

4. Cenno storico sullo sviluppo della meccanica

È qui opportuno un breve cenno storico, che sarà necessariamente frammentario e anche ingiusto, perché tanti contributi non potranno neppure essere citati (questa non è una storia della fisica). Ci si propone solo lo scopo di fissare alcuni punti cruciali dello svolgimento della ricerca fisica, nell'ambito della meccanica.

Galileo

Abbiamo già ricordato che la meccanica come scienza fisica nasce con Galileo (1564–1642). A lui dobbiamo:

- il principio d'inerzia (con diversi precursori, fra cui Leonardo)
- il principio di relatività (idea del tutto originale)
- la legge di caduta dei gravi

(*Dialogo sui Massimi Sistemi*, 1632). Contributi non meno importanti di Galileo sono:

- l'impiego del metodo matematico
- la visione del rapporto fra teoria ed esperienza, espressa nel motto: “sensate esperienze e certe dimostrazioni”

(*Il Saggiatore*, 1623; *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a due Nuove Scienze*, 1638).

Le scoperte astronomiche e l'affermazione dell'unità fra terra e cielo sono altri grandi contributi di Galileo alla scienza che abbiamo già avuto modo di citare, ma sui quali non andremo più a fondo, perché escono dall'ambito della meccanica.

Newton

Il nostro secondo punto di riferimento è Newton (1642–1727). Egli ci ha lasciato:

- l'enunciato completo delle leggi della dinamica
- la legge di gravitazione
- la spiegazione delle leggi di Keplero, delle perturbazioni dei pianeti e della Luna, dello schiacciamento terrestre, della precessione degli equinozi, dei moti delle comete. . .

Tutto ciò si trova esposto nei *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, 1687. Per la fondazione della meccanica è doveroso ricordare, fra i precursori di Newton, almeno Huygens e Hooke. Inoltre, la meccanica newtoniana non sarebbe stata possibile senza l'invenzione del calcolo differenziale, dovuta indipendentemente allo stesso Newton e a Leibniz.

I due secoli seguenti vedono grandi progressi, su cui non ci possiamo fermare:

- lo sviluppo della meccanica celeste

- la meccanica analitica e i principi variazionali
- l'introduzione dei concetti di momento angolare e di energia.

Tra i nomi principali di questo periodo citiamo: Laplace, Lagrange, Euler, Gauss, Hamilton, Helmholtz, Poincaré. Siamo così arrivati alla fine del secolo scorso.

La crisi di fine '800

La meccanica newtoniana (detta anche “meccanica classica”) non mostra difficoltà (o non le si vedono?) fino a circa un secolo fa. È lo sviluppo dell'elettromagnetismo a porre problemi insolubili, in due direzioni.

Le onde elettromagnetiche, la velocità della luce, la massa elettromagnetica dell'elettrone: da qui nel 1905 nasce la relatività ristretta (Einstein, 1879–1955): come precursori abbiamo Lorentz e Poincaré. Subito dopo il problema della gravitazione (come conciliarla con la relatività ristretta; il moto del perielio di Mercurio) porta Einstein alla relatività generale (1911–1916).

I paradossi degli spettri atomici, della radiazione termica, dell'effetto fotoelettrico: insieme col problema dei calori specifici portano invece alla meccanica quantistica (Bohr 1913; de Broglie, Heisenberg, Schrödinger, Born, Dirac 1924–27).

Riflessione epistemologica

In questo corso studieremo la meccanica newtoniana, e ci accosteremo alla relatività. La meccanica quantistica sarà appena sfiorata, in qualche occasione. Come si giustifica questo, se la meccanica newtoniana è “vecchia” di 300 anni?

La risposta è che la meccanica newtoniana resta comunque a base della cultura fisica, per varie ragioni:

- pratiche: in moltissimi casi è perfettamente adeguata, mentre una trattazione relativistica, o quantistica, (o peggio ancora quanto-relativistica) sarebbe estremamente complicata oppure non si sa fare del tutto
- didattiche: la meccanica newtoniana è la più vicina all'esperienza corrente
- concettuali: i paradigmi della fisica relativistica e quantistica, anche quando sono in drastica opposizione a quello newtoniano, ne dipendono (definizione di molte grandezze, idee di spazio e tempo, riferimenti; interpretazione operativa delle osservabili quantistiche. . .)

È però vero che le idee di base della meccanica newtoniana non sono rimaste statiche: oggi noi non pensiamo come Newton; la fisica moderna “retroagisce” su quella antica. Qui potremo renderci conto di ciò, almeno in un caso particolare, quando studieremo l'interazione tra meccanica newtoniana e relatività.

5. I principi della dinamica

La formulazione newtoniana della meccanica è relativamente semplice; anche se non regge bene a una critica moderna, conviene perciò partire da lì.

Le leggi di Newton

Per Newton esiste lo spazio assoluto, che “per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, rimane sempre uguale ed immobile” (e il tempo assoluto “vero, matematico, in sé e per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, scorre uniformemente . . .”); perciò il problema della scelta di un riferimento non si pone. Già Leibniz lo critica su questo punto: per lui invece il moto si può definire solo in relazione a qualcosa. Occorre notare però che questa è ancora una posizione metafisica, non meno di quella di Newton.

