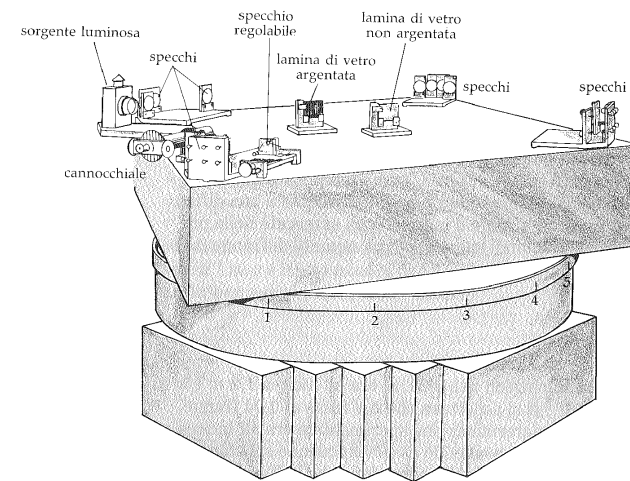


Marco Savarese

L'ESPERIMENTO DI MICHELSON



la mia trasformazione del tempo solo come una ipotesi di lavoro euristica, di modo che la teoria della relatività è davvero solo opera di Einstein.

Mentre Einstein nella teoria della relatività ristretta (1905) assume come postulato¹³ fondamentale la costanza della velocità della luce Lorentz giustificava questa evidenza sperimentale come conseguenza delle modificazioni che subivano gli strumenti di misura quando cambiava il loro stato di moto rispetto al sistema di riferimento assoluto (cioè quello in cui l'etere è in quiete).

Bibliografia

- A. Pais - "Sottile è il Signore..." - Boringhieri, 1986
- P. A. Tipler - *Invito alla fisica* - Zanichelli, 1991
- G. Cortini - *La relatività ristretta* - Loescher, 1978
- G. Castelfranchi - *Fisica moderna* - Hoepli, 1946
- V. Silvestrini - *Guida alla teoria della relatività ristretta* - Editori Riuniti, 1982
- R. Resnick - *Introduzione alla relatività ristretta* - Ambrosiana, Milano, 1976

13. Sarebbe meglio usare la parola principio, postulato si usa in matematica.

Se in t_1 sostituiamo ad L il valore L' otteniamo

$$t_1 = \frac{2L'}{c} \frac{1}{1-v^2/c^2} = \frac{2L}{c} \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \frac{1}{1-v^2/c^2} = \frac{2L}{c} \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = t_2$$

L'ipotesi può apparire *ad hoc* e piuttosto artificiosa, ma Lorentz la spiegava ipotizzando che le forze di coesione della materia fossero essenzialmente di natura elettrica e quindi il movimento attraverso l'etere poteva modificare le posizioni di equilibrio degli atomi.

L'evoluzione delle teorie prerelativistiche

Per comprendere l'evoluzione delle cosiddette teorie prerelativistiche dobbiamo afferrare il significato del punto di partenza di Lorentz sull'interpretazione dell'esperimento di Michelson. Lorentz assume che le equazioni di Maxwell siano valide in un solo sistema di riferimento privilegiato, quello in cui l'etere è fermo¹². Ma allora come trascrivere le equazioni per un altro sistema in moto rispetto al primo? Lorentz si rende conto del fatto che ogni modifica nella forma di queste equazioni comporta che negli altri sistemi di riferimento le leggi sperimentali dell'elettromagnetismo siano diverse; da ciò segue la possibilità di rivelare lo stato di moto rispetto all'etere. Ma, pensa Lorentz, se tutti gli esperimenti volti a rivelare lo stato di moto della Terra rispetto all'etere hanno dato esito negativo vorrà dire che esistono delle trasformazioni che lasciano inalterate le equazioni di Maxwell.

