

GLI ESPERIMENTI DI MICHELSON E MORLEY

(I più importanti esperimenti *non riusciti* della fisica moderna)

1. La situazione.

Nell'Ottocento **Fresnel** aveva avanzato la *teoria ondulatoria della luce*, abbandonando la più antica *teoria corpuscolare* (che verrà poi ripresa da **Einstein** nei suoi studi sull'effetto fotoelettrico).

La teoria di Fresnel postula l'esistenza dell'*etere cosmico* come mezzo di propagazione delle onde luminose. Il ragionamento, non privo di una sua logica, è pressappoco il seguente : se i raggi luminosi sono *onde*, simili alle onde del mare, devono pur far *ondulare* qualcosa, un mare invisibile : l'*etere* appunto, definito perciò *luminifero*.

Nella seconda metà del secolo J.C. **Maxwell** assimilò i fenomeni elettromagnetici a quelli luminosi, formulando la *teoria elettromagnetica della luce*.

In questo contesto Maxwell elaborò un *concetto o modello (pattern) fisico* fondamentale, quello di *campo elettromagnetico*, non più inteso solo a livello grafico bensì considerato come realtà fisica, come *campo di forze* (in cui la semplice presenza di una massa e di una carica modifica lo spazio attorno a sé).

In seguito Maxwell definì anche le *equazioni fondamentali* che spiegano le proprietà del campo elettromagnetico e in sostanza consentono di calcolare la propagazione delle onde elettromagnetiche (in cui è compresa anche la luce) : tali proprietà possono essere sintetizzate mediante *quattro leggi*, note appunto come *equazioni di Maxwell*, che regolano quindi i fenomeni elettromagnetici.

A questo punto una domanda logica e conseguente che si posero i fisici fu la seguente: *premesso che le leggi della meccanica risultano **invarianti** nei riguardi delle trasformazioni di Galileo, lo sono anche le leggi dell'elettromagnetismo espresse dalle equazioni di Maxwell?*

Detto in altri termini: esiste e vale un principio di relatività anche per i fenomeni elettromagnetici (come per quelli meccanici)? O no?

O ci sono, cioè, nel mondo fisico due settori distinti, con leggi fisiche differenti: i fenomeni meccanici da una parte e i fenomeni elettromagnetici dall'altra?

Questo interrogativo era più antico di quanto si potesse pensare, veniva addirittura dalla Grecia classica. In modo semplice, quasi una specie di indovinello, si può esprimere nella forma seguente: esiste qualcosa che si possa chiamare *moto assoluto* ? Oppure tutti i moti sono relativi ?

Ora l'**etere**, che pervade tutto l'universo, poteva costituire questo *riferimento assoluto*, un SR [= sistema inerziale] inerziale in quiete assoluta (non semplicemente relativa a qualche altro SR).

La questione si era posta, in modo analogo, anche per le leggi della meccanica moderna: le sue leggi, formulate da Galileo e confermate da Newton, si intendono valide per tutti i SR inerziali, sistemi cioè che si muovono di moto rettilineo uniforme in uno *spazio assoluto*.

Ma che cos'è propriamente e che cosa si intende fisicamente per *spazio assoluto*?

[Il problema da *fisico* poteva anche diventare *filosofico* [cfr. la concezione dello *spazio* in Newton, Leibniz, Kant].

La questione restava aperta, non sufficientemente determinata dal punto di vista scientifico, anche se poi in definitiva era necessario pensarla esistente tale spazio assoluto - almeno secondo Newton - quale contenitore di tutto ciò che avviene, di tutti gli eventi fisici.

Ora: l'etere poteva essere interpretato in questo senso?

(Per non parlare poi di un *tempo assoluto*, che scorre in maniera uguale e uniforme in questo spazio assoluto. Anche questo *tempo assoluto* nella fisica di Newton occorre ammettere,

senza prove. Ma questa sarà l'altra grossa questione al centro della futura *teoria della relatività ristretta o speciale*.)

Un ulteriore problema in gioco riguardava la **velocità della luce**, che costituiva un vero e proprio enigma.

Si sapeva che nel vuoto la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche luminose corrispondeva a circa 300.000 km/sec. Ma valeva anche per la luce quanto stabilito dalle trasformazioni galileiane circa la somma algebrica delle velocità?