1° principio: *Un corpo non soggetto a forze si muove di moto rettilineo uniforme.* “Non soggetto a forze” vuol dire sottratto a influenze esterne (lontano da altri corpi e schermato dalle loro azioni).

2° principio: *La variazione della quantità di moto eguaglia la forza agente.* Newton parla di “mutatio motus,” e intende $d\vec{p}/dt$, dove \vec{p} è la *quantità di moto*, data dal prodotto $m\vec{v}$. Qui m è la “quantità di materia” (non meglio definita, per ora).

Osservazione 1: Nella forma $\vec{F} = d\vec{p}/dt$ la seconda legge di Newton è già relativistica: Einstein cambierà solo l'espressione di \vec{p} in funzione di \vec{v} .

Osservazione 2: $\vec{F} = m\vec{a}$ è *vettoriale*, ossia la stessa relazione vale sia quando la forza agisce nella direzione della velocità (e ha per effetto di cambiarne il *modulo*) sia quando agisce in direzione normale (e perciò cambia la *direzione* della velocità). Già nel moto dei pianeti entrano in gioco entrambi gli effetti: dato che la traiettoria è eccentrica, la forza di attrazione del Sole ha in generale tanto una componente *tangenziale* (che fa aumentare o diminuire la velocità del pianeta) quanto una componente *normale* (che cambia la direzione del moto, ossia incurva la traiettoria) (fig. 5-1).

3° principio: *Nell'interazione fra due corpi, le forze formano sempre una “coppia di braccio nullo”:* non solo $\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$, ma le forze hanno la direzione di AB (fig. 5-2).

Conseguenza: l'effetto delle due forze \vec{F}_{AB} , \vec{F}_{BA} sulla quantità di moto complessiva $m_A\vec{v}_A + m_B\vec{v}_B$ è nullo:

$$\vec{F}_{AB} = \frac{d\vec{p}_A}{dt} \quad \vec{F}_{BA} = \frac{d\vec{p}_B}{dt}$$

da cui sommando:

$$\frac{d}{dt}(\vec{p}_A + \vec{p}_B) = 0$$

se non ci sono altre forze (vedremo meglio più avanti). Però la conservazione della quantità di moto non è sufficiente: non dice che la retta è la stessa, ma solo che $\vec{F}_{AB} + \vec{F}_{BA} = 0$. Come vedremo, occorre aggiungere anche la conservazione del momento angolare.

Osservazione 1: A seconda dei casi, le forze tra due corpi possono essere *a contatto* (esempio: nell'urto di due palle da biliardo), oppure *a distanza* (es. la forza di gravità). Le forze a contatto sono applicate ai due corpi dove questi si toccano, quindi praticamente nello stesso punto geometrico; quelle a distanza invece agiscono in punti anche molto lontani.

Osservazione 2: Nella meccanica relativistica dovremo abbandonare il 3° principio come uguaglianza di azione e reazione per le forze a distanza, mentre potremo mantenerlo nella forma di principio di conservazione.

I pericoli del 3° principio

Non bisogna confondere il 3° principio con una condizione di equilibrio, per due ragioni:

- a) le forze sono applicate a corpi diversi;
- b) il 3° principio vale anche in condizioni di moto.

Il modo migliore di rendersi conto di ciò è di discutere alcuni esempi.

Esempio 1: Nel sistema Terra–Luna (fig. 5–3), che per semplicità supponiamo ora isolato (ma ritorneremo su questo punto!) sono in gioco due forze: la forza \vec{F}_{LT} , che è *applicata alla Luna*, è la forza di attrazione gravitazionale dovuta alla Terra; la forza \vec{F}_{TL} , che invece è applicata *alla Terra*, è la forza di attrazione dovuta alla Luna. Queste due forze costituiscono una coppia di azione e reazione; la prima è causa del moto orbitale della Luna, la seconda di un moto “orbitale” della Terra (di cui si parla più raramente, perché è di ampiezza 80 volte minore, causa il rapporto delle masse). Entrambe le forze variano in direzione e anche in grandezza (la distanza Terra–Luna non è costante), ma *restano sempre esattamente opposte e dirette lungo TL*: infatti il 3° principio vale anche in queste condizioni.

Esempio 2: Se appoggiamo un mattone su di un tavolo (fig. 5–4) siamo abituati a dire che il mattone esercita sul tavolo una forza uguale al suo peso. Questo è vero, ma vediamo bene perché. Il mattone è fermo: il 1° principio ci dice che su di esso non possono esserci forze agenti. Ma sappiamo che ce n'è almeno una: la forza di gravità \vec{P} diretta verso il basso; quindi ce ne dev'essere un'altra che la equilibra esattamente, ed è facile capire che essa è dovuta al tavolo: chiamiamola \vec{F} . Dunque $\vec{P} + \vec{F} = 0$, ossia $\vec{F} = -\vec{P}$: la forza dovuta al tavolo è diretta verso l'alto ed è uguale, in modulo, al peso del mattone.