Nel 1904 Lorentz scrive in forma definitiva queste trasformazioni che oltre a coinvolgere le coordinate spaziali, per garantire il risultato corretto, prevedono una trasformazione anche per il tempo. Ribadiamo che Lorentz le ricava come quelle particolari trasformazioni che lasciano invariate le equazioni di Maxwell nel passaggio da un sistema di riferimento ad un altro in moto rettilineo uniforme rispetto al primo. Eccole:

$$\begin{cases} x' = \gamma(x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma(t - \frac{v}{c^2}x) \end{cases} \quad \text{dove} \quad \gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

Lorentz non attribuì significato fisico a t' (che ricordiamo è il tempo nel sistema in moto con velocità v rispetto all'etere); lo chiamò *tempo locale* e come scrive egli stesso anni dopo la pubblicazione della teoria della relatività

Era necessaria una trasformazione del tempo, cosicché introdussi il concetto di tempo locale, che risulta diverso per sistemi di riferimento in moto relativo l'uno rispetto all'altro. Ma non pensai mai che questo avesse niente a che fare con il tempo reale. Questo tempo reale per me era ancora rappresentato dalla più antica nozione di classica di tempo assoluto, indipendente da ogni riferimento. Esisteva per me un solo tempo vero. Consideravo

12. Abbiamo visto per esempio che proprio la forza di Lorentz non è invariante per trasformazioni di Galileo. Infatti pensiamo ad una particella carica che si muove parallelamente ad un filo indefinito percorso da corrente; essa nel sistema di riferimento in cui il filo è fermo è soggetta ad una forza (di attrazione o repulsione verso il filo, dipende dal verso della corrente e dal segno della carica) mentre se ci mettiamo a cavallo della particella la carica non è soggetta a nessuna forza e prosegue indisturbata.

1. L'esperimento di Michelson

Nel 1873 Maxwell ricava dalle sue celebri quattro equazioni che le onde elettromagnetiche si propagano con una velocità pari a:

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

dove ϵ_0 è la costante dielettrica del vuoto ($8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m) e μ_0 è la permeabilità magnetica del vuoto ($4\pi \cdot 10^{-7}$ N/A²). Il valore risulta proprio uguale a quello della velocità della luce¹. Il trionfo della teoria ondulatoria della luce è eclatante: l'ottica diventa un capitolo dell'elettromagnetismo.

Si noti però che nell'espressione della velocità non c'è nulla che ci dica in quale sistema di riferimento la luce avrà questo valore; si pensava che questa fosse la velocità rispetto al suo mezzo naturale: l'etere. Sembrava infatti inconcepibile ai fisici dell'ottocento che la luce e le altre onde elettromagnetiche, contrariamente a tutti gli altri tipi di onde, potessero propagarsi in assenza di un mezzo. Maxwell è così profondamente convinto dell'esistenza di una qualche sorta di etere che nel 1878 alla voce Ether per la 9ª edizione dell'Enciclopedia Britannica scrive:

Non ci può essere alcun dubbio che gli spazi interplanetari e interstellari non siano vuoti ma occupati da una sostanza o corpo materiale che è certamente il più vasto e probabilmente il più uniforme di cui abbiamo una qualche conoscenza².

A pensarci bene però l'etere possedeva proprietà alquanto insolite. Per esempio doveva avere densità quasi nulla e una perfetta trasparenza per rendere conto del fatto che non si riusciva a rivelarlo. Inoltre era anche estremamente rigido³ in modo da permettere la trasmissione delle velocissime onde luminose ma allo stesso tempo i pianeti riuscivano ad attraversarlo senza alcuna resistenza.

Dato per scontato che l'etere comunque *doveva* esistere un altro problemino non banale era: l'etere è fermo⁴ oppure si muove insieme alla Terra? L'ipotesi più accreditata era che l'etere fosse fermo rispetto alle stelle fisse⁵. Questa ipotesi (Fresnel, 1818) era avvalorata dal fenomeno dell'aberrazione stellare⁶ che non si sarebbe verificato in caso di etere solidale con la Terra. Il fenomeno consiste nel fatto che, a causa della velocità della Terra, una stella che sarebbe allo zenit se la Terra fosse ferma in

1. La velocità della luce viene misurata indirettamente per la prima volta da Roemer nel 1685 osservando le occultazioni e le emersioni dei satelliti di Giove; egli ottiene il valore di 214.000 Km/s. La prima misura "terrestre", su un percorso di andata e ritorno relativamente breve è dovuta a Fizeau (1849); gli fa passare un raggio di luce attraverso i denti di una ruota dentata in rotazione, ottiene il valore di 313.000 Km/s. Foucault nel 1862 con lo specchio rotante 298.000 Km/s.

