

SPAZIO, TEMPO E MOTO NELLA FISICA CLASSICA

di Ezio Fornero

Introduzione

Spazio, tempo e movimento sono i primi elementi di ogni descrizione fisica del mondo che voglia conservare un rapporto di continuità con l'esperienza comune. Pur nella consapevolezza della provvisorietà e illusorietà di tale percezione immediata dei fenomeni che osserviamo quotidianamente, non è possibile avvicinarsi alla fisica senza partire dalla descrizione del mondo come fatto di oggetti che si muovono nello spazio al passare del tempo. Storicamente, il sorgere della meccanica moderna nel XVII secolo e i suoi successivi sviluppi formali nel XVIII hanno portato queste premesse ai loro esiti estremi, e già nel corso del XIX secolo sono emersi quei problemi alla base della crisi del XX secolo, che diede origine alle due teorie della Relatività e della Meccanica Quantistica. In realtà, oggi non possiamo dire di essere giunti al termine di tutto il percorso, dato che una teoria "finale" di sintesi (se mai verrà confermata sperimentalmente) dovrà accordare due visioni difficilmente conciliabili, quella deterministica e reversibile della Relatività e quella probabilistica e non locale della Meccanica Quantistica.

Chi scrive pensa che sia impossibile comprendere a fondo tutte le ragioni per le quali lo sviluppo delle scienze fisiche abbia assunto in Occidente quel carattere radicale e irreversibile che ha trasformato il mondo, generando la civiltà industriale e la cultura cosiddetta moderna. Possono darsi diverse spiegazioni, di natura sociale e politica; d'altronde, queste analisi dipendono in misura notevole dal tipo di cultura e dall'orientamento ideologico di quanti vi si cimentano. Non si deve sottovalutare l'importanza della matematica, già sviluppata dai Greci nelle forme della geometria e perfezionata agli inizi dell'era moderna dagli sviluppi dell'algebra, del calcolo infinitesimale ecc., e della sistematizzazione del pensiero deduttivo operata da Aristotele. Senza la potenza del calcolo numerico e simbolico e la capacità di gestire formalismi estremamente sofisticati, la fisica è impossibile. La sola curiosità verso i fenomeni naturali difficilmente può spiegare i risultati ottenuti da Keplero, Galileo e Newton e da altri meno noti. Il progresso delle tecniche ha avuto una parte essenziale, ma è stato possibile in grande misura grazie agli sviluppi della matematica.

Ma questo implica che lo studioso delle scienze fisiche trasferisce nell'interpretazione del mondo fenomenico il metodo matematico e le idee della geometria in una misura tale da renderli predominanti. La fisica classica si fonda sulla geometria euclidea, trasformando il punto geometrico idealmente privo di estensione nel punto materiale, una particella ideale che si muove lungo traiettorie analizzabili matematicamente mediante il calcolo differenziale. Questo fondamento geometrico della meccanica classica è evidente soprattutto nell'opera di Galileo e Newton, ed è stato il paradigma della fisica fino agli inizi del XX secolo, pur essendosi compreso già da decenni che non vi è un'unica geometria possibile capace di descrivere la realtà, ma che sono egualmente "vere" tutte le geometrie coerenti, cioè quelle che soddisfano il principio di non-contraddizione, l'unico presupposto permanente di ogni sistema matematico e di ogni consistente descrizione fisica del mondo.

I problemi inerenti alla natura dello spazio e del tempo sono stati oggetto di indagini coinvolgenti campi diversi, non solo nell'ambito della fisica. In questo saggio affronteremo solo le questioni che

si possono esplorare ed eventualmente risolvere con l'osservazione dei fenomeni e con gli strumenti offerti dalla matematica. Tuttavia, gli oggetti di questa indagine riguardano le condizioni della nostra esperienza e la riflessione su spazio, tempo e movimento non si esaurisce nelle informazioni di origine sperimentale e nei calcoli. Le conclusioni a cui sono giunti i fisici non dipendono solo dalle osservazioni, dalle formule, dalla geometria ecc.; l'origine stessa dei problemi, i tentativi di risolverli, le proposte avanzate, rientrano in quel ramo della filosofia che è orientato all'esplorazione della natura. Sia i fisici che rifletterono sulla natura dello spazio e del moto, sia i matematici che svilupparono le geometrie non euclidee erano, a modo loro, dei filosofi. L'esplorazione di certi problemi, fino a quando non si possiede una soluzione ampiamente condivisa, o fino a quando non è noto un metodo per affrontarli, è affidata al ragionamento, al confronto tra posizioni diverse, alla capacità di formulare ipotesi e di dedurne le conseguenze. Le grandi scoperte di Galileo non si basavano solo su calcoli; il suo *Dialogo sui massimi sistemi* ne contiene assai pochi; al contrario, è tutto un susseguirsi di ipotesi, tesi e contro-tesi. Con Newton, le conseguenze dei principi generali sono trattate matematicamente, ma fino agli inizi del XX secolo l'approccio filosofico e concettuale al problema dello spazio e del moto si intreccia con il progredire della matematica. Ciò vale anche per la relatività della simultaneità, della misura del tempo e delle lunghezze, e infine per il Principio di Equivalenza, il ponte di passaggio dalla concezione classica per la quale spazio e tempo sono separati e indipendenti dall'osservatore a quella attuale della Relatività Generale e della cosmologia. Einstein stesso rivelò che l'intuizione, o meglio l'*insight*, fu all'origine delle sue idee.

Non mi è stato possibile esporre l'argomento in maniera più sintetica, se non rinunciando a chiarire alcuni punti essenziali. Le presentazioni scolastiche, per ragioni di organizzazione del programma, e soprattutto per evitare di perdersi in questioni ormai risolte, non approfondiscono il tema in oggetto oltre un certo punto; ma nella dinamica classica il problema della natura dello spazio e del moto non è mai stato risolto. Ciò risulta più chiaro se si comprende bene il significato della Relatività e il principio di identità di massa inerziale e gravitazionale. Una descrizione soddisfacente, concettualmente e sperimentalmente, dei concetti fondamentali della meccanica esige la sintesi einsteiniana; senza di questa, massa, energia, spazio e tempo sono separati e non chiaramente definiti: sono solo concetti che si presumono noti, senza conoscerne la profonda natura.

La quasi totalità del presente saggio è dedicata alla natura dello spazio e del moto, attraverso l'esplorazione dell'evoluzione di questi concetti nel corso dei secoli. Il tempo pone maggiori difficoltà, alle quali ho accennato nel capitolo ad esso dedicato. Pare che prima di Einstein nessuno abbia pensato che la misura del tempo potesse dipendere dall'osservatore. Non solo, ma le idee in proposito variano da cultura a cultura e hanno scarsa rilevanza scientifica. Di fatto, il tempo è stato trattato come una successione continua, assumendo – in parte, contrariamente all'esperienza comune, come la psicologia rivela – che “scorra” uniformemente, ecc. Il rapporto tra la lunghezza della parte di questo saggio dedicata allo spazio e quella riservata al tempo riflette una realtà storica: è probabilmente maggiore di quello tra la quantità degli studi scientifici sullