

La fisica dei primi decenni del Novecento

Sarebbe semplice ricostruire le dinamiche del pensiero scientifico e filosofico dal Seicento all'Ottocento che portarono alla nascita di una concezione della certezza in ambito epistemologico strettamente legata alle metodologie della nuova scienza. Le scoperte effettuate nella seconda metà dell'Ottocento, anche se in senso stretto non misero in crisi l'assunto fondamentale dell'identificazione *certezza / formalismo-logico-matematico*, tuttavia accesero un forte dibattito che fu subito alimentato dalle ulteriori e decisive scoperte dei primi tre decenni del Novecento.

Nelle cosmologie antiche lo spazio e il tempo erano considerati assoluti e riferiti rispettivamente ad una struttura e ad un evento immutabili in quanto primordiali, come per esempio il cielo delle stelle fisse per la cosmologia aristotelica e l'istante iniziale della creazione nelle antiche cosmogonie¹. Tuttavia in Occidente, come abbiamo visto, l'introduzione della geometria nella fisica, ad opera di Galilei, modificò radicalmente le concezioni dello spazio e del tempo: non interessava più l'indagine filosofica sulle *cause* del moto, ma l'indagine cinematica sulle *leggi* di esso, al fine di rappresentarlo e conoscerne l'evoluzione. Spazio e tempo, pertanto, nella nuova visione erano considerati solo dal punto di vista della *misurazione*, ovvero del confronto con intervalli spaziali e temporali di riferimento. Inoltre, ricordando il secondo principio della dinamica di Newton, le forze non avevano come conseguenza diretta semplicemente spostamenti, ma accelerazioni, ovvero *variazioni di velocità*, ciò che risultava perfettamente in linea con quello che oggi chiamiamo *principio di relatività*, estesamente illustrato da Galilei nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* e qui riportato in forma sintetica:

«Se due laboratori si muovono l'uno rispetto all'altro di moto traslatorio rettilineo ed uniforme, non esiste esperimento che dia risultati diversi nell'uno e nell'altro laboratorio»².

In realtà Galilei si riferiva solo ad esperimenti di tipo meccanico; fu il famoso fisico tedesco Albert Einstein (1879-1955) ad estendere il summenzionato principio ad ogni possibile esperimento della fisica. In ogni caso, il principio di relatività si pose come un vero e proprio spartiacque nella storia della scienza: veniva a cadere completamente il mito dell'esistenza o anche della sola possibilità di un sistema di riferimento assoluto per il moto dei corpi. Tuttavia, nella fisica newtoniana, nonostante le misure di spazio e tempo non potessero più essere ancorate a un sistema di riferimento assoluto, rimaneva *assolutamente invariato* il valore che esse assumevano passando da un sistema di riferimento all'altro: tanto per fare un esempio, la misura della lunghezza di una sbarra fissata su un treno in movimento non cambiava se la misurazione veniva effettuata da un osservatore solidale con i binari anziché con il treno. Idem per le misure di intervalli

1. Un inizio assoluto del mondo può essere concepito in modo consistente solo fuori del tempo, nel senso di includere la totalità del tempo. Infatti «un inizio assoluto del tempo nel tempo è una contraddizione in termini» (G. BASTI, *Filosofia della natura e della scienza*, Lateran University Press, Roma 2002, vol. 1, p. 474).
2. C. MENCUCCHINI, V. SILVESTRINI, *Fisica I, Meccanica e Termodinamica. Corso di fisica per le facoltà scientifiche corredato di esempi ed esercizi*, Liguori Editore, Napoli 1996³, p. 66.

temporali. In altre parole, spazio e tempo costituivano una sorta di contenitore universale per qualsiasi osservatore e la simultaneità di più eventi non dipendeva dal particolare sistema di riferimento scelto per la descrizione del fenomeno.

Quanto appena descritto dovette cadere di fronte ad alcune evidenze teoriche e sperimentali che si affacciarono con la teoria elettromagnetica del già citato Maxwell:

«Secondo le equazioni di Maxwell, che sintetizzano in termini molto compatti le leggi relative ai fenomeni elettrici e magnetici, il campo elettromagnetico è descritto da una equazione in cui compare una costante universale la cui interpretazione fisica è la velocità di propagazione di ogni onda elettromagnetica (e dunque anche della luce) nel vuoto. La circostanza singolare è che tale costante (indicata usualmente con c ; il suo valore è $c \approx 300.000$ km/s) descrive una *velocità assoluta*; non dunque una velocità relativa a qualche sistema fisico partecipante al fenomeno di propagazione e atto a individuare – così come accade tutte le volte che una velocità compare in una equazione meccanica – un sistema di riferimento rispetto al quale misurare quella velocità»³.

In altre parole, Maxwell ricavò un'espressione per calcolare la velocità c della luce nel vuoto e il valore non era riferito a nessun sistema di riferimento particolare. Come interpretare questo scomodo risultato?

«La tendenza generale nel mondo della scienza [siamo ancora alla fine dell'Ottocento] era quella di rinunciare al principio di relatività (che del resto era stato enunciato da Galileo solo in relazione ai fenomeni meccanici) ipotizzando l'esistenza di un mezzo impalpabile (l' "etere") che riempiva uniformemente lo spazio "vuoto", e individuava fra tutti i sistemi di riferimento inerziali un sistema privilegiato: quello cioè in quiete rispetto all'etere stesso. In questo schema la velocità della luce aveva valore pari a c rispetto all'etere»⁴.

L'imbarazzo presso i fisici fu ancora più pesante se si considerano i risultati di un famoso esperimento⁵ del 1881 compiuto per la prima volta dal prussiano Albert Abraham Michelson (1852-1931) e ripetuto numerose volte da vari autori nei decenni successivi. Michelson riuscì a mostrare, attraverso interferometria ottica, che la luce viaggiava alla stessa velocità sia quando la sua direzione di propagazione era parallela alla velocità della Terra attorno al Sole, sia quando essa era perpendicolare. I risultati dell'esperimento, allora, potevano spiegarsi solo in due modi: o il Sistema solare si muoveva ad opportuna velocità rispetto all'etere, oppure l'etere non esisteva. La prima ipotesi fu scartata dalla ripetizione dell'esperimento in diversi periodi dell'anno, sfruttando il cambiamento della direzione della Terra a causa della circolarità dell'orbita. Qualcuno, pur di salvare l'ipotesi dell'etere, ipotizzò una perturbazione indotta in esso al passaggio della terra, ma così i risultati dell'esperimento di Michelson potevano essere spiegati solo in modo alquanto macchinoso.

«Fu a questo punto⁶ (1905) che Einstein propose la sua *teoria della relatività ristretta*; teoria basata su una riaffermazione del principio di relatività enunciato da Galileo, con l'estensione di tale principio a tutti i fenomeni fisici, e non solo dunque a quelli meccanici. Si rinunciava invece alla legge di somma delle velocità affermando al suo posto il *principio di costanza della velocità della luce*, secondo cui la luce si muove sempre con velocità pari a c [nel vuoto] indipendentemente dal sistema di riferimento in cui ci si ponga a misurarla»⁷.

Per Einstein, dunque, l'etere non esisteva, il principio di relatività rimaneva salvo e, per spiegare il comportamento "strano" della luce evidenziato dalle equazioni di Maxwell e dall'esperimento di Michelson, era necessario porre come nuovo principio della fisica il principio di costanza della velocità della luce. Esso venne posto da Einstein come assioma della teoria e le sue conseguenze sconvolsero le concezioni sullo spazio e sul

3. *Ibidem*, p. 422.

4. *Ibidem*, p. 422.

5. Per una descrizione dettagliata, cfr. *ibidem*, pp. 451-454.

6. Cioè con l'importante articolo:

A. EINSTEIN, «Zur Elektrodynamik bewegter Körper», in *Annalen der Physik* 17 (1905), pp. 890-921.

La traduzione italiana del titolo è: *Sull'elettrodinamica dei mezzi in movimento*.

7. C. MENCUCCINI, V. SILVESTRINI, *Fisica I, Meccanica e Termodinamica*, p. 422.

tempo della fisica newtoniana; per rendercene conto, vediamo ora qualcuna di queste conseguenze.

Come primo esempio, prendiamo in considerazione due automobilisti che viaggiano paralleli a velocità diverse, il primo a 50 km/h e il secondo a 35 km/h; è chiaro a tutti che il secondo automobilista vede il primo muoversi ad una velocità di 15 km/h rispetto a sé, valore che corrisponde alla differenza fra le due velocità misurate rispetto a un osservatore solidale con il terreno. Questo modo di comporre le velocità è conseguenza delle cosiddette *trasformazioni di Galilei*, valide nella fisica classica. Se ora consideriamo un raggio di luce che si propaga nella stessa direzione dei due automobilisti, ci aspetteremmo che

- un osservatore solidale con il terreno “veda”⁸ il raggio muoversi alla velocità c ;
- i due automobilisti vedano il raggio propagarsi ad una velocità inferiore a c , il primo alla velocità c diminuita di 50 km/h, mentre il secondo c diminuita di 35 km/h.

In realtà, secondo il principio di costanza della velocità della luce, i due automobilisti vedono il raggio *esattamente* alla stessa velocità c .

L'esempio appena illustrato e lo stesso esperimento di Michelson mostrano che *la luce non obbedisce alle trasformazioni di Galilei*:

«L'assunzione del principio di costanza della velocità della luce deve pertanto necessariamente comportare un riesame critico del concetto di tempo; perché esso possa valere, ci aspettiamo che sia $t \neq t'$ [essendo t e t' le coordinate temporali in due distinti sistemi di riferimento che si muovono l'uno rispetto all'altro]»⁹.

Dunque spazio e tempo non solo non potevano riferirsi ad un sistema di riferimento assoluto come il cielo delle stelle fisse o l'etere, ma non potevano più essere considerati neppure come “contenitori” indipendenti dal sistema di riferimento per le misurazioni, come la fisica newtoniana pretendeva. Veniva a cadere, pertanto, anche l'assunzione di una simultaneità assoluta tra eventi: se in un sistema di riferimento due eventi risultavano simultanei, non lo erano in un altro sistema *in moto relativo rispetto al primo*. Più in generale, passando da un sistema di riferimento all'altro, la teoria dimostrava quelle che nella letteratura scientifica sono note come *contrazione delle lunghezze e dilatazione dei tempi*, poi confermate da tutti gli esperimenti successivi. La teoria prevedeva anche i seguenti fatti:

- la possibilità di definire, oltre alla costanza della velocità della luce, altre grandezze *invarianti*, tali, cioè, da non cambiare il proprio valore cambiando sistema di riferimento; proprio la definizione di tali invarianti permetteva di riconoscere la *necessità di introdurre una geometria non euclidea* per descrivere i fenomeni relativistici;
- per velocità dei corpi molto più piccole di c , tutte le formule si *approssimavano* con quelle della fisica classica di Newton;
- l'impossibilità per un corpo di superare o anche solo raggiungere la velocità c ;
- l'equivalenza massa-energia, attraverso la celebre formula $E=mc^2$, fondamentale per la spiegazione di molti fenomeni, come p. es. quelli nucleari¹⁰;

8. In realtà noi non vediamo direttamente i raggi di luce esterni, poiché l'occhio è stimolato solo da raggi che entrano nella pupilla. Tuttavia il lettore vorrà perdonare quello che Einstein chiamerebbe *esperimento concettuale (gedanken experiment)*.

9. *Ibidem*, p. 424.

10. In realtà esiste un dibattito presso i fisici sull'uso della cosiddetta massa relativistica, ma ciò fa parte degli addetti ai lavori e noi ci accontentiamo di usare una terminologia comune, sebbene per alcuni aspetti impropria. Chi è interessato può consultare:

C. G. ADLER, «Does mass really depend on velocity, dad?», in *Am. J. Phys.* 55, 8 (1987), pp. 739-743;

L. B. OKUN, «The concept of mass», in *Sov. Phys. Usp.* 32, 7 (1989), pp. 629-638;

- la permanenza della validità del *principio di causalità*, nel senso di poter stabilire se un evento può influenzarne un altro da qualsiasi sistema di riferimento venga effettuata l'osservazione; tuttavia, se nella fisica newtoniana la possibilità di influenzare un fenomeno si traduceva semplicemente in un accadimento *temporalmente* anteriore, nella relatività non bastava più invocare solo il tempo, ma anche lo spazio, a motivo della finitezza della velocità di propagazione della luce.

Si evince, dunque, che la teoria della relatività ristretta riconosceva legami molto serrati fra spazio e tempo, sempre intesi nelle loro misurazioni. In ogni caso tale legame era destinato a mostrarsi ancora più forte: nel 1916 Einstein rese pubbliche le sue ricerche sulla *relatività generale*, che, rispetto alla ristretta, considerava sistemi di riferimento non solo in moto rettilineo uniforme l'uno rispetto all'altro, ma in moto qualsiasi.

