



OSSERVAZIONI CRITICHE
CIRCA L'EFFICACIA DIMOSTRATIVA
DELL'ESPERIMENTO DI KENNEDY (*)

(Con una figura)

MARIO GALLI

SUMMARY. — Auctor demonstrare vult quosdam hypotheses, quibus solent physici uti in interpretando experimento a MICHELSON olim peracto, non necessario praesupponi, si experimenta MICHELSON et a KENNEDY facta inter se recta ratione (quae hic describitur) conferantur eorumque exitus recto examini subiciatur. Ex quo patet communem physicorum conclusiones novo efficaciore argumento confirmari.

1. — Qualche articolo apparso recentemente ha tentato di infirmare la validità dell'esperimento di MICHELSONE MORLEY (1). La pubblicazione non ha provocato polemiche soprattutto per il fatto che la teoria della relatività è ormai considerata al riparo da ogni obbiezione. Una messa a punto dovuta ad A. METZ pubblicata in « Revue d'Optique » (2) mette in rilievo il fatto che le nuove critiche non presentano nulla di nuovo rispetto a quelle pubblicate in passato e che furono a suo tempo ampiamente discusse. Veramente a noi risulta che lo spirito informatore delle note apparse recentemente sia alquanto diverso, con la differenza peraltro che le critiche del passato, dovute talvolta, a fisici sommi, mettevano in risalto (sia pure esagerandolo) un punto realmente debole nel ragionamento di MICHELSON e MORLEY, gli arti-

(*) Nota presentata dall'Accademico Pontificio S. E. Giuseppe Armellini il 16 maggio 1952.

(1) J. SIVADJIAN, « Revue Philosophique ». Genn. 1950, p. 72; « Revue d'Optique », v. 30 (1951), pag. 323.

(2) G. RAMBAUD, *Ether et Relativité*. Valence sur Rhône (1950).

(3) A. METZ, « Revue d'Optique », v. 31 (1952), pag. 124.

coli recenti insistono su un equivoco che non ci appare degno di molta considerazione. In sostanza impugnano ciò che è evidente.

Per conseguenza con questa nota non abbiamo alcuna intenzione di sottoporre ad analisi critica le recenti pubblicazioni nè vogliamo riassumere e confutare le critiche del passato. Queste critiche sono assai numerose ed una critica estesa costituirebbe un problema di scarsa attualità ⁽¹⁾.

Noi riteniamo che le critiche rivolte in passato contro l'efficacia dimostrativa dell'esperimento di MICHELSON siano confutabili mediante un esame accurato di esse. Tuttavia non ci risulta che si sia procurato di eliminare tali dubbi, invece con un'analisi critica, mediante una opportuna variazione dello stesso esperimento di MICHELSON. Ciò è stato fatto, ma non intenzionalmente, nel 1932 da KENNEDY e THORNDYKE ⁽²⁾. Infatti lo scopo diretto di questi sperimentatori era diverso, come vedremo tra poco. A noi sembra tuttavia che l'esperimento medesimo sia idoneo a dissipare i dubbi che illustri fisici sollevarono contro la validità dell'esperimento di MICHELSON. Riteniamo anzi che mediante l'esperimento di KENNEDY ci si possa rendere indipendenti dalla postulazione del principio di HUYGHENS-FRESNEL, che è utilizzato sia dai sostenitori che dagli avversari. E questo costituisce indubbiamente un vantaggio non disprezzabile.

2. - Per quanto, come abbiamo già dichiarato, non intendiamo riassumere e confutare le critiche del passato, è necessario, in ordine agli scopi prefissi, rievocare alla mente lo spirito informatore di tali critiche.

⁽¹⁾ Sono degni di particolare menzione i seguenti lavori: W. SUTHERLAND, « Phil. Mag. », 45 (1898) pag. 23; « Nature », v. 63 (1900), pag. 23; W. H. HICKS, « Phil. Mag. », v. 3 (1902), pag. 9, 256, 566; E. KOHL, « Ann. d. Phys. », v. 33 (1910), pag. 186; A. RIGHI, « Nuovo Cimento », v. 16 (1918), pag. 213; v. 18 (1919), p. 91, v. 19 (1920), pag. 141; v. 21 (1921).

