorso da un suono altera la velocità del suono stesso, così il vento etereo che supporta la luce, avrebbe dovuto alterare la velocità della luce lungo la direzione del vento. Tale velocità della luce è fissata dalla direzione del moto della Terra all'interno dell'etere. Maxwell capì che tale variazione di velocità può essere rivelata inviando due raggi di luce su due percorsi differenti, ma di uguale lunghezza, in quanto la variazione di velocità nella propagazione dei due raggi di luce, lungo le diverse direzioni, avrebbe prodotto tempi di percorrenza diversi.

Nella seguente figura è mostrata schematicamente l'idea avuta da Maxwell:



I due percorsi, fra loro perpendicolari, sono di uguale lunghezza, pertanto, se i due viaggi di andata e ritorno vengono effettuati ad ugual velocità, sarà necessario lo stesso intervallo di tempo per compierli. Nel caso in cui, invece, stia soffiando un vento etereo lungo una delle direzioni, il tempo richiesto alla luce per il viaggio sarà differente sui due percorsi.

Purtroppo la misura di una simile differenza dei tempi avrebbe richiesto una precisione tale che secondo Maxwell non era realizzabile in un laboratorio terrestre, pertanto egli stesso concluse che l'esperimento era impossibile.

L'esperimento di Michelson e Morley e il crollo dell'etere stazionario

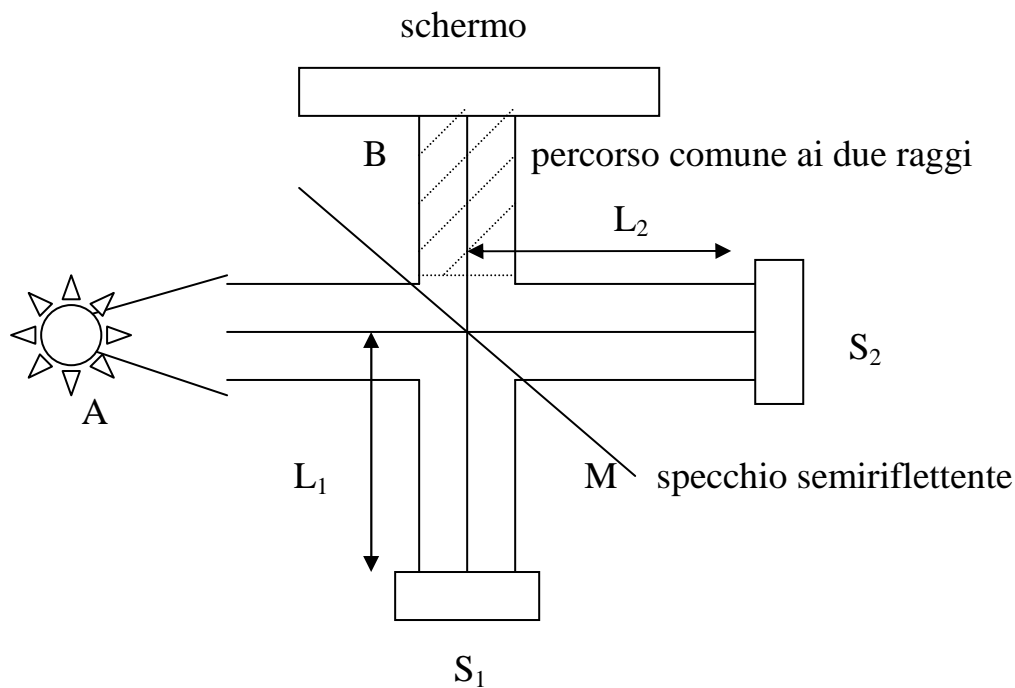
Nel **1879** Maxwell, durante l'ultimo anno della sua vita, scrisse all'astronomo David Todd, presso il Nautical Almanac Office di Washington, parlando appunto dell'impossibilità di realizzare esperimenti ottici in laboratorio che potessero servire a provare l'esistenza o meno di un mezzo etereo stazionario. La lettera attirò l'attenzione di un collega di Todd, **Albert Michelson** che aveva già realizzato, per quei tempi, la migliore misurazione della velocità della luce nell'aria.

Michelson raccolse dunque la sfida lanciata da Maxwell di effettuare l'"impossibile" esperimento ottico ed osservò che la precisione richiesta da Maxwell coincideva con il risultato dell'espressione $1/2(v/c)^2$, in cui v rappresenta proprio la velocità orbitale terrestre di 30 Km/s, ossia esattamente un decimillesimo di c .