[Esempio: una scala mobile. Se si sale stando fermi su un gradino, si impiega ovviamente più tempo di quanto ce ne vuole a compiere il percorso salendo per la scala mentre questa si muove: in questo secondo caso infatti le due velocità, della scala mobile e della persona, si sommano. Ma lo stesso avviene anche per un flash di luce emesso verso l'alto, nel senso di salita della scala ?]

Tra le altre cose, era anche questo che **Michelson e Morley** con il loro esperimento intendevano chiarire.

2. L'esperimento.

Senza entrare nei dettagli tecnici relativi all'**interferometro**, lo strumento genialmente ideato¹ da **Michelson** e poi usato nei suoi esperimenti², basterà qui dire che esso si basava sul fenomeno dell'*interferenza*.

Si trattava di uno strumento sensibilissimo in grado di misurare la minima variazione della velocità di propagazione di un raggio luminoso.³

In particolare, una rotazione dell'apparecchiatura ottica sul suo asse avrebbe dovuto necessariamente produrre uno spostamento nella figura di interferenza, in quanto - secondo le trasformazioni di Galileo, per cui le velocità sono additive - la velocità del raggio luminoso che si propagava nel senso dello spostamento della Terra nello spazio attraverso l'etere (pari a circa 30 km/sec.) sarebbe dovuto essere necessariamente un po' maggiore (300.000 km/sec. + 30 km/sec.) rispetto a quella del raggio che si propagava in senso opposto.

Insomma, **Michelson** col suo famoso esperimento si aspettava di verificare fondamentalmente tre cose.

I) L'esistenza dell'**etere**, quale SR in quiete assoluta.

II) Il **moto della Terra** e la sua **velocità assoluta rispetto all'etere** (non semplicemente relativa, per esempio rispetto al Sole).

III) La **variazione** della velocità di propagazione di un raggio luminoso, a seconda della direzione verso cui veniva emesso.

L'articolo scientifico in cui Albert **Michelson** espose per la prima volta il suo brillante progetto sperimentale risale al 1881 e fu pubblicato nell'*American Journal of Sciences* col titolo "**The Relative Motion of Earth and the Luminiferous Ether**". Un successivo articolo, scritto assieme ad un altro fisico suo amico che stava collaborando con lui, Edward William **Morley**,

¹ **Albert Michelson** fu il primo fisico americano ad avere l'onore di ottenere il Premio Nobel.

² La descrizione di come era fatto e di come funzionava si trova in qualsiasi manuale di fisica. Per esempio : CAFORIO, FERILLI, *Physica*, vol.2, Le Monnier, pp.357-362.

³ In breve. Un raggio emesso da una sorgente luminosa veniva poi diviso in due da uno specchio semitrasparente: una parte proseguiva in linea retta, l'altra parte veniva riflessa e deviata ad angolo retto; i due raggi erano poi riflessi da due specchi tornando indietro, dopo aver percorso distanze uguali lungo i due bracci dell'interferometro; di nuovo lo specchio semitrasparente parte li rifletteva e parte li trasmetteva in linea retta; pertanto nella direzione del punto di interferenza finivano per propagarsi due raggi emessi dalla stessa sorgente ma che avevano seguito percorsi ottici diversi (per cui, appunto, *interferivano*, creando le caratteristiche *frange di interferenza*).

Ora la minima variazione di uno dei due cammini ottici avrebbe prodotto uno spostamento sensibile degli *anelli* o *frange* dell'interferenza, variazione immediatamente e facilmente rilevabile.

e pubblicato sulla medesima rivista, avrebbe dovuto fornire le prove sperimentali decisive (che ancora mancavano).

L'esperimento fu realizzato la prima volta alla fine dello stesso 1881, riprodotto poi con maggior precisione e accuratezza grazie alla collaborazione di Morley nel 1884, ripetuto diverse volte negli anni successivi dagli stessi ideatori e da altri fisici : ma il risultato fu sempre, invariabilmente, negativo. (In qualsiasi posizione si facesse ruotare l'interferometro, le frange di interferenza non subivano alcuna, sia pur minima, variazione.)

Michelson pubblicò le sue conclusioni, ma era molto deluso (e piuttosto sconcertato). Aveva sperato ardentemente di essere il primo a rilevare il moto della Terra attraverso l'etere, nonché di risolvere finalmente l'enigma dello strano comportamento della velocità della luce (a cui erano assimilabili, secondo la teoria, tutti gli altri fenomeni elettromagnetici).

L'effetto nullo dei ripetuti, accuratissimi esperimenti di Michelson e Morley sbalordì e sconcertò non solo i loro autori (che si ostinarono a ripetere più e più volte l'esperimento⁴, sempre senza successo), ma addirittura l'intera comunità scientifica.