2. Il brano si trova anche in: A. Einstein - *Relatività: esposizione divulgativa* - Boringhieri, 1967 (pag. 279).

3. Sappiamo che più il mezzo è rigido più le onde vanno veloci (nel ferro le onde sonore vanno più veloci che nell'aria).

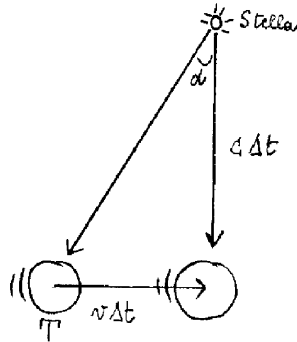
4. Ovviamente fermo rispetto alle stelle fisse. L'aggettivo fermo in assoluto non significa nulla.

5. Oggi sappiamo che non sono fisse perché l'universo è in espansione.

6. L'aberrazione della luce fu osservata per la prima volta da Bradley nel 1727. Egli osservò che le stelle riferite a coordinate astronomiche fisse rispetto alla Terra sembrano animate di moto circolare su orbite il cui diametro è di circa 41 secondi di grado.

realtà si osserva sotto un angolo α . Infatti:

$$v\Delta t = c\Delta t \cdot \operatorname{tg}\alpha \Rightarrow \operatorname{tg}\alpha = \frac{v}{c} \quad [\text{un cateto è uguale all'altro per la tangente dell'angolo opposto}]$$



In definitiva ai tempi di Maxwell si pensava che la Terra si muovesse attraverso un etere stazionario e quindi era possibile in linea di principio rivelare il cosiddetto vento d'etere.

Prima di procedere ulteriormente calcoliamo la velocità di rotazione della Terra su se stessa e di rivoluzione intorno al Sole: ci servirà per capire quale sensibilità sia necessaria per un esperimento che voglia rivelare il vento d'etere. Sia T il periodo e R il raggio della Terra, per la rotazione alle nostre latitudini (42°) si ha:

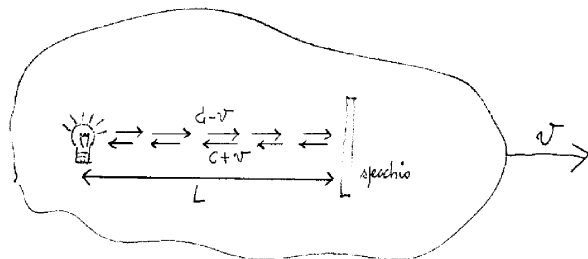
$$v_{rot} = \frac{2\pi R \cdot \cos(42)}{T_{rot}} = \frac{2\pi \cdot 6,38 \cdot 10^6 \cdot \cos(42)}{60 \cdot 60 \cdot 24} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 3,4 \cdot 10^2 \text{ m/s}$$

troppo poco in confronto a $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. La velocità di rivoluzione dovrebbe essere maggiore:

$$v_{riv} = \frac{2\pi D_{TS}}{T_{riv}} = \frac{2\pi \cdot 1,49 \cdot 10^{11}}{60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 3,0 \cdot 10^4 \text{ m/s}$$

circa cento volte più grande ma sempre quattro ordini di grandezza inferiore a quella della luce.

Tutti i procedimenti per misurare la velocità della luce consistevano a quei tempi nel determinare il tempo necessario ad un raggio di luce per arrivare ad uno specchio e tornare indietro. Sia L la distanza fra specchio e sorgente. Se specchio e sorgente si muovono entrambi con velocità v attraverso l'etere è ragionevole pensare che all'andata la luce si propaghi con velocità $c-v$ e al ritorno con velocità $c+v$.