L'intuizione geniale di Michelson fu quella di non puntare tanto l'attenzione sulla differenza nel tempo di percorrenza dei due percorsi ortogonali compiuti dai raggi luminosi, bensì sulla differenza di distanza coperta da entrambi, nel momento in cui il raggio più veloce giunge a destinazione. Utilizzando un dispositivo le cui dimensioni siano all'incirca di 20 metri, l'esperimento sarebbe dovuto essere in grado di misurare distanze di cento millesimi di centimetro, cioè di circa un quinto della lunghezza d'onda della luce visibile. Michelson pensò dunque di sfruttare la natura ondulatoria della luce ed in particolare il fenomeno dell'interferenza che permette sensibilità pari a piccole frazioni della lunghezza d'onda.

Dal 1880 al 1882 Michelson soggiornò in Europa al fine di approfondire le sue conoscenze nel campo della fisica e fu proprio durante la sua permanenza a Berlino che egli costruì il suo primo **interferometro**, grazie anche ai finanziamenti ricevuti da

Alexander Bell, ma l'apparecchiatura presentava molteplici inconvenienti di natura tecnica. L'esperimento definitivo fu realizzato nel **1887**, quando Michelson, professore alla Case School of Applied Science di Cleveland, unì le sue forze a quelle di *Edward Morley*, allora docente di chimica nella vicina Western Reserve University e si basa su un dispositivo del tipo mostrato in figura:



Un raggio luminoso emesso da una sorgente **A**, giunto sullo specchio semiriflettente **M**, in parte viene trasmesso ed in parte viene riflesso. Lo specchio semiriflettente è inclinato di 45° rispetto alla direzione di propagazione del segnale luminoso. Il raggio trasmesso torna indietro dopo essersi riflesso su se stesso sullo schermo **S2** e, dopo una seconda riflessione sullo specchio **M**, giunge su uno schermo. Analogamente, il raggio riflesso da **M** subisce una seconda riflessione sullo specchio **S1** e successivamente torna indietro, passando attraverso **M** e giungendo così anch'esso sullo stesso schermo. Tali raggi, attraversando la zona comune e sovrapponendosi, origineranno sullo schermo delle frange d'interferenza, ovvero una successione di bande di luce alternativamente chiare e scure, la cui posizione

dipenderà dalla differenza di cammino ottico e dunque dalla differenza Δt dei tempi impiegati a percorrere le relative distanze.

Naturalmente, se il sistema è fermo e la luce si muove sempre a velocità c , ruotando il dispositivo di 90° , si potranno osservare sempre le stesse frange di interferenza. Se invece si considera l'esistenza di un unico riferimento in cui la luce viaggia a velocità c , ossia quello dell'etere stazionario in cui la Terra si muove con velocità di 30 Km/s, poiché l'interferometro è solidale con la Terra, si muoverà anch'esso con velocità pari a 30 Km/s, e dunque, ruotando il sistema, sullo schermo si dovrebbe notare uno spostamento delle frange di interferenza.

Ovviamente l'ipotesi che l'interferometro si muova nell'etere con velocità $v=30$ Km/s è del tutto equivalente, da un punto di vista matematico, a considerare l'interferometro fermo e l'etere che vi scorre dentro con velocità uguale in modulo, ma di verso contrario.

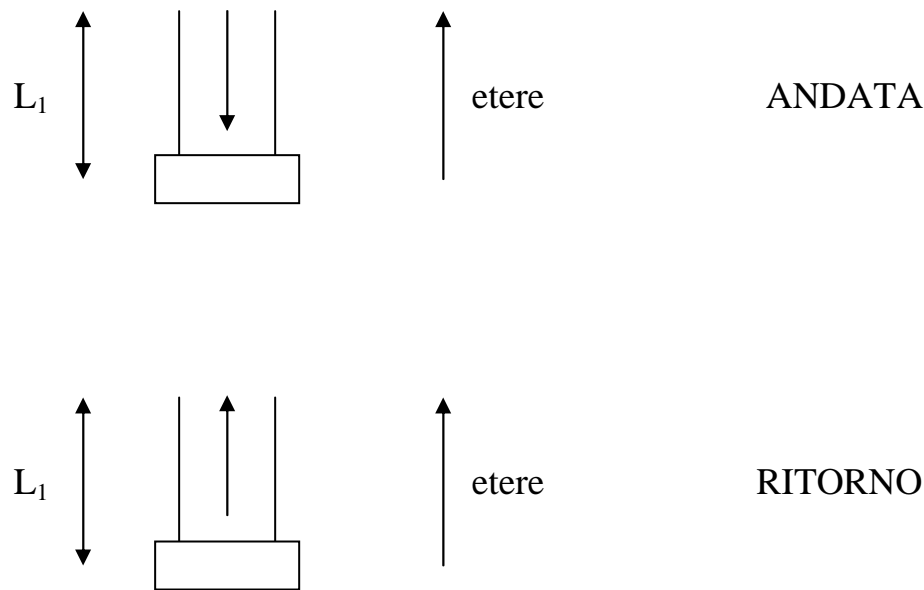
Si vuole ora stabilire la differenza di cammino ottico compiuta dai due raggi nell'attraversare l'interferometro di Michelson.