Per le critiche che si concludono in senso favorevole si può utilmente consultare: M. v. LAUE, « Ann. d. Phys. », v. 33 (1910), pag. 186; « Phys. », Zeits, v. 13 (1912), pag. 501; J. VILLEY, « C. R. », 170 (1920), pag. 1175; 171 (1920), pag. 298; A. METZ, « C. R. » 178 (1924), pag. 314, 1275; G. VALLE, « Nuovo Cimento » 2 (1925), pag. 39, 171; R. J. KENNEDY, « Phys. Rev. », 47 (1935), pag. 965.

⁽²⁾ R. J. KENNEDY, « Phys. Rev. », 42 (1932), pag. 400.

Nel ragionamento di MICHELSON e MORLEY c'è effettivamente un punto debole. Supponiamo infatti di considerare il fenomeno dal punto di vista dell'osservatore mobile, cioè solidale con l'interferometro supposto in moto rispetto all'etere. MICHELSON e MORLEY presuppongono implicitamente che il cammino geometrico dei raggi interferenti sia il medesimo che si avrebbe se la terra fosse ferma rispetto all'etere. Tuttavia si può dimostrare mediante una rigorosa applicazione del principio di HUYGHENS-FRESNEL che tale supposizione non è del tutto esatta ⁽¹⁾. L'angolo di riflessione su uno specchio mobile non dovrebbe coincidere con quello previsto mediante le ben note leggi elementari, ma dovrebbe differirne alquanto. La differenza peraltro (se valutata dall'osservatore mobile) dovrebbe essere molto piccola e precisamente dell'ordine di grandezza di $(v/c)^2$. Poichè nel valutare la differenza di fase delle onde interferenti bisogna tenere conto dei termini di quest'ordine di grandezza, sembra che l'approssimazione di MICHELSON e MORLEY non sia lecita. A. RIGHI, ad esempio, ritiene che, se si tiene conto del valore esatto dell'angolo di riflessione, non si dovrebbe avere lo spostamento di frange previsto da MICHELSON.

A tutte queste critiche, a nostro avviso, si può rispondere vittoriosamente. Aggiungiamo peraltro che, quando si vuole tenere conto del valore esatto dell'angolo di riflessione, i calcoli diventano in ogni caso molto complicati, e per conseguenza, anche quando si conclude in favore della conclusione generalmente accettata, poco persuasivi. Purtroppo è tanto facile in memorie molto lunghe, dove i calcoli sono assai involuti, introdurre nascostamente qualche errore. Ciò è infatti accaduto ⁽²⁾.

⁽¹⁾ Si confrontino a questo riguardo le già citate memorie di KOHL e RIGHI.

⁽²⁾ Le memorie scritte a questo scopo sono molto ponderose. Per capire che è facile errare nell'esecuzione di calcoli lunghi e complicati (a parte il giudizio sui criteri adottati) valgano i seguenti esempi. La memoria dianzi citata di HICKS comprende 32 pagine; eppure conclude con un paradosso. Secondo questo autore, per spiegare l'esito negativo dell'esperimento di MICHELSON bisognerebbe ammettere una dilatazione dei corpi nella direzione del movimento. L'errore fu poi riconosciuto dallo stesso autore dietro segnalazione di H. M. MACDONALD. [Cfr. «Nature», v. 45, p. 343 (1902)]. RIGHI (se ci riferiamo solo alle note pubblicate sul «Nuovo Cimento») ha scritto in complesso quasi un centinaio di pagine. Ma secondo VALLB, vi sarebbero alcune sviste nei calcoli, correggendo le quali si riesce a prevedere lo stesso spostamento calcolato da MICHELSON.

A ciò si aggiunga poi, per quanto possa apparire a prima vista paradossale, che i calcoli così impostati sono anche incompleti. La critica del RIGHI, per quanto sotto molti rispetti debba considerarsi assai accurata, è infondata in quanto è male impostata.