Sperimentatore	Anno	Luogo	L (metri)	Spostamento atteso	Max spostam. osservato
Morley e Miller	1902	Cleveland	32,3	1,13	0,015
Miller	1921	Mt. Wilson	32,0	1,12	0,08
Illigworth	1927	Pasadena	2,0	0,07	0,0004
Michelson	1929	Mt. Wilson	25,9	0,9	0,010

Benché l'evidenza sperimentale fosse indiscutibile Michelson rimase sempre scettico nei confronti della teoria della relatività ristretta che purtroppo comportava la scomparsa dell'etere. Un vero genio quando aveva a che fare con problemi di strumentazione e sperimentazione non fu mai a suo agio con la relatività. Nel discorso in occasione dell'attribuzione del premio Nobel nel 1907 non citò Einstein e i suoi pregiudizi verso la nuova teoria perdureranno fino alla morte; pregiudizi tipici dei fisici sperimentali di stampo ottocentesco. Come scrive Planck nella sua autobiografia scientifica

Una nuova verità scientifica si afferma non perché i suoi oppositori si convincono e vedono la luce, ma piuttosto perché uno alla volta essi muoiono, e subentra una nuova generazione a cui fin dall'inizio i nuovi concetti risultano familiari.

Anche Michelson non si convinse¹¹ mai della nuova verità scientifica e l'aristotelico *horror vacui* lo accompagnò fino alla fine. Ecco cosa sostenne ancora nel 1927 nel trattato *Studies in Optiks* in cui è costretto a citare la Relatività Ristretta e le trasformazioni di Lorentz

L'esistenza di un etere appare inconsistente con la teoria della Relatività. Ma senza un mezzo come si può spiegare la propagazione delle onde luminose? [...] Come spiegare la costanza della velocità di tale propagazione (uno dei due postulati fondamentali della Relatività Ristretta) se non c'è alcun mezzo?

La spiegazione di Lorentz

Una "spiegazione" dell'esito dell'esperimento di Michelson e Morley fu data indipendentemente dal fisico irlandese Fitzgerald e dallo stesso Lorentz nel 1892. Essi fecero osservare che i risultati negativi potevano spiegarsi ammettendo che il braccio dell'interferometro in moto attraverso l'etere nel senso del movimento della Terra (quello orizzontale) si fosse accorciato. Precisamente dalla lunghezza L doveva ridursi a

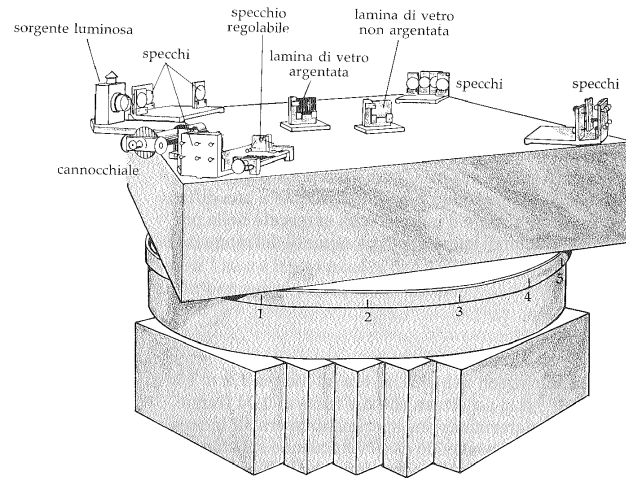
$$L' = L \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Infatti abbiamo ottenuto per t_1 e t_2 i valori

$$t_1 = \frac{2L}{c} \frac{1}{1 - v^2/c^2}; \quad t_2 = \frac{2L}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

11. Anche in Italia il nostro Augusto Righi guardò con scetticismo la relatività ristretta e sottopose ad una severa critica l'interpretazione dell'esperimento di Michelson. Nel 1920 scrive: "È da ritenersi che, se l'esperienza di Michelson non fosse stata inventata, oppure se non fosse mai stata formulata l'ingannevole illusione di quel certo spostamento di frange, a nessuno verosimilmente sarebbe passata per la mente l'ipotesi della contrazione, e nessuno neppure avrebbe pensato al principio di Relatività ed a scuotere così certe idee fondamentali intuitive, le quali forse, in fondo, come ogni intuizione, non sono altro che logiche conseguenze inconsiamente dedotte dal bagaglio intellettuale accumulato dalla razza dopo secoli di osservazioni e di razionale impiego dell'umana intelligenza." (A. Righi, *Sulle basi sperimentali della teoria della relatività*, in "Nuovo Cimento", XIX (1920), p. 142 - in G. Bruzzaniti, *Enrico Fermi*, Einaudi, 2007, p. 126)