Detto t_1 il tempo impiegato dal primo raggio a percorrere, andata e ritorno, il tratto L_1 e t_2 il tempo impiegato dal secondo raggio per percorrere, andata e ritorno, il tratto L_2 , si ha che la differenza dei cammini ottici sarà

$$D = c(t_1 - t_2)$$

dove la parte comune non viene considerata, in quanto nel fare la differenza, scomparirebbe automaticamente. Ci si soffermerà dunque solo sui tratti L_1 ed L_2 percorsi rispettivamente due volte.

Il primo raggio compie il cammino L_1 che è lungo la direzione di moto dell'interferometro o, equivalentemente, supponendo fermo l'interferometro, nella direzione di moto dell'etere.



Lungo questo percorso il fotone può essere paragonato ad un nuotatore che all'andata ha la corrente contraria, mentre al ritorno ha la corrente a favore, pertanto, accettando la legge di composizione galileiana delle velocità, si ha che:

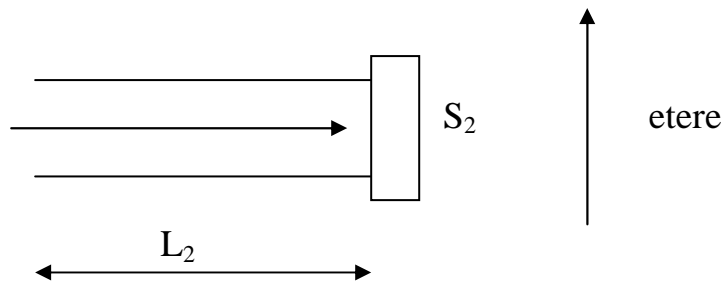
$$t_1 = t_{\text{andata}} + t_{\text{ritorno}} = \frac{L_1}{c - v} + \frac{L_1}{c + v}$$

dove il tempo di andata è dato dal rapporto tra lo spazio percorso L_1 e la differenza delle due velocità $(c-v)$, mentre il tempo di ritorno è dato dal rapporto tra lo spazio L_1 e la somma delle velocità $(c+v)$. Mettendo ora in evidenza L_1 si ottiene che:

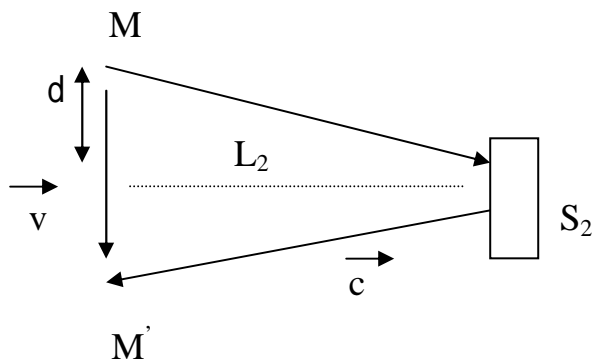
$$t_1 = \frac{L_1(c + v + c - v)}{c^2 - v^2} = \frac{2cL_1}{c^2 - v^2} = \frac{2L_1}{c \cdot (1 - \beta^2)}$$

dove si è posto $\beta = v/c$.

Si analizzerà ora il caso del raggio che percorre andata e ritorno il tratto L_2 . Apparentemente sembra che al secondo raggio luminoso non accada nulla, in quanto la velocità dell'etere risulta essere ortogonale alla sua velocità.