La figura di interferenza che egli considera, non ha nulla a che vedere con quella considerata da MICHELSON. RIGHI, e con lui molti altri, si limitano a considerare un'onda piana che incida sulla lamina semiargentata facendo con la normale un angolo di 45° e qui si divide in due onde rispettivamente trasmessa e riflessa, e successivamente considerano le frange di interferenza che darebbero queste due onde dopo riflessione sui due specchi dell'interferometro supposti orientati in modo da formare tra loro un angolo uguale o prossimo a 90° . Anche semplificando in questo modo il problema, i calcoli sono abbastanza lunghi. Ma la figura considerata da MICHELSON è ben diversa. Essa risulta dall'interferenza (dopo alcune riflessioni) di infinite onde piane che incidono sulla lamina semiargentata con angoli diversi (sebbene il vettore di propagazione di ciascuna di esse sia contenuto entro un angolo solido $\Delta\omega$ piccolissimo). Il calcolo delle figure di interferenza che ne deriva, se eseguito con metodo di RIGHI, sarebbe assolutamente proibitivo. Bisogna a questo scopo agire come ha agito MICHELSON, supporre cioè che il cammino geometrico (rispetto all'osservatore mobile) non sia variato. Ciò fatto, è naturalmente doveroso chiedersi se l'approssimazione adottata è lecita. La risposta è affermativa. Infatti un errore dell'ordine di grandezza di $(v/c)^2$ nell'apprezzamento degli angoli implica un errore di ordine superiore al secondo, perciò trascurabile, nella valutazione del ritardo di fase ⁽¹⁾. Tuttavia le critiche menzionate proiettano qualche ombra sulla chiarezza del ragionamento elementare che si fa abitualmente. Questo non è così semplice come appare a prima vista. Si basa, almeno implicitamente, su approssimazioni il cui uso occorre giustificare.

In ogni caso l'entità delle approssimazioni adottate è valutata (sia dai fautori che dagli avversari dell'efficacia probativa dell'esperimento di MICHELSON) conformemente alle esigenze del principio di HUYGHENS-FRESNEL. Sebbene a questo principio non si possano muovere obie-

(1) Cfr. R. J. KENNEDY, « Phys. Rev. », 47 (1935), pag. 965.

zioni fondate, tuttavia esso costituisce un presupposto che è (nel caso attuale) alquanto discutibile. Ed infatti:

a) O esso si introduce come un postulato, come si fa nei trattati elementari di ottica.

b) Oppure si giustifica con la teoria elettronica di LORENTZ.

Nel primo caso esso può essere giustificato solo a posteriori, mediante la congruenza delle conseguenze da esso dedotte con la realtà concreta. Ma si deve tenere presente che, quando si deve tenere conto di termini di second'ordine in $(v/c)^2$ l'entità dell'effetto è molto inferiore all'approssimazione conseguibile in circostanze ordinarie. Non si può dire che il successo dell'applicazione del principio di HUYGHENS si estenda tanto oltre da garantire la correttezza di previsioni così delicate. Nel secondo caso è per lo meno falso quanto si asserisce da taluni, che cioè i principi sui quali si fonda l'esperimento di MICHELSON concernono solamente la propagazione della luce nel vuoto e non il comportamento (che potrebbe essere alquanto oscuro) della materia in moto.

A noi sembra che sarebbe molto opportuno modificare (se possibile) lo stesso esperimento di MICHELSON, in modo da eliminare l'incognita che getta qualche ombra su di esso: la legge della riflessione su specchi in moto. Eliminare del tutto ogni riflessione non è possibile. Ma si può fare in modo che l'incognita (l'angolo esatto di riflessione) non pregiudichi alle previsioni teoriche. Ciò è consentito, a nostro avviso, da un uso appropriato dell'esperimento di KENNEDY, nel modo che vedremo.

3. - Il dispositivo adoperato nell'esperimento di KENNEDY è l'interferometro di MICHELSON ma con l'importante differenza che qui i bracci sono disuguali. La teoria elementare dell'esperimento di MICHELSON è troppo nota perchè occorra soffermarci ad illustrarla. Tuttavia vogliamo riepilogarla brevissimamente con l'unico scopo di fare intendere il funzionamento dell'esperimento di KENNEDY. Siano A e B due punti rigidamente collegati (sia ad esempio, A un punto della lamina semiargentina e B un punto di uno degli specchi riflettenti). Tutto l'apparecchio si sposti nell'etere con velocità v . Sia φ l'angolo che

formano i due vettori $(B - A)$ e v . Allora si dimostra che il tempo occorrente alla luce per il doppio percorso $\overline{AB} + \overline{BA}$ è dato dalla formula:

$$[1] \quad \tau_{AB} = \frac{2 l_{AB}}{c} \frac{\sqrt{1 - \beta^2 \sin^2 \varphi}}{1 - \beta^2}$$

Questo tempo viene così a dipendere dalla velocità $|v|$ e dall'angolo φ . Nell'esperimento di MICHELSON si tenta di verificare la dipendenza da φ , confrontando i tempi di percorso di due lunghezze uguali formanti un angolo ψ che è generalmente di 90° .