strumento era tale che si sarebbe potuto mettere in evidenza uno spostamento di appena 1/100 di frangia. Furono eseguite osservazioni durante il giorno e la notte (in quanto la Terra ruota intorno al proprio asse) e durante tutte le stagioni dell'anno (in quanto la Terra gira intorno al Sole), ma non fu rilevato nulla di nulla. La conclusione sperimentale fu categorica: *non c'era alcun spostamento di frange*.



L'interferometro di Michelson – Morley

Questa volta Lorentz, Kelvin, Rayleigh furono costretti loro malgrado ad accettare il risultato: doveva esserci allora qualcosa di sbagliato nella teoria dell'etere. Nel 1892 Lorentz chiedeva a Rayleigh: "È possibile che vi sia nella teoria dell'esperimento di Michelson qualche punto che finora è stato trascurato?" Kelvin, in una famosa conferenza tenuta il 27 Aprile 1900 parla dell'esperimento di Michelson "effettuato con la più attenta cura per garantire un risultato affidabile" come di "una nube" della fisica del 19° secolo sulla teoria dinamica della luce. Nel 1904 ancora Kelvin scriverà nella prefazione alle lezioni di Baltimora

Michelson e Morley, con il loro grande lavoro sperimentale sul moto dell'etere rispetto alla Terra hanno sollevato l'unica obiezione seria contro le nostre spiegazioni dinamiche della luce.

Il risultato nullo dell'esperimento di Michelson fu un tale colpo per l'ipotesi dell'etere che Michelson lo eseguì più volte fino al 1929 (mori due anni dopo). Altrettanto fecero altri fisici soprattutto Dayton C. Miller già assistente di Michelson. L'esito fu sempre negativo. Ecco un breve elenco:

Sperimentatore	Anno	Luogo	L (metri)	Spostamento atteso	Max spostam. osservato
Michelson	1881	Postdam	1,2	0,04	0,02
Michelson e Morley	1887	Cleveland	11,0	0,4	0,01

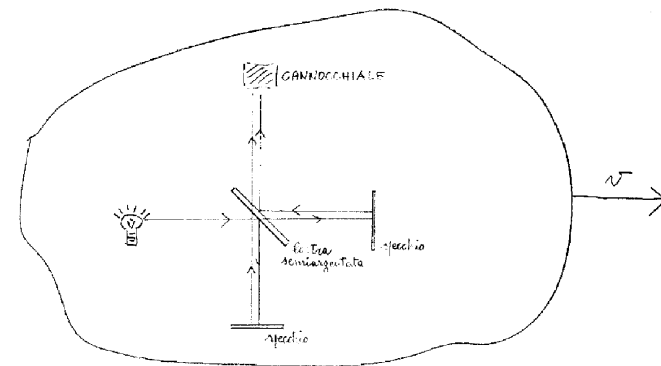
l'etere, ma anche dalla velocità variabile della terra rispetto all'etere.

Quant'è il tempo impiegato dalla luce per andare e tornare? Evitate il grossolano errore di pensare che il tempo sia lo stesso visto che all'andata va più lenta, al ritorno più veloce e quindi facciamo pari e patta. Il tempo totale impiegato infatti è:

$$t_1 = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v} = L \frac{c+v+c-v}{c^2-v^2} = \frac{2L \cdot c}{c^2-v^2} = \frac{2L}{c} \frac{1}{1-v^2/c^2}$$

Questa espressione differisce dal tempo $2L/c$ per un fattore $(1-v^2/c^2)^{-1}$ che per $v = 3 \cdot 10^4$ m/s è molto vicino ad 1, vale⁷: $(1-10^{-8})^{-1} \approx 1+10^{-8} = 1,00000001$. La correzione dovuta al moto della Terra è davvero molto piccola. È un cosiddetto effetto al secondo ordine perché dipende dal quadrato di v . Con gli strumenti di allora sembrava del tutto improbabile poterlo misurare direttamente.