In realtà, stiamo assumendo che lo strumento si stia muovendo in giù attraverso l'etere, trasportando con sé anche lo specchio S_2 . Pertanto il percorso fatto dal fotone non è esattamente rettilineo, ma sarà formato dai due lati di un triangolo. Quando, infatti, il raggio parte dallo specchio semiriflettente per giungere allo specchio S_2 , l'interferometro si sarà spostato verso il basso di un certo spazio d . Quando poi il raggio viene riflesso da S_2 , lo strumento si sarà spostato ancora una volta di uno spazio pari anch'esso a d , per cui il percorso compiuto dal fotone in sostanza è quello rappresentato in figura:



Da ciò si deduce che il fotone va a velocità c lungo i lati del triangolo, mentre lo strumento si sposta con velocità v verso il basso. Si osserva subito che l'altezza di questo triangolo è esattamente uguale al percorso rettilineo L_2 , mentre d rappresenta la metà della base del triangolo ossia metà percorso compiuto dall'interferometro durante il viaggio di andata e ritorno del fotone. Con l'ausilio del Teorema di Pitagora si ottiene che:

$$\text{percorso del fotone da M ad M}' = 2 \cdot \sqrt{\delta^2 + L_2^2}$$

Il tempo impiegato dal fotone per andare da M ad M' lungo i lati del triangolo coincide proprio con il tempo impiegato dallo strumento per andare da M ad M' verso il basso attraverso l'etere con velocità \vec{v} . Pertanto:

$$t_2 = \frac{MM'}{v} = \frac{2 \cdot \delta}{v} = \frac{\text{percorsodelfotone}}{c} = \frac{2 \cdot \sqrt{\delta^2 + L_2^2}}{c}$$

Da ciò è possibile ricavare d in funzione di v e di c . Infatti:

$$\frac{2 \cdot \delta}{v} = \frac{2 \cdot \sqrt{\delta^2 + L_2^2}}{c} \quad \left\langle \quad \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + L_2^2}} = \frac{v}{c} = \beta \right.$$

Elevando al quadrato ambo i membri si ha che

$$\frac{\delta^2}{\delta^2 + L_2^2} = \beta^2 \quad \text{ñ} \quad d^2 = \beta^2 (d^2 + L_2^2) \quad \text{ñ} \quad d^2 - \beta^2 d^2 = \beta^2 L_2^2$$

$$\text{ñ} \quad (1 - \beta^2) d^2 = \beta^2 L_2^2 \quad \text{ñ} \quad d^2 = \frac{\beta^2 L_2^2}{1 - \beta^2}$$

Da ciò si ricava naturalmente d che può essere sostituita nell'espressione di t_2 . In realtà ciò che si sta facendo è semplicemente la risoluzione di un sistema di due equazioni in due incognite. Pertanto:

$$t_2 = \frac{2}{c} \cdot \sqrt{\frac{\beta^2 L_2^2}{1 - \beta^2} + L_2^2} = \frac{2}{c} \cdot \sqrt{\frac{\beta^2 L_2^2 + L_2^2 - \beta^2 L_2^2}{1 - \beta^2}} = \frac{2 \cdot L_2}{c \cdot \sqrt{1 - \beta^2}}$$

Sono dunque noti sia il tempo t_1 impiegato dal fotone a percorrere andata e ritorno il tratto L_1 , sia il tempo t_2 impiegato dal fotone nel percorrere andata e ritorno il tratto L_2 . Si osservi che l'aver usato per il calcolo di t la formula spazio / velocità discende

dal fatto che il moto dell'interferometro rispetto all'etere, o equivalentemente dell'etere rispetto all'interferometro, è rettilineo uniforme.

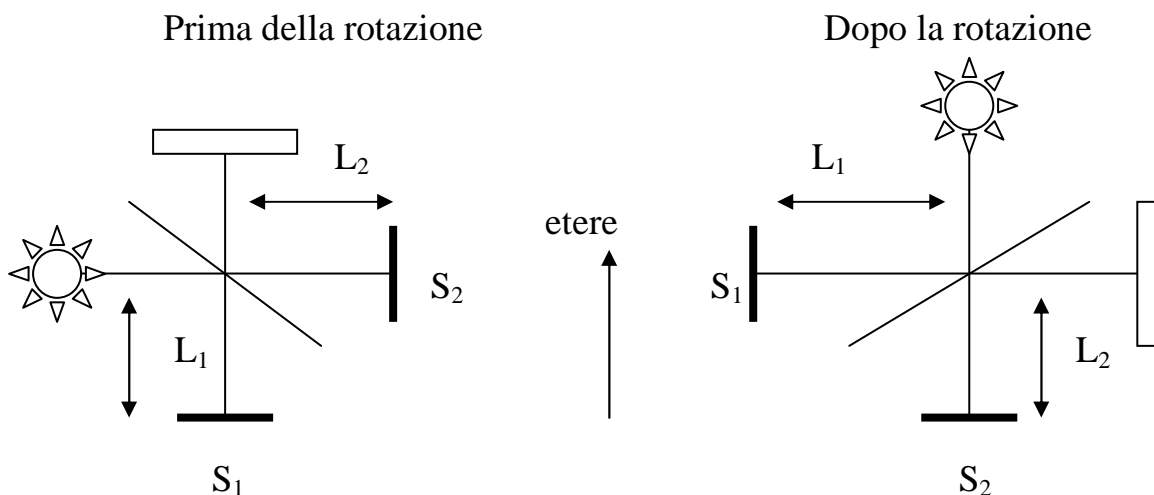
A questo punto, sostituendo i valori trovati per t_1 e per t_2 nell'espressione che fornisce la differenza tra i cammini ottici dei due raggi, si ha che:

$$D = c\dot{\gamma}(t_1 - t_2) = \frac{2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \cdot \left(\frac{L_1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - L_2 \right)$$

Essendoci una differenza di cammino ottico non nulla, si ha la certezza della presenza sullo schermo di frange di interferenza, ma ciò che interessa maggiormente è capire cosa accade alle frange quando viene fatto ruotare lo strumento di 90° . Affinché, dopo la rotazione, ci sia uno spostamento delle frange d'interferenza è necessario che si produca anche un'ulteriore differenza tra la differenza D di cammino ottico nella prima configurazione e la differenza D' di cammino ottico che si ha dopo aver ruotato lo strumento di 90° . In questo caso il numero di frange che si spostano sarà legato a tale differenza dalla relazione

$$nI = D' - D$$

dove I rappresenta la lunghezza d'onda della luce, D il cammino ottico a 0° e D' il cammino ottico a 90° , ossia nel caso in cui i due cammini ottici L_1 e L_2 sono invertiti.



Come si osserva dai disegni, dopo la rotazione, le situazioni relativamente ai due percorsi si sono completamente capovolte. Ciò implica che ora, per effetto dell'etere, il fotone viene prima ritardato e poi facilitato nel percorso lungo il cammino L_2 , mentre il fotone risulta trasversale alla direzione dell'etere lungo il cammino L_1 . Si sono dunque invertiti i ruoli di L_1 e di L_2 , per cui la nuova differenza di cammino ottico sarà:

$$D' = \frac{2}{\sqrt{1-\beta^2}} \cdot \left(L_1 - \frac{L_2}{\sqrt{1-\beta^2}} \right)$$

Sostituendo dunque le espressioni trovate per D e D' nella formula che fornisce il numero di frange spostate si ha che:

$$n = \frac{\Delta' - \Delta}{\lambda} = \frac{\frac{2}{\sqrt{1-\beta^2}} \left(L_1 - \frac{L_2}{\sqrt{1-\beta^2}} - \frac{L_1}{\sqrt{1-\beta^2}} + L_2 \right)}{\lambda}$$

Mettendo in evidenza (L_1+L_2) si trova che:

$$n = \frac{2 \cdot (L_1 + L_2)}{\sqrt{1-\beta^2}} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \right)$$

Il risultato appena trovato per n può essere ridotto ad una formula più semplice, purché ci si metta nella condizione di piccole velocità rispetto a quella della luce, ossia $v \ll c$. Nel caso considerato, la condizione sulle piccole velocità è rispettato, in quanto la Terra si muove con una velocità di 30 Km/s, molto più piccola rispetto alla velocità della luce che è pari a 300000 Km/s. Pertanto, mediante lo sviluppo in serie

di Fourier è possibile ottenere la seguente approssimazione, valida solo nel caso in cui $b \ll 1$, ossia $v \ll c$.

$$\sqrt{1-\beta^2} \approx 1 - \frac{\beta^2}{2}, \text{ mentre } \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \approx 1 + \frac{\beta^2}{2}$$

Sostituendo tale approssimazione nell'espressione trovata per n , si ha che:

$$\begin{aligned} n &= \frac{2(L_1 + L_2) \cdot \left(1 + \frac{\beta^2}{2}\right) \cdot \left[1 - \left(1 + \frac{\beta^2}{2}\right)\right]}{\lambda} = \frac{2(L_1 + L_2) \cdot \left(1 + \frac{\beta^2}{2}\right) \cdot \left(1 - 1 - \frac{\beta^2}{2}\right)}{\lambda} = \\ &= \frac{2(L_1 + L_2) \cdot \left(-\frac{\beta^2}{2} - \frac{\beta^4}{4}\right)}{\lambda} \end{aligned}$$