I paradossi erano due.

Il primo riguardava l'etere. Qui i fisici si trovarono davanti ad una scelta disperata: o rinunciavano alla sua esistenza, ma allora non sapevano più come spiegare la propagazione delle onde elettromagnetiche; oppure ammettevano l'esistenza dell'etere, ma in questo secondo caso dovevano addirittura rigettare la rivoluzione copernicana e accettare l'immobilità della Terra! (Dal momento che questa, in base ai risultati sperimentali ricavabili dall'interferometro, non appariva assolutamente in movimento rispetto all'etere.)

Il secondo paradosso concerneva l'incredibile *invarianza* della velocità della luce, in qualsiasi direzione si muovesse la sorgente di emissione.

E ciò appariva, se possibile, ancora più inspiegabile e misterioso.

Insomma, stando alle concezioni fisiche vigenti e comunemente accettate, non si sapeva cosa fare per uscire dall'*impasse* e giustificare, sulla base della teoria, il risultato nullo dei ripetuti esperimenti.

3. Tentativi di spiegazione per uscire dall'*impasse*.

Michelson, più degli altri, non si poteva rassegnare.

Egli era disposto ad ammettere perfino che tutto l'etere dell'universo fosse trascinato dalla Terra nel suo moto! (Per cui, allora, la Terra sarebbe apparsa - come risultava dall'esperimento - in quiete relativa rispetto all'etere.)

Il bello è che tale ipotesi *alternativa*⁵, nota come *ipotesi di trascinamento dell'etere*, - per quanto potesse apparire, ad una considerazione oggettiva e spassionata, alquanto fantasiosa - venne effettivamente e seriamente avanzata, in un primo tempo, perché era in grado di spiegare i risultati negativi dell'esperimento senza abbandonare l'ipotesi dell'etere.⁶

⁴Michelson e Morley pensavano di aver commesso un qualche errore, di non aver compreso fino in fondo la situazione sperimentale, per cui la presenza di qualche variabile (ritenuta a torto irrilevante) contribuiva a falsare poi l'esito sperimentale. Uno degli ultimi tentativi, particolarmente accurato e condotto in condizioni ritenute ottimali, fu realizzato all'inizio del nuovo secolo a Chicago: per l'occasione i due fisici chiesero e ottennero dal sindaco della città che tutto il traffico urbano (tramway, carrozze, carri, veicoli di ogni genere) fosse sospeso per la durata dell'esperimento.

⁵Tipico esempio di "*ipotesi ad hoc*", secondo Karl **Popper**, in quanto elaborata non sulla base di risultanze sperimentali o per esigenze teoriche strutturali, bensì in modo strumentale per mettere d'accordo in qualche modo l'esperimento con la teoria esistente.

⁶Si suppose - in sostanza - che tutti i corpi *massivi* (cioè dotati di massa) avessero la proprietà di *trascinare con sé*, nel loro moto nello spazio, l'etere stesso. In questo caso ogni corpo si troverebbe automaticamente in riposo rispetto all'etere, e ciò spiegherebbe l'effetto nullo dell'esperimento di Michelson e Morley.

Com'è facile intuire, tale ipotesi, sottoposta al vaglio della critica da parte della comunità scientifica, si dimostrò ben presto inconsistente e fu accantonata.

Allora un fisico irlandese poco noto, George **Fitzgerald**, propose un'altra spiegazione, in apparenza ancora più fantasiosa, sulla base del seguente ragionamento: l'effetto dell'esperimento di Michelson e Morley sarebbe nullo (come in effetti si era sempre rivelato), ammettendo che ogni oggetto in moto, e quindi anche l'apparecchiatura di cui si compone l'interferometro, subisce una *contrazione* nel senso del suo moto, contrazione che diventa tanto maggiore quanto più la velocità dell'oggetto si avvicina a quella della luce. Ovviamente - continuava Fitzgerald per rispondere in anticipo alle obiezioni - la contrazione a cui sono sottoposti gli oggetti che si spostano attorno a noi, con una velocità comunque sempre molto inferiore a quella della luce, sarebbe del tutto trascurabile e quindi impossibile da percepire e rilevare.

Com'era facile forse prevedere, ma con grande disappunto e dispetto da parte di Fitzgerald, la maggior parte degli scienziati accolse la sua idea con ilarità.