A questo punto entra in gioco il 3° principio: se il tavolo agisce sul mattone con la forza \vec{F} , il mattone reagisce sul tavolo con una forza $\vec{F}' = -\vec{F}$. Ne segue

$\vec{F}' = \vec{P}$, come ci aspettavamo. La questione è: perché fare un giro così complicato per arrivare a un risultato così evidente in sé? La risposta sta nell'esempio successivo.

Esempio 3: Invece di appoggiare il mattone direttamente sul tavolo, possiamo interporre qualcosa, per esempio quattro uova: il ragionamento non cambia, e infatti le uova reggono il mattone esercitando collettivamente la stessa forza che prima era prodotta dal tavolo (fig. 5-5), *purché si proceda delicatamente!* Ma se lasciamo cadere il mattone sulle uova, anche da pochi centimetri, l'esperimento ha per risultato una frittata (fig. 5-6). Che cosa è cambiato?

Durante il contatto fra le uova e il mattone, anche prima che questo si fermi, sono sempre presenti le forze \vec{F} e \vec{F}' , ed è sempre $\vec{F}' = -\vec{F}$, perché questa relazione esprime il 3° principio, *che vale incondizionatamente*. Ma non è affatto vero che sia $\vec{F} = -\vec{P}$: se così fosse, il mattone sarebbe soggetto a una forza risultante nulla, e perciò *continuerebbe a muoversi di moto uniforme verso il basso*. Invece il mattone si ferma (dopo aver rotto le uova): dunque la sua velocità verso il basso è diminuita, il che vuol dire che ha avuto un'accelerazione verso l'alto; e questo ci mostra (2° principio) che la forza risultante è verso l'alto, ossia che $|\vec{F}| > |\vec{P}|$. Poiché la "frenata" è piuttosto brusca, ne segue che in realtà il modulo di \vec{F} è parecchio maggiore del peso del mattone: ma lo stesso accade allora per il modulo di \vec{F}' , che è la forza applicata alle uova, e questo spiega la frittata. (In realtà il discorso sarebbe ancora più complicato, perché ciascun uovo non è soggetto a una sola forza, ma a due: l'altra viene dal tavolo. È questo "effetto schiaccianoci" che causa la rottura.)

L'aspetto importante di questi esempi sta nel mostrare che il 3° principio vale sempre, *anche in condizioni di moto accelerato*: un motivo evidente per cui non si può dedurre l'eguaglianza di azione e reazione da considerazioni valide solo in condizioni di equilibrio.

Dagli esempi si capisce anche un altro fatto importante: *non è possibile dare prove sperimentali separate dei tre principi, ma solo della validità generale del loro insieme*. Non è però il caso di farsene un problema: la questione può essere molto interessante da un punto di vista storico, o per chi abbia come proprio campo d'indagine la critica dei fondamenti della fisica; ma da un punto di vista pratico oggi, dopo tre secoli, la validità delle leggi di Newton è fuori questione (e ne conosciamo bene anche i limiti).

Le leggi di Newton sono state sottoposte a una critica serrata nel secolo scorso, e principalmente da Mach, alla fine del secolo. Ora vedremo che quasi tutto nella formulazione di Newton può essere messo in discussione, e quanto meno diversi enunciati di Newton debbono essere reinterpretati.

Lo spazio assoluto

Si può contestare che abbia senso parlare di spazio assoluto (lo aveva già detto Leibniz) e affermare che il moto è sempre relativo: di un corpo rispetto a

un altro. Occorre però ribadire che questa è una posizione filosofica, non fisica: il fatto che valga il principio di relatività non deve essere stabilito *a priori*; solo l'esperienza può decidere.

Mach spinge la critica fino a negare anche il carattere assoluto della rotazione (l'esperimento del secchio di Newton). Si tratta di questo: prendiamo un secchio pieno d'acqua, sospendiamolo con una corda a un sostegno fisso, e attorcigliamo più volte la corda facendo girare il secchio. Aspettiamo che qualsiasi moto dell'acqua si sia calmato, e lasciamo andare il secchio. In un primo tempo, il secchio si mette in rotazione sempre più veloce, e l'acqua non si muove; poi anch'essa viene trascinata, per attrito, dalla rotazione del secchio (come possiamo vedere dal fatto che la superficie s'incava nel centro). Se ora freniamo il secchio con le mani, l'acqua continua a ruotare, e solo dopo un po' viene frenata per l'attrito col secchio fermo, fino a ridursi in quiete.

Newton interpreta questo semplice esperimento come prova che il moto di rotazione ha carattere assoluto: infatti la superficie libera dell'acqua s'incava *quando e solo quando l'acqua ruota*, indipendentemente dal moto del secchio. Dunque guardando l'acqua possiamo sapere se essa sta ruotando *rispetto alle stelle fisse*, il che è quanto dire che in un riferimento che ruota con il secchio non vale il principio di relatività (e si manifesta una forza centrifuga). Su questa base Newton spiega lo schiacciamento della Terra, che era allora il risultato di ricerche dell'ultim'ora. Con argomenti dello stesso genere noi oggi spieghiamo la forma discoidale della Galassia.