In tale espressione compare un termine con b^4 , ma essendo $b \ll 1$, sicuramente tale termine risulta trascurabile rispetto al termine quadratico, per cui si può anche scrivere:

$$n = -\frac{(L_1 + L_2)}{\lambda} \cdot \frac{\beta^2}{2} = -\frac{(L_1 + L_2)}{\lambda} \cdot \beta^2 = -\frac{(L_1 + L_2)}{\lambda} \cdot \frac{v^2}{c^2}$$

Mediante tale formula sarebbe dunque possibile contare quante frange si sposterebbero dopo una rotazione di 90° dell'interferometro. In realtà, Michelson e Morley, pur usando un interferometro capace di rilevare uno spostamento delle frange d'interferenza dell'ordine di 0.01 e pur ripetendo svariate volte le esperienze durante il giorno e la notte e durante le stagioni dell'anno, ***non trovarono nessuno spostamento delle frange***. La sola conclusione che se ne può trarre è che la velocità della luce non subisce alcuna influenza da parte del moto terrestre. Questo esperimento è stato successivamente ripetuto altre volte con strumenti più moderni e quindi con accuratezze molto maggiori, ma sempre con lo stesso risultato che lancia

dunque un chiaro messaggio: non esiste alcun mezzo privilegiato in cui la luce si propaga con velocità c , non esiste il riferimento privilegiato in cui valgono le equazioni di Maxwell, in definitiva *non esiste l'etere!* In realtà tale esperimento condanna solo l'ipotesi di un etere stazionario e non di un etere trascinato. Ciò nonostante l'osservazione dell'aberrazione della luce aveva già escluso da tempo anche questa ulteriore ipotesi, per cui l'unica affermazione certa è che *l'etere non esiste.*

L'ipotesi della contrazione di Lorentz e Fitzgerald

Per la difficoltà che spesso il mondo scientifico incontra nel voler accettare il crollo di una “buona” teoria e l'avvento di nuovi sviluppi, furono escogitate altre ipotesi più artificiali, secondo le quali la verità doveva risiedere nel mezzo e cioè nel fatto che l'etere potesse essere solo in parte trascinato dal moto della Terra, ma nessuna di queste teorie ha avuto un riscontro sperimentale convincente. Ciò nonostante i fisici del tempo cercarono comunque una spiegazione all'esperimento di Michelson che non stravolgesse del tutto le concezioni fisiche fino ad allora note. Fu così che nel **1892 Fitzgerald** propose un'ipotesi piuttosto singolare che fu successivamente ripresa e applicata da **Lorentz**. Essi ipotizzarono una soluzione del problema che risulta corretta da un punto di vista matematico, ma priva di significato da un punto di vista concettuale. Tale ipotesi, estremamente audace, può essere formulata in questi termini: “*Ogni corpo in moto con velocità v rispetto all'etere, si contrae lungo la direzione del moto secondo il fattore $\sqrt{1 - \beta^2}$.*”

Secondo Fitzgerald, dunque, è sufficiente supporre che mentre il fotone si muove nella stessa direzione dell'etere, il percorso da esso compiuto si contrae mediante il fattore $\sqrt{1 - \beta^2}$. Ciò naturalmente implica che il nuovo percorso non sarà più L_1 , bensì un nuovo percorso L'_1 ottenuto moltiplicando la lunghezza di L_1 per il fattore sopra considerato.

$$L_1 \longrightarrow L'_1 = L_1 \sqrt{1-\beta^2}$$

Se tale ipotesi è corretta, il risultato numerico trovato per n diventa coerente con l'esito sperimentale delle frange, osservato da Michelson e Morley.

Sostituendo infatti nell'equazione che restituisce il D l'espressione di L'_1 al posto di L_1 , si avrà che:

$$D_F = \frac{2}{\sqrt{(1-\beta^2)}} \cdot \left(\frac{L_1 \cdot \sqrt{1-\beta^2}}{\sqrt{1-\beta^2}} - L_2 \right) = \frac{2}{\sqrt{(1-\beta^2)}} (L_1 - L_2)$$

dove con il simbolo D_F si indica il cosiddetto *delta di Fitzgerald*.