La differenza ⁽¹⁾

$$[2] \quad \tau_{AB} - \tau_{AC} = \frac{2l}{c} \frac{\sqrt{1 - \beta^2 \sin^2 \varphi} - \sqrt{1 - \beta^2 \cos^2 \varphi}}{1 - \beta^2}$$

dovrebbe variare orientando diversamente sul piano orizzontale tutto l'apparecchio. È ben noto invece che non si è mai riusciti a constatare questa previsione.

Questo esito negativo si spiega ammettendo la contrazione di LORENTZ. In conseguenza: $l = l' \sqrt{1 - \beta^2 \cos^2 \varphi}$

$$\sin \varphi = \frac{\sin \varphi'}{\sqrt{1 - \beta^2 \cos^2 \varphi'}}$$

Quindi

$$[3] \quad \tau = \frac{2l'}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Da cui:

$$[4] \quad \tau_{AB} - \tau_{AC} = 0$$

Il compenso però non avviene se i bracci dell'interferometro sono disuguali, ossia se $l_{AB} \neq l_{AC}$

Sia Δl la differenza. Allora:

$$[5] \quad \tau_{AB} - \tau_{AC} = \frac{2 \Delta l}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

⁽¹⁾ Supponiamo che il vettore v giaccia nel primo definito dalle due rette parallele ai vettori $(B - A)$ e $(C - A)$.

In questo caso si dovrebbe avere spostamento di frange dipendente solo da $|v|$.

La verifica di questa conseguenza è immensamente più difficile.

Non giova infatti in questo caso rotare l'apparecchio di un angolo φ qualunque, poichè $\tau_{AB} - \tau_{AC}$ non dipende dall'orientazione dell'apparecchio.

Bisogna confrontare le fotografie della figura d'interferenza ottenute con lo stesso apparecchio in identiche condizioni fisiche ed in istanti diversi, quando presumibilmente la velocità assoluta è cambiata. L'operazione è difficile per due ragioni.

a) È arduo garantire la conservazione delle stesse condizioni fisiche per un lungo periodo di tempo, ad esempio, parecchi mesi, fino a tal segno che gli inevitabili errori di osservazione siano inferiori al previsto spostamento di frange.

b) la distanza Δl non può essere fatta troppo grande (nell'esperienza di KENNEDY era solo di circa cm. 30) perchè in caso diverso sparisce la visibilità delle frange.

Queste difficoltà sono tuttavia superabili, come si può vedere nel citato articolo di KENNEDY.

4. - Come abbiamo fatto osservare, KENNEDY presupponeva esistente la contrazione di LORENTZ, e voleva col suo esperimento mettere in evidenza il rallentamento relativistico degli orologi.

Ma l'esperimento si presta anche ad altre applicazioni. Supponiamo infatti di ignorare la contrazione di LORENTZ. In tal caso la formula assegnante lo spostamento di frange sarebbe:

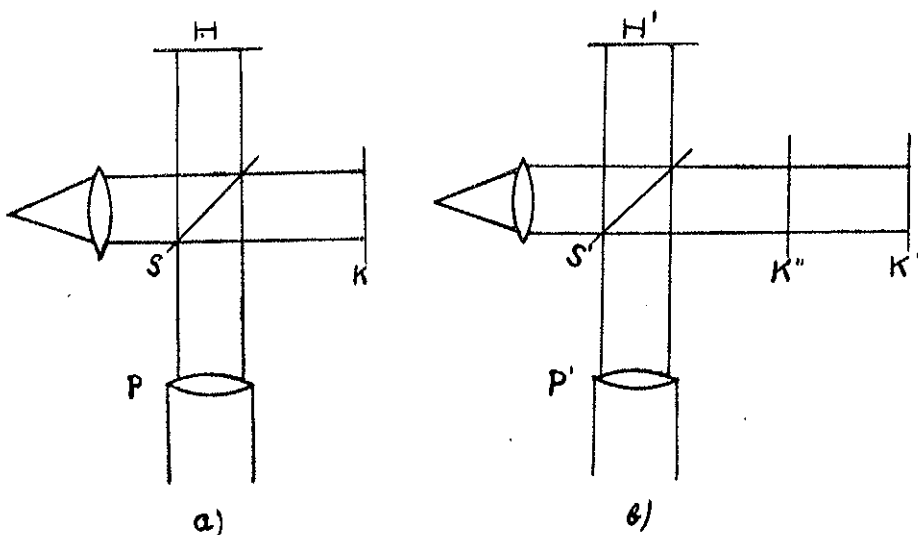
$$[1] \quad \tau_{AB} - \tau_{AC} = \frac{2}{c} \frac{l_{AB} \sqrt{1 - \beta^2 \sin^2 \varphi} - l_{AC} \sqrt{1 - \beta^2 \cos^2 \varphi}}{1 - \beta^2}$$