Invece Mach afferma che anche la forza centrifuga è un effetto del moto dell'acqua rispetto al resto della materia dell'Universo, che conta assai più del secchio perché, pur essendo più lontana, ha una massa immensamente maggiore. Occorre però dire che su questa idea, nota come "principio di Mach," nessuno finora ha saputo costruire una teoria.

Osservazione: Nella meccanica newtoniana, se si assume che le forze possano dipendere solo dalle distanze e dalle velocità relative dei corpi, vale il principio di relatività (vedremo meglio poi): dunque tutti i riferimenti inerziali sono equivalenti, e a rigore lo spazio assoluto non è necessario. Newton era perfettamente consapevole di questo, e gli storici discutono ancora se davvero credesse nello spazio assoluto.

La definizione di massa

Per Newton la massa è la "quantità di materia," definita come prodotto della densità per il volume. È fin troppo facile obiettare che questa è una definizione circolare (come si definisce la densità?) e soprattutto che non consente una misura. Infatti: come possiamo confrontare le quantità di materia in corpi di composizione diversa? S'intende che se già sappiamo che \vec{g} è la stessa per tutti i corpi, potremo usare la bilancia: infatti questa confronta i pesi, e attraverso

$\vec{P} = m\vec{g}$ ne ricaviamo la misura della massa. Però nessuno può pesare una stella o un elettrone!

Quindi la sola via d'uscita è usare il 3° principio: da $\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$ segue $m_A\vec{a}_A = -m_B\vec{a}_B$; allora, misurando le accelerazioni, si ottengono i rapporti delle masse. In realtà sorgono sottili problemi logici, su cui però non vale la pena di soffermarsi.

La definizione di forza e il ruolo del 2° principio

Appare molto difficile una definizione indipendente di forza, per ragioni analoghe alla massa: possiamo attaccare un dinamometro alla Luna o a un atomo? Sembra allora che $\vec{F} = m\vec{a}$ decada al ruolo di *definizione dinamica di forza*: l'unico modo per misurare una forza è di misurare l'accelerazione che essa produce su di un corpo di massa nota.

In realtà le cose non stanno proprio così, perché possono presentarsi situazioni diverse, a seconda del campo di fenomeni che si studia. In certi casi l'espressione della forza è data da una *teoria generale*: gli esempi più evidenti sono la legge di gravitazione e quelle dell'elettromagnetismo: In questi casi la forza può dunque essere calcolata indipendentemente dall'accelerazione del corpo, e anzi quest'ultima viene determinata dal 2° principio.

Un'altra situazione è quella delle *leggi fenomenologiche*: espressioni empiriche, di portata più o meno ampia, che permettono di ricondurre la forza a pochi parametri semplici. Gli esempi più noti sono: la legge di Hooke per l'elasticità, le leggi dell'attrito e della resistenza dei fluidi. In questi casi non c'è una vera e propria teoria, ma solo una descrizione approssimata di dati sperimentali; ciò non toglie che le leggi fenomenologiche di forza hanno grande utilità pratica.

Un terzo caso da considerare è quello delle *reazioni vincolari*. Qui abbiamo a che fare con forze dovute a interazioni complicate di un corpo con altri (piani d'appoggio, rotaie, fili, ecc.) delle quali non si sa fare una teoria né si possiede un'espressione fenomenologica; anzi in molti casi non interessa neppure conoscerle in dettaglio. Per il moto di un treno sui binari non ha importanza cercare di calcolare *a priori* grandezza e direzione delle reazioni vincolari, grazie al fatto che la traiettoria è conosciuta. (Diverso è naturalmente l'atteggiamento dell'ingegnere che progetta i binari e la massicciata ferroviaria: egli deve assicurarsi che i binari non si deformino al passaggio del treno e che la massicciata regga il carico.) Ma resta il fatto che per il puro problema di dinamica spesso le reazioni vincolari sono delle incognite che si cerca di eliminare.

Il 3° principio e l'azione a distanza

Già ai tempi di Newton l'idea di azione a distanza suscitava molte obiezioni, che sono divenute più profonde quando ci si è persuasi che in realtà le azioni fra corpi distanti sono sempre trasmesse *attraverso un campo*, e si propagano con velocità finita. È proprio questo — come vedremo — che ci obbliga a lasciar

cadere, nella meccanica relativistica, l'uguaglianza di azione e reazione per le forze a distanza: infatti le due forze non saranno più uguali, se il campo trasporta quantità di moto. Anche questa però, come tutte le *correzioni relativistiche*, può essere trascurata in molti casi pratici.

Il problema non sembra sussistere per le forze a contatto: tuttavia dal punto di vista moderno nasce un'altra difficoltà, ed è che le forze a contatto *in realtà non esistono!* Per esempio, quando due palle da biliardo si urtano, il contatto fra le loro superfici è in realtà un'interazione a distanza (sia pure brevissima) tra le cariche elettriche degli atomi che costituiscono le due superfici. Le palle rimbalzano perché l'interazione dominante è quella fra gli elettroni, che è repulsiva. Per fortuna alla piccolissima distanza corrisponde un trasporto di quantità di moto — tramite il campo elettromagnetico — che ha durata estremamente breve ($\sim 10^{-18}$ s) e che perciò può essere del tutto trascurato: anche da un giocatore di biliardo che conosca la relatività.

Non si può fare a meno di accennare che nella fisica degli ultimi decenni si è avuto, a questo proposito, un ulteriore rovesciamento di posizione: infatti la teoria quantistica dei campi vede l'azione di un campo come uno scambio di particelle (ad es., nel caso del campo elettromagnetico, uno scambio di fotoni). In questo senso l'azione a contatto ritorna ad essere quella primaria, anche se naturalmente con tutt'altro significato...

Come si misura la massa

La metrologia della massa è in uno stato diverso da quello raggiunto per il tempo e lo spazio. Infatti in questi due casi le unità di misura sono oggi agganciate a campioni *intrinseci*: le differenze di energia di livelli atomici, e quindi le frequenze delle corrispondenti transizioni elettromagnetiche. Invece l'unità di massa è ancor oggi quella del 1901: il kg campione conservato al BIPM.

Per quanto riguarda le misure di massa, come al solito i procedimenti sono molto diversi a seconda del campo in esame. Alla scala umana ci si basa su bilance, più o meno sofisticate, ma che in ogni caso sfruttano l'attrazione gravitazionale della Terra sul corpo in esame, confrontandola o con quella su corpi campione, o con forze di altra origine (ad es. molle). La determinazione delle masse di stelle, pianeti, galassie sono sempre basate sugli effetti delle forze gravitazionali: ne ripareremo in seguito. Invece nell'ambito microscopico si deve ricorrere ad altri metodi: accelerazioni prodotte da campi elettrici e/o magnetici (come nello spettrografo di massa), uso delle leggi di conservazione in urti elastici o anelastici.

La cosa più importante da segnalare è che mentre i metodi di misura nel microscopico misurano l'effetto *inerziale* della massa, quelli macroscopici si fondano sull'effetto gravitazionale: o *attivo*, come quando si misura la massa del Sole dal moto della Terra, o *passivo*, come nelle comuni pesate. Nel primo caso

si usa il fatto che la forza è proporzionale alla massa che la produce; nel secondo, il fatto che è proporzionale alla massa che la subisce. Non è ovvio che si stia misurando sempre la stessa grandezza; ma tutti gli esperimenti in proposito ci assicurano che è così (ne riparleremo in seguito).

A che punto siamo?

Non abbiamo parlato del tempo assoluto, perché ad esso avrebbe pensato Einstein poco dopo, e ce ne occuperemo a parte (abbiamo già cominciato nel Cap. 2a).

A questo punto pare davvero che della costruzione di Newton non resti più niente; ma non è così, se si riflette che in fisica non ha mai senso la discussione sui fondamenti di un frammento della teoria, isolato dal resto. Così ad es. il concetto di forza acquista un senso se lo si lega alla legge di gravitazione, o a quelle dell'elettrostatica. Il concetto di massa diventa significativo se se ne indica una procedura di misura (per mezzo di urti oppure con uno spettrografo di massa . . .); procedura che a sua volta è utilizzabile in quanto si appoggia a un'altra parte della teoria (per esempio, nel caso dello spettrografo di massa, alla conoscenza delle forze cui è soggetta una carica in un campo elettromagnetico). Per dirla con le parole di Taylor e Wheeler:

“Quanto è sorpassata quella concezione della scienza che si esprimeva col dire ‘definisci i termini che impieghi, prima di procedere’! Ogni passo avanti della conoscenza umana che sia realmente creativo è così fatto che teorie, leggi, metodi di misura — inseparabili per sempre — vengono al mondo insieme.” [E. F. Taylor, J. A. Wheeler: *Spacetime Physics* (Freeman 1966) p. 102]

La validità della meccanica newtoniana sta nel fatto che viene usata da tre secoli e ha contribuito alla costruzione di tutta la fisica che oggi conosciamo (senza contare le innumerevoli realizzazioni tecniche).

Riassumendo:

1. L'esperienza mostra che esistono riferimenti (detti “inerziali”) nei quali valgono le leggi di Newton, senza bisogno di “forze apparenti.” Sul significato delle forze apparenti ritorneremo più avanti. Due diversi riferimenti inerziali sono in moto traslatorio rettilineo uniforme l'uno rispetto all'altro.

2. A seconda del problema, approssimazioni via via più soddisfacenti al riferimento inerziale sono:

- a) un riferimento solidale con la Terra
- b) un riferimento che si muova come il centro di massa della Terra, ma con orientamento secondo le “stelle fisse” (in seguito preciseremo)
- c) un riferimento che si muova col centro di massa del sistema Terra–Luna
- d) un riferimento che si muova col centro di massa dell'intero sistema solare. . .