Facendo poi ruotare lo strumento di 90° si dovrà ripetere lo stesso discorso anche per il percorso L_2 , in quanto dopo la rotazione il fotone andrà nella direzione dell'etere non più lungo L_1 , bensì lungo L_2 . Pertanto

$$L_2 \longrightarrow L'_2 = L_2 \sqrt{1-\beta^2}$$

e da ciò discende che:

$$D'_F = \frac{2}{\sqrt{(1-\beta^2)}} \cdot \left(L_1 - \frac{L_2 \cdot \sqrt{1-\beta^2}}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) = \frac{2}{\sqrt{(1-\beta^2)}} (L_1 - L_2)$$

Si osserva facilmente che ora la differenza tra le differenze dei due cammini ottici risulta nulla, in quanto D_F e D'_F sono uguali tra loro, pertanto $n = 0$ e tale risultato è coerente con l'esito dell'esperimento, ossia con il fatto che le frange, dopo una rotazione di 90° , non si spostano.

Sicuramente l'idea avuta da Fitzgerald e Lorentz è a dir poco geniale! Il problema però risiedeva nel fatto che non si riusciva a comprendere bene per quale ragione fisica una simile ipotesi funzionasse così bene. A tale scopo essi tirarono in ballo il concetto di urto. Se si immagina di urtare un oggetto elastico, tale oggetto si contrae, per cui Fitzgerald e Lorentz ipotizzarono che fosse proprio l'urto con l'etere a far contrarre lo strumento. Inoltre, la teoria da essi formulata presupponeva che tale

contrazione non potesse essere misurata dalla Terra, in quanto qualsiasi strumento avrebbe subito un'analogia contrazione. Pertanto, solo un osservatore a riposo nell'etere esterno avrebbe potuto osservarla.

In tal modo era possibile conservare l'idea dell'etere e ritenere che fosse proprio l'etere il responsabile della contrazione. Con il passar del tempo, però, si cominciò a notare che tale teoria non reggeva su solide basi, in quanto se ci fosse realmente stata una resistenza da parte dell'etere, essa doveva dipendere anche dalla composizione dell'oggetto. Un oggetto meno elastico avrebbe dovuto contrarsi di meno rispetto ad uno più elastico, ma ciò nella formula non compare. L'ipotetica contrazione dipende infatti solo dalla velocità con cui si muove l'interferometro, per cui ogni oggetto dovrebbe contrarsi della stessa quantità. In realtà Fitzgerald e Lorentz intuirono la soluzione che risolveva il problema, ma non ne compresero la natura. Con l'avvento della relatività ristretta di Einstein si capirà che effettivamente le lunghezze si contraggono, come avevano previsto Fitzgerald e Lorentz, ma la spiegazione fisica sarà completamente diversa. Facendo opportuni calcoli, è possibile dimostrare che la formula escogitata da Fitzgerald e Lorentz, non solo risolve analiticamente il problema, ma in più risulta essere anche l'unica formula capace di riuscirci. Ciò che è sbagliata è proprio l'interpretazione del fenomeno.

Le trasformazioni di Lorentz

Lo spostamento delle frange che si sarebbe dovuto osservare con l'esperimento di Michelson e Morley era una conseguenza dell'aver ritenuto valide le equazioni di Maxwell e le trasformazioni di Galileo e dell'aver accettato l'esistenza di un sistema di riferimento privilegiato collegato con l'etere, in cui la luce avrebbe dovuto propagarsi con velocità c . Nello studio dei percorsi compiuti dai raggi di luce all'interno dell'interferometro, le velocità erano state dunque sommate e sottratte rispettando le leggi di composizione delle velocità esposte da Galileo e valide all'interno dei fenomeni meccanici, per cui in un riferimento terrestre la luce doveva

viaggiare con una velocità compresa tra $c-v$ e $c+v$. Una simile situazione avrebbe permesso quindi di evidenziare il moto della Terra rispetto all'etere, ma gli esiti negativi dell'esperimento mostrarono l'impossibilità di rivelare tale moto. Volendo conservare le trasformazioni Galileiane, era dunque necessario pensare che le leggi dell'elettrodinamica fossero sbagliate nella formulazione data da Maxwell, ma l'esperienza continuava a confermare in pieno la validità di tali equazioni. L'unica strada possibile era dunque quella di modificare le trasformazioni di Galileo, cercando delle nuove leggi, rispetto alle quali le quattro equazioni di Maxwell risultassero invarianti. Nel **1899**, **Lorentz**, nel tentativo di dedurre dalla sua ipotesi della contrazione il principio di relatività, formulò quelle che oggi sono note come **trasformazioni di Lorentz**, ma che furono già ricavate nel 1887 da **Voigt**, in uno studio ancora fondato sulla teoria elastica della luce.