Nell'Agosto 1881 compare sull'*American Journal of Science* un articolo di Albert Abraham Michelson, ricercatore presso il laboratorio Helmholtz a Berlino⁸, un esperto ormai riconosciuto a livello mondiale in fatto di misure della velocità della luce. In questo articolo Michelson pubblica i risultati compiuti con un sensibilissimo strumento da lui progettato che è ora noto come interferometro di Michelson. L'idea è che l'effetto al secondo ordine benché estremamente piccolo può essere apprezzato mediante una misura differenziale. Il metodo consiste nel confrontare i tempi impiegati dalla luce per percorrere la stessa distanza in direzione parallela e perpendicolare al moto della Terra rispetto all'etere. Il disegno seguente riproduce schematicamente l'interferometro.



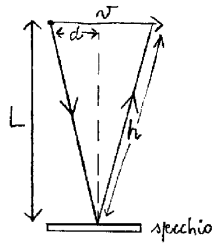
Se esistesse un etere stazionario i tempi di percorrenza dei due raggi sarebbero stati differenti; in particolare il raggio parallelo sarebbe arrivato in ritardo rispetto a quello perpendicolare. L'effetto al secondo ordine si poteva quindi rivelare facendo interferire i due raggi e osservando le frange di interferenza. Vediamo nel dettaglio come: nel braccio dell'interferometro che si muove in direzione del moto attraverso l'etere abbiamo visto che la luce impiega ad andare e tornare il tempo:

$$t_1 = \frac{2L}{c} \frac{1}{1-v^2/c^2}$$

7. serie binomiale: $1/(1+x) = 1 - x + x^2 - x^3 \dots$

8. Gli esperimenti vengono eseguiti presso l'osservatorio astronomico nei pressi di Postdam in modo da evitare gli effetti delle vibrazioni urbane.

Il percorso della luce nell'altro braccio è un cammino attraverso l'etere perpendicolare al cosiddetto vento d'etere in quanto il fascio ritorna sulla lastra semiargentata (che sta avanzando).



Sia t_2 il tempo necessario alla luce per andare e tornare si avrà ovviamente, dato che l'interferometro si muove con velocità v

$$2d = vt_2 \quad [1]$$

ma t_2 è anche uguale a:

$$t_2 = \frac{2h}{c}$$

Inoltre per il teorema di Pitagora

$$h = \sqrt{L^2 + d^2}$$

quindi

$$t_2 = \frac{2h}{c} = 2 \frac{\sqrt{L^2 + d^2}}{c}$$

moltiplichiamo per $c/2$ e sostituiamo al posto di d l'espressione $vt_2/2$ ottenuta dalla [1]

$$\frac{c}{2} t_2 = \sqrt{L^2 + \frac{v^2 t_2^2}{4}}$$

quadrato e raccogliamo: $\frac{c^2 t_2^2}{4} = L^2 + \frac{v^2 t_2^2}{4} \Rightarrow \frac{c^2 - v^2}{4} t_2^2 = L^2$

Risolvendo rispetto a t_2^2 ed estraendo la radice si ha:

$$t_2 = \sqrt{\frac{4L^2}{c^2 - v^2}} = \frac{2L}{c} \sqrt{\frac{c^2}{c^2 - v^2}} = \frac{2L}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Si noti che t_2 è stato calcolato nel riferimento dell'etere mentre t_1 nel riferimento dell'apparato. È qui il cuore del problema: in fisica classica il tempo è *assoluto*, scorre cioè egualmente per tutti gli osservatori; il procedimento a prima vista sembra lecito (Einstein nel 1881 ha solo 2 anni).