3. In tutti questi esempi di riferimento inerziale, occorre introdurre la forza di gravità — in accordo con Newton — come forza reale, dovuta all'azione di altri corpi; con Einstein si presenta una visione diversa, di cui parleremo al momento opportuno.

4. Ogni corpo possiede una massa, costante e invariabile, che ne misura l'*inerzia*, ossia il fattore di proporzionalità tra forza e accelerazione nella seconda legge di Newton. Le procedure di misura della massa possono variare molto da caso a caso (come del resto per tutte le grandezze fisiche). In seguito vedremo come la relatività modifichi il concetto di massa newtoniano.

5. Nella seconda legge compare la *forza agente* sul corpo: questa potrà, a seconda dei casi, venir data da una teoria (gravitazione, elettromagnetismo) o da un'espressione fenomenologica (molle, attrito) o introdotta come incognita che riassume interazioni complicate su cui non si vuole indagare (reazioni vincolari).

6. Nell'interazione fra due corpi azione e reazione formano una *coppia di braccio nullo*. Ne segue la conservazione della quantità di moto e del momento angolare, in assenza di *forze esterne*.

6. Il principio di relatività

È ben noto che la maggiore opera di Galileo, il *Dialogo sui Massimi Sistemi*, è scritta in difesa del sistema copernicano, a favore del quale porta una messe di argomenti teorici e sperimentali. Uno dei punti centrali della discussione concerne i presunti effetti del moto della Terra: poiché noi non ci accorgiamo affatto del suo moto, gli oppositori di Copernico ne arguivano che essa fosse “immobile e al centro del mondo.”

“...Ma perché da questo S. Offizio, per aver io [...] scritto e dato alle stampe un libro nel quale tratto l'istessa dottrina già dannata e apporto ragioni con molta efficacia a favor di essa, senza apportar alcuna solutione, sono stato giudicato vehementemente sospetto d'heresia, cioè d'haver tenuto e creduto che il sole sia centro del mondo et immobile e che la terra non sia centro e che si muova; pertanto, volendo io levar dalla mente delle Eminenze Vostre e d'ogni fedel Christiano questa vehemente sospitione, giustamente di me conceputa, con cuor sincero e fede non finta abiuro, maledico e detesto li suddetti errori et heresie...” [da G. de Santillana: *Processo a Galileo* (Mondadori 1960) p. 569]

La linea seguita da Galileo consiste nel confutare — con numerosi esempi, con l'esame critico di fatti di esperienza comune, con l'invenzione di esperimenti ideali — l'opinione che debbano esserci effetti osservabili del moto della Terra. L'argomento più famoso è quello basato sull'osservazione, di senso comune già allora (!), che in un locale chiuso sotto coperta di una nave non è possibile accorgersi se la nave cammina o sta ferma. Nell'App. 1 è riprodotto il famoso brano del *Dialogo* che tratta questo argomento. È questo l'atto di nascita del *principio di relatività*:

Nessun esperimento permette di distinguere due riferimenti in moto traslatorio rettilineo uniforme l'uno rispetto all'altro.

Dei commenti sono necessari:

1. S'intende che gli esperimenti vanno condotti *all'interno* dei laboratori, senza “guardare fuori dall'oblò.”
2. Per quanto si dica spesso che l'enunciato di Galileo si riduce solo a esperimenti di meccanica, ciò non è esatto, per la semplice ragione che la separazione della meccanica dalle altre parti della fisica è posteriore a Galileo.
3. Possiamo formulare il principio di relatività in modo espressivo e facile da ricordare, come “principio del taccuino”: se nei due riferimenti operano due fisici, e ciascuno annota in un taccuino i risultati dei suoi esperimenti, essi non potranno riconoscere il proprio taccuino in base a quello che c'è scritto.

Bisogna però andare più a fondo: spesso i due fisici possono osservare ciascuno l'esperimento dell'altro, e sorge allora la necessità di “raccordare” le due descrizioni che essi danno dello stesso esperimento.

Un esempio, preso ancora da Galileo, illustrerà meglio la questione. Se un cannone disposto con la canna verticale spara una palla, questa ricadrà nella bocca del cannone (fig. 6-1). Se lo stesso esperimento viene condotto montando il cannone su di un carro che corre veloce, il principio di relatività ci dice che ancora la palla deve ricadere nella bocca del cannone, perché il riferimento del carro è anch'esso inerziale. Ma visto da terra, cioè nell'altro riferimento, sembra che la palla debba restare indietro (fig. 6-2); almeno così argomentavano gli avversari di Galileo.

Galileo mostra che nel riferimento "a terra" la palla non sale in verticale, perché ha anche una velocità orizzontale (quella del carro); la sua traiettoria è perciò una parabola che la riporta giusto alla bocca del cannone. Non solo: nel tempo in cui la palla cade dalla bocca al fondo del cannone, essa si sposta in avanti di tanto quanto il cannone, e perciò penetra nella canna dolcemente, senza urtare la parete (fig. 6-3).