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{x' + v_0 t'}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}} \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \frac{t' + \frac{v_0}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} v_x = \frac{v'_x + v_0}{1 + \frac{v_0}{c^2} v'_x} \\ v_y = \frac{v'_y \sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}{1 + \frac{v_0}{c^2} v'_x} \\ v_z = \frac{v'_z \sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}{1 + \frac{v_0}{c^2} v'_x} \end{array}$$

Da tali formule si evince che il tempo non è più assoluto, come credeva Newton, bensì cambia da un sistema ad un altro, seguendo le trasformazioni suddette. Inoltre, come si può osservare, anche le velocità si trasformano in maniera diversa rispetto alla legge di composizione galileiana. Ciò nonostante, lo stesso Lorentz non comprese fino in fondo il significato fisico di tali trasformazioni, poiché era restio ad accettare l'idea di abbandonare la teoria dell'etere.

L'abbandono dell'etere e l'avvento della relatività ristretta di Einstein.

Il passaggio veramente importante fu compiuto nel **1905** da **Albert Einstein** con l'abbandono sia dell'ipotesi dell'etere, sia di quella della contrazione di Fitzgerald e Lorentz. Analizzando i risultati sperimentali ottenuti fino ad allora, egli formulò una nuova teoria, nota come **relatività ristretta**, che rinnova radicalmente la visione dei fenomeni fisici, pur conservando taluni principi fondamentali della fisica classica.

Afferma Einstein: *“L'essenziale è di sbarazzarci da pregiudizi profondamente radicati e spesso invocati senza previa disanima. [...] Dobbiamo avere il coraggio di attaccare il solo punto palesemente debole, vale a dire le modalità della trasformazione per il passaggio da un riferimento ad un altro.”*

Poiché dall'esito dell'esperimento di Michelson e Morley non era stato possibile evidenziare il moto della Terra rispetto all'etere, Einstein ne dedusse che non esiste un sistema di riferimento privilegiato con proprietà particolari, per cui le leggi della fisica dovevano essere le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali, ossia in moto rettilineo uniforme l'uno rispetto all'altro. Naturalmente, se non esiste un tale sistema privilegiato in cui la velocità della luce è pari a $c=300000 \text{ Km/s}$, ma tale valore continua ad essere presente nelle equazioni di Maxwell, l'unica possibilità è che ogni osservatore, nel misurare la velocità della luce, sia costretto a misurare sempre c , in qualsiasi riferimento si trovi.

I due grandi postulati su cui si basa la nuova teoria della relatività ristretta possono essere formulate come segue:

- 1) *“Tutte le leggi della natura sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento in moto uniforme gli uni rispetto agli altri”*
- 2) *“La velocità della luce, nel vuoto, è la stessa in tutti i sistemi di riferimento, in moto uniforme gli uni rispetto agli altri.”*

Questi due principi, esposti da Einstein nella sua prima memoria del 1905, *“Sull'elettrodinamica dei corpi in moto”*, sono strettamente correlati l'uno con l'altro. Se si vuole che i fenomeni elettromagnetici possano essere studiati con la meccanica classica, deve essere vero il postulato di relatività galileiano; viceversa, se il postulato è vero, la velocità della luce deve essere indipendente dal moto della sorgente e dell'osservatore. Einstein conserva dunque il principio di relatività di Galileo, ma rinnega le trasformazioni classiche su cui erano basati i calcoli fatti per l'esperimento di Michelson e Morley, sostituendole con le nuove trasformazioni di Lorentz, rispetto alle quali le quattro equazioni di Maxwell risultano invarianti. Si apre quindi la strada ad una nuova fisica che stravolge completamente i concetti classici di spazio e di tempo, portando notevoli sviluppi in diversi ambiti scientifici.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *M. Born, La sintesi einsteiniana*, Universale Scientifica Boringhieri, 1969

- [2] *A. Caforio - A. Ferilli, Fisica*, Le Monnier, 1989

- [3] *A. Einstein - L. Infeld, L'evoluzione della fisica*, Universale Boringhieri, 1965

- [4] *L. Geymonat, Storia del pensiero filosofico e scientifico*, Garzanti

- [5] *G. Reale, Aristotele*, Editori Laterza

- [6] *J. Schwinger, L'eredità di Einstein*, Zanichelli Editore, 1988