Queste formole presuppongono sempre che le leggi della riflessione siano quelle normali. Ma supponiamo di non volere fare un atto di fede nel principio di HUYGHENS-FRESNEL.

Il mancato spostamento di frange, quando i bracci dell'interferometro sono uguali, si potrebbe attribuire, secondo RIGHI, al fatto che l'angolo di riflessione non è quello previsto da MICHELSON e MORLEY

nei loro calcoli. Quantunque, vogliamo ripeterlo, il dubbio possa essere eliminato mediante un'analisi accurata dei ragionamenti che fanno gli oppositori, tuttavia concediamo pure che ciò sia possibile.

Il dubbio può essere superato, rendendoci inoltre indipendenti da qualunque ipotesi, realizzando un esperimento differenziale nel modo seguente:



In figura sono schematizzati due interferometri. L'interferometro b) differisce dall'interferometro a) in quanto lo specchio K' è più distante da S' che non K da S.

Per giudicare della differenza di comportamento dei due apparecchi basta notare che in ambedue i casi i cannocchiali P e P' fanno convergere nel piano focale dell'obbiettivo, una infinità di onde piane il cui vettore di propagazione è compreso entro un angolo solido $\Delta\omega$ piccolissimo. In entrambi i casi le onde elementari, prima di entrare nel cannocchiale, hanno lo stesso vettore di propagazione. Infatti, qualunque siano le leggi della riflessione, questa deve avvenire esattamente allo stesso modo nei due casi. Infatti, l'angolo di incidenza che le corrispondenti onde elementari formano con le omologhe superfici riflettenti dei due apparecchi non può non essere uguale.

L'unica diversità è costituita dalla differenza di fase. Infatti (prima di entrare nell'obbiettivo del cannocchiale) le onde elementari (tra-

smesse dalle lamine semiargentate S ed S') hanno percorso un cammino geometrico diverso, corrispondente alla doppia distanza tra K" e K'.

Ciò posto, supponiamo di volere da principio sperimentare con l'apparecchio *a*). Ammettiamo pure che con questo non debba attendersi alcun spostamento di frange quando si fa rotare l'apparecchio di 90° ovvero quando si ripete l'esperimento in un tempo diverso, quando la velocità assoluta $|v|$ è verosimilmente cambiata. Qualunque sia il motivo, l'esperienza ci dice che non si ha spostamento di frange.

Ma questo implica (qui risiede essenzialmente la forza della nostra argomentazione), che ripetendo esperimenti consimili con l'apparecchio *b*) l'eventuale spostamento di frange può essere previsto ignorando completamente il cammino comune e considerando solo il cammino supplementare.

La cosa è del tutto evidente nel caso particolare che nei due esperimenti la velocità sia normale allo specchio K' ma sia diversa in valore assoluto. In questo caso le onde che seguono il cammino SK' + K'S' dovrebbero giungere all'obbiettivo del cannocchiale con un ritardo dato da: $\frac{2 \Delta l}{c} \frac{1}{1 - \beta^2}$. Qui la considerazione del vero angolo di riflessione non può avere alcuna importanza.

Da queste considerazioni emerge chiaramente che il fatto di avere avuto esito negativo tanto sperimentando nella forma *a*) che nella forma *b*) dimostra sicuramente l'insufficienza della cinematica classica. Questo doppio insuccesso non può essere spiegato in alcun modo in base ad una presunta ignoranza del vero angolo di riflessione. Inoltre ci si rende realmente indipendenti da qualunque ipotesi concernente il comportamento della materia e la sua interazione con la radiazione elettromagnetica.