In termini moderni, si vede che il problema è: come cambia la descrizione in termini di grandezze fisiche (velocità, accelerazioni, forze ...) di *uno stesso* esperimento visto da due riferimenti diversi? Ci stiamo chiedendo la *legge di trasformazione* delle grandezze fisiche per cambiamento di riferimento. Come mostra l'esempio, ci sono certamente grandezze non *invarianti*: una è la velocità.

Che cosa ha a che fare questo col principio di relatività? La legge di trasformazione delle grandezze dev'essere tale che lo stesso esperimento risulti *compatibile* con tutte le leggi fisiche, quale che sia il riferimento usato per descriverlo. Quindi se per es. m , \vec{a} , \vec{F} sono grandezze misurate in un riferimento e m' , \vec{a}' , \vec{F}' quelle misurate *per lo stesso esperimento* in un altro riferimento *inerziale*, anche senza pronunciarci sulla legge di trasformazione

$$m \mapsto m', \quad \vec{a} \mapsto \vec{a}', \quad \vec{F} \mapsto \vec{F}'$$

ci aspettiamo di trovare da una parte $\vec{F} = m\vec{a}$, dall'altra $\vec{F}' = m'\vec{a}'$. Se ciò non accade, solo due casi sono possibili:

- o il *principio di relatività non vale* per quell'esperimento
- o la legge di trasformazione delle grandezze è *sbagliata*.

Il principio di relatività nella fisica newtoniana

Nella sistemazione newtoniana della meccanica il principio di relatività, *limitato ai fenomeni meccanici*, è un teorema, nella forma seguente:

se le forze tra i corpi dipendono solo dalle posizioni e dalle velocità relative, allora tutti i moti, a parità di condizioni iniziali, si svolgono nello stesso modo in qualunque riferimento inerziale.

La dimostrazione la daremo più avanti.

Il principio di relatività e la velocità della luce

Come abbiamo già detto, i problemi nascono con lo sviluppo dell'elettromagnetismo, nella seconda metà dell'800. La teoria elettromagnetica che da Maxwell prende il nome, sintesi del lavoro di almeno due generazioni di fisici, riassume in poche equazioni tutte le conoscenze dell'epoca in materia di elettricità e magnetismo. La teoria prevede l'esistenza delle onde elettromagnetiche: previsione che sarebbe stata verificata vent'anni dopo (Hertz, Righi) con la conferma di tutte le proprietà che la teoria di Maxwell aveva indicate.

In particolare la teoria prevedeva che le onde elettromagnetiche dovessero propagarsi (nel vuoto) con una ben precisa velocità, calcolabile sulla base delle leggi già note. La coincidenza tra il valore indicato da Maxwell per la velocità delle onde elettromagnetiche e quello della velocità della luce indicava inoltre che la luce, di cui erano note molte proprietà, ma non la natura fisica, era un tipo particolare di onda elettromagnetica, caratterizzata solo da una lunghezza d'onda molto piccola ($\sim 5 \cdot 10^{-7}$ m). Oggi la velocità delle onde elettromagnetiche nel vuoto s'indica universalmente con c .

Ma ecco il problema: rispetto a quale riferimento le onde elettromagnetiche hanno questa velocità? Sembra a prima vista evidente che se la velocità è c rispetto a un certo riferimento inerziale, non può essere ancora c rispetto a un altro riferimento che si muova rispetto al primo. Ma se è così, il principio di relatività non vale per le onde elettromagnetiche (e quindi per la teoria di Maxwell): i due fisici di cui abbiamo parlato prima potrebbero facilmente riconoscere i propri taccuini semplicemente misurando la velocità della luce, ciascuno nel proprio riferimento!

È qui che Einstein introduce la sua idea rivoluzionaria: in base ad argomenti teorici che non possiamo esporre, e all'analisi dei (pochi) fatti sperimentali allora noti, conclude:

“Esempi di questo genere . . . portano all'ipotesi che al concetto di quiete assoluta non corrisponda alcuna proprietà dei fenomeni; e ciò non solo nella meccanica, ma anche nell'elettrodinamica. Al contrario, per tutti i sistemi di coordinate [in questo corso preferiremo dire 'sistemi di riferimento'] per i quali valgono le equazioni della meccanica, valgono pure le stesse equazioni elettrodinamiche e ottiche . . . Intendiamo perciò elevare quest'ipotesi (il cui contenuto verrà chiamato nel seguito 'principio della relatività') al rango di postulato . . .”

Insomma, Einstein afferma che il principio di relatività di Galileo vale *incondizionatamente per qualsiasi fenomeno fisico*, onde elettromagnetiche incluse.

Invarianza della velocità della luce e “composizione” delle velocità

Dunque Einstein recupera il pieno significato del principio di relatività, ma questo fa nascere un altro problema: se il principio di relatività vale per

la teoria di Maxwell, la velocità della luce dev'essere c in qualunque riferimento inerziale (noi diciamo che dev'essere *invariante*); ma non è stato lo stesso Galileo a insegnarci che la velocità di un corpo in moto rispetto a un certo riferimento *si compone* con quella del riferimento? E non è esperienza comune che le cose vanno proprio così?