La differenza fra i tempi di transito è:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2L}{c} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \frac{1}{1 - v^2/c^2} \right)$$

Supponiamo che lo strumento venga ruotato di 90° , allora i cammini si scambiano e si ha:

$$\Delta t' = t_2' - t_1' = \frac{2L}{c} \left(\frac{1}{1 - v^2/c^2} - \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right)$$

Quindi la rotazione cambia le differenze di:

$$\Delta t' - \Delta t = \frac{4L}{c} \left(\frac{1}{1 - v^2/c^2} - \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right)$$

Usando lo sviluppo binomiale⁹ e trascurando i termini di ordine superiore al secondo, si ha:

$$\Delta t' - \Delta t \cong \frac{4L}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2} - 1 - \frac{v^2}{2c^2} \right) = \frac{2L}{c} \frac{v^2}{c^2}$$

Quindi la rotazione dovrebbe causare uno spostamento della figura d'interferenza, poiché essa cambia la relazione di fase fra i due fasci. Se la differenza di cammino ottico fra i fasci varia di una lunghezza d'onda per esempio, ci sarà uno spostamento di una frangia attraverso un riferimento posto nel telescopio di osservazione. Sia ΔN il numero di frange che passano per l'origine di questo riferimento durante lo spostamento della figura. Allora, se la lunghezza d'onda della luce usata è λ , di modo che il periodo sia $T = \lambda/c$,

$$\Delta N = \frac{\Delta t' - \Delta t}{T} \cong \frac{2L}{\lambda} \frac{v^2}{c^2}$$

Con un cammino di 1,2 m (sola andata) e utilizzando luce gialla di lunghezza d'onda $0,59 \cdot 10^{-6}$ m otteniamo:

$$\Delta N = \frac{2L}{\lambda} \frac{v^2}{c^2} = \frac{2 \cdot 1,2 \text{ m}}{0,59 \cdot 10^{-6} \text{ m}} \cdot 10^{-8} \approx 0,04$$

Come tutti sanno l'esito dell'esperimento è negativo e Michelson nell'articolo del 1881 conclude che "l'ipotesi di un etere stazionario risulta contraddetta dai fatti e se ne deve necessariamente concludere che l'ipotesi stessa è erronea". La comunità scientifica però si dimostra restia ad accogliere questo importantissimo risultato, Lorentz per esempio avanza nel 1886 molte perplessità sull'esperimento e in particolare sull'interpretazione dei dati.

Nell'Agosto 1887 Michelson, sollecitato da questa fredda accoglienza, ripeté l'esperimento in collaborazione con il chimico Edward W. Morley, a Cleveland negli Stati Uniti. Questa volta, per rendere il cammino della luce più lungo possibile dispone degli specchi in modo da far percorrere ai raggi, con successive riflessioni, otto percorsi di andata e ritorno per un totale di 22 metri. Monta l'interferometro su una massiccia lastra di arenaria di un metro e mezzo di lato facendola galleggiare in una vasca contenente 400 Kg di mercurio in modo da poterla ruotare dolcemente intorno ad un perno centrale. Con un tale apparato, utilizzando sempre luce gialla, lo spostamento previsto sarebbe stato dieci volte superiore (0,4 frange).

Le frange venivano osservate durante la rotazione¹⁰ continua del dispositivo e la sensibilità dello

9. $\left(\frac{1}{1-x} \right) \cong 1+x$; $\frac{1}{\sqrt{1-x}} \cong 1 + \frac{x}{2}$

10. Il risultato dell'esperimento dipende in modo essenziale dalla rotazione di 90° dell'interferometro. Nel fare previsioni sullo spostamento delle frange, abbiamo preso per v la velocità della terra rispetto ad un etere fisso rispetto al sole. Tuttavia lo stesso sistema solare potrebbe essere in moto rispetto all'ipotetico etere. Effettivamente, i risultati sperimentali stessi determinano la velocità della terra rispetto all'etere, se ne esistesse effettivamente uno e questi risultati danno $v=0$. Ora se ad un certo istante la velocità fosse zero in questo etere, non ci si dovrebbe aspettare naturalmente alcun spostamento di frange. Ma la velocità non può essere sempre zero, poiché la velocità del dispositivo cambia dal giorno alla notte e da stagione a stagione. Perciò, l'esperimento dipende non solo dalla velocità "assoluta" della terra attraverso