Senonché nel 1892 il grande fisico olandese Hendrik Antoon **Lorentz** giunse per conto proprio ad una conclusione analoga. E poiché Lorentz era considerato allora il massimo specialista mondiale della teoria elettromagnetica, a lui fu dato più credito.

Negli anni seguenti Lorentz continuò a studiare con accanimento quest'idea della *contrazione degli oggetti in moto*, calcolando esattamente il *coefficiente di contrazione*⁷ che si doveva applicare per giustificare l'invarianza della velocità della luce.

Finalmente nel 1904 **Lorentz** pubblicò un'importante memoria, dal titolo "**Fenomeni elettromagnetici in un sistema che si muove con una velocità inferiore a quella della luce**", nella quale spiegava teoricamente e matematicamente l'influenza esercitata sui fenomeni ottici ed elettrici (per esempio, sulla velocità di propagazione della luce) dal movimento, attraverso il grande mare d'etere, di un sistema di riferimento come la Terra stessa, che si muove con una certa velocità nel momento in cui tali misurazioni vengono compiute.

Lorentz era pienamente consapevole delle difficoltà incontrate dalla teoria dominante.

Anzi - come abbiamo visto - era stato proprio il fallito tentativo di Michelson di individuare l'effetto che dovrebbe esercitare il moto della Terra sulla misura della velocità della luce - effetto previsto dalla teoria, molto piccolo (qualcosa come 30 km/sec. in più o in meno rispetto a 300.000 km/sec.), ma preciso e perfettamente misurabile dall'interferometro - ad indurre Lorentz, e prima di lui Fitzgerald, ad adottare un'ipotesi speciale per eliminare la discrepanza tra teoria ed esperimento: ipotesi secondo la quale le dimensioni di tutti i corpi, compresi gli strumenti di misurazione, fossero modificate dal loro stesso movimento attraverso l'etere in modo da rendere nulla la misura prevista. Tale ipotesi è nota come *contrazione di Lorentz-Fitzgerald*.

In questa prospettiva **Lorentz** riuscì anche ad elaborare un nuovo importante strumento concettuale, le cosiddette *trasformazioni di Lorentz*, secondo le quali la velocità della luce è una costante (**c**) mentre subiscono variazioni, in base alla velocità, la lunghezza, la massa e il tempo.

Tali trasformazioni venivano pertanto a sostituire quelle di Galileo, almeno per i fenomeni elettromagnetici, visto che le equazioni di Maxwell risultavano invarianti non per le trasformazioni classiche ma appunto per quelle di Lorentz.

A questo proposito è interessante ricordare che, negli anni in cui si discuteva animatamente delle conseguenze e delle possibili spiegazioni dell'effetto nullo degli esperimenti di Michelson e Morley, si arrivò perfino a ipotizzare che il principio di relatività meccanica,

⁷È il cosiddetto **fattore di Lorentz** pari a $1 - v / c$. Tale fattore risulta quasi nullo per velocità molto inferiori a quella della luce; è invece sensibile per velocità vicine a **c**.

Da ciò si verifica altresì che la velocità della luce nel vuoto è una velocità limite: infatti, se $v > c$, la radice sarebbe immaginaria (radicale a denominatore negativo).

dovendo essere valido anche per le equazioni dell'elettromagnetismo, implicasse un'errata formulazione delle stesse da parte di Maxwell e che occorresse pertanto procedere alla loro revisione.

Nel suo saggio del 1904 Lorentz riconosce alla fine che ricorrere all'invenzione di ipotesi speciali (per quanto rigorose e congruenti) per ogni nuovo risultato sperimentale è, tutto sommato, un po' artificioso.

In conclusione, tuttavia, l'ipotesi formulata da Lorentz riusciva a conciliare in modo soddisfacente teoria ed esperimento, conservando l'idea di etere.

4. Conclusione.

Gli esperimenti di Michelson e Morley, dunque, erano sempre regolarmente falliti, ma non per questo venivano archiviati senza lasciar traccia: anzi - più di qualsiasi altro tentativo sperimentale, forse, nella storia della fisica - si stavano dimostrando capaci di sollevare interrogativi e stimolare risposte feconde.

A questo punto il *puzzle* non era risolto, ma almeno - per così dire - tutti i pezzi erano stati sparsi sul tavolo.

Spetterà al genio di **Einstein** l'anno dopo, nel 1905, compiere la coerente e illuminante ricomposizione facendo sì che ogni pezzo trovasse la sua giusta collocazione nella *teoria della relatività speciale*.