La risposta di Einstein è drastica: poiché tutti i fatti sperimentali provano che la velocità è sempre c , ne segue che la cosiddetta “legge di composizione delle velocità” non funziona. Più esattamente: non funziona con velocità così grandi come quella della luce, anche se ciò non impedisce che possa essere un'eccellente approssimazione quando si ha a che fare con velocità molto più basse, come sono quelle dei treni o degli aerei (e perfino quella della Terra attorno al Sole).

Uno dei principi base della fisica (e di tutte le scienze sperimentali) è che “i fatti hanno sempre ragione”: quando sembrano in conflitto con qualche nostra idea, vuol dire che quelle idee hanno bisogno di essere ripensate e rielaborate. In un caso come quello di cui ci stiamo occupando il conflitto è particolarmente aspro, perché la composizione delle velocità ci sembra assolutamente intuitiva; dobbiamo dunque essere ben sicuri che i fatti parlano a favore dell'invarianza della velocità della luce. Fortunatamente oggi siamo su questo punto in una posizione molto più facile di quella di Einstein: la quantità di fatti sperimentali su cui possiamo basarci è assai maggiore, e certi sono particolarmente evidenti. Vediamone qualcuno.

Prove dell'invarianza della velocità della luce

Ci sono in primo luogo gli esperimenti “storici,” che sono stati progettati al preciso scopo di studiare se la velocità della luce dipende dalla direzione in cui si propaga, e dal sistema di riferimento in cui l'esperimento è condotto. I risultati di questi esperimenti sono sempre stati a favore dell'invarianza; ma si tratta di esperimenti la cui descrizione ci porterebbe fuori del tema di questo corso, e perciò qui non li approfondiremo.

È utile invece osservare che la stessa enorme diffusione delle onde elettromagnetiche nella tecnica odierna ci dà alcune prove dirette dell'invarianza. Una è data dai sistemi di radionavigazione, tra i quali vogliamo citare il più moderno: il *Global Positioning System* (GPS). La sua descrizione è molto semplice, se ci si limita all'essenziale. Un certo numero di satelliti emettono speciali segnali radio, con i quali comunicano tra l'altro la loro posizione. La nave (o l'aereo) che vuole conoscere la sua posizione non fa che misurare i tempi di propagazione delle onde radio dai satelliti, e questa misura fornisce subito le distanze della nave dai satelliti. Poiché la posizione dei satelliti è nota, se ne ricava senza difficoltà quella della nave (il tutto è fatto automaticamente da un apposito apparato di bordo). L'accuratezza del sistema è tale che nelle sue versioni più sofisticate (usate solo a scopi militari!) è possibile accorgersi di uno spostamento < 10 m.

Fin qui la tecnica: ma dove entra l'invarianza della velocità delle onde elettromagnetiche? Il fatto è che la Terra gira su se stessa e ruota attorno al Sole, per cui non resta ferma rispetto a nessun riferimento inerziale. Se la velocità delle onde dipendesse dal riferimento, essa cambierebbe nel corso dei rilevamenti fatti dalla nave, anche da un'ora all'altra; il GPS dovrebbe quindi indicare un movimento della nave, anche quando questa sta ferma nel porto; e la grande sensibilità del sistema ci dice che si potrebbe scoprire in tal modo una variazione anche piccola della velocità delle onde elettromagnetiche. Naturalmente se così fosse il GPS sarebbe inutilizzabile!

Un altro argomento dello stesso genere ce lo forniscono i viaggi spaziali. Tutte le navicelle, capsule, ecc. che hanno percorso in questi decenni il sistema solare, che fossero o no abitate, contenevano apparati i più diversi fondati sulla teoria elettromagnetica: pensiamo ad es. ai laser, agli orologi atomici, ai mezzi di comunicazione con la Terra, ecc. Tutti questi sistemi sono stati progettati e collaudati "a terra," e poi fatti funzionare mentre la navicella viaggiava, rispetto alla Terra, a velocità di 10 km/s o anche superiori. In tutti i casi il funzionamento è stato esattamente quello previsto; proprio come nel "gran navilio" di Galileo non si poteva riconoscere se la nave stesse ferma o corresse sotto la spinta delle vele.

Concludendo

Dobbiamo assumere, in base a prove sperimentali dirette, la validità generale del principio di relatività: anche per la propagazione delle onde elettromagnetiche, e in particolare della luce. Ne segue che la legge di composizione galileiana delle velocità non può essere esatta, e dovremo più oltre vedere come vada corretta.

Tuttavia il problema, così come per il tempo assoluto, non sussiste in pratica per velocità piccole rispetto a c , a meno che non si vada in cerca di effetti minuti, che richiedono strumenti di altissima precisione per essere rivelati. Perciò nel seguito, salvo quando lo diremo esplicitamente, continueremo a far uso della fisica newtoniana come un'adeguata schematizzazione della realtà.