«Il grande interesse della relatività generale deriva dal fatto che nel suo ambito anche le leggi della gravitazione universale sono ricondotte a proprietà geometriche dello spazio-tempo: ciò è possibile in base a considerazioni che, benché si traducano in leggi matematiche complesse¹¹, sono però concettualmente semplici¹².

Vogliamo accennare a queste semplici considerazioni sulla gravitazione, utilizzando come esperimento concettuale il cosiddetto *ascensore di Einstein*. All'interno di un ascensore fermo, tutti gli oggetti cadono verso il basso con la medesima accelerazione, l'*accelerazione di gravità*; se ad un certo punto si spezza il cavo che sorregge l'ascensore, quest'ultimo comincia a cadere verso terra e tutti gli oggetti all'interno fluttuano sospesi in aria, come se non ci fosse la gravità: in altre parole *la presenza di un campo gravitazionale è equivalente ad un opportuno sistema non inerziale (cioè accelerato)*. Tale fatto sconvolse ancora di più i fisici del tempo, poiché, come accennato, metteva in stretta relazione la presenza di campi gravitazionali con la geometria dello spazio-tempo; geometria che, come già accennato per la relatività ristretta, non era più quella descritta dai postulati di Euclide:

«[La relatività generale] è matematicamente assai più difficile di quella speciale [cioè ristretta] e richiede l'uso del 'calcolo tensoriale' allora praticamente sconosciuto ai fisici. Einstein stesso era stato arrestato dalle difficoltà matematiche finché il suo amico Grossmann non gli indicò i lavori di B. Riemann, B. Christoffel e ancor più quelli di G. Ricci Curbastro e T. Levi Civita che gli davano le armi necessarie»¹³.

La relatività generale, con il suo studio dinamico e a livello globale, rese

«possibile di nuovo la cosmologia scientifica, lo studio delle origini [espressione da non intendere in senso metafisico, livello non accessibile alla fisica] e dell'evoluzione dell'universo. A differenza, però, dell'antica cosmologia filosofica, essa usa il metodo galileiano, matematico e sperimentale [...]. Con la relatività generale, la struttura dello spazio-tempo fisico viene modificata dagli eventi che avvengono al suo interno. Addirittura, dato il carattere espansivo dell'universo, spazio e tempo interni all'universo fisico vengono "creati" dall'allontanarsi reciproco dei corpi che compongono l'universo stesso. Anche da questo punto di vista, il quadro monolitico della scienza antica e moderna delle origini è stato profondamente modificato»¹⁴;

I contributi di Einstein alla scienza fisica non si limitarono alla relatività: altrettanto importanti e fecondi furono gli studi di meccanica statistica e quantistica. Quest'ultima¹⁵

T. R. SANDIN, «In defense of relativistic mass», in *Am. J. Phys.* 59, 11 (1991), pp. 1032-1036.

11. Rimandiamo il lettore interessato che possiede conoscenze di analisi matematica di livello universitario al seguente testo, che approfondisce gli aspetti analitici della relatività generale e li applica a considerazioni di carattere cosmologico:

L. D. LANDAU, E. M. LIFŠITS, *Teoria dei campi*, Editori Riuniti, Roma 1999³.

12. C. MENCUCINI, V. SILVESTRINI, *Fisica I, Meccanica e Termodinamica*, p. 455.

13. E. SEGRÈ, *Personaggi e scoperte della fisica*, Oscar Saggi Mondadori, Milano 1996, vol. 2, p. 94.

14. G. BASTI, *Filosofia della natura e della scienza*, vol. 1, p. 142.

15. Le considerazioni che seguono sono un adattamento a fini didattici di:

P. CAMIZ, E. FERRARI, *Appunti di Istituzioni di Fisica teorica*, Servizio dispense del Dipartimento di Fisica

cominciò a disporre di un apparato matematico degno del nome di *teoria* solo negli anni successivi al 1920. I primi vent'anni del Novecento, infatti, videro l'accumulo di una notevole quantità di fatti sperimentali alla quale non si riusciva a dare spiegazione coerente. Nonostante l'avvento della relatività, infatti, si pensava che, finché le velocità in gioco degli oggetti fossero state molto minori della velocità della luce, le leggi della fisica classica sarebbero rimaste valide anche per il mondo microscopico, ma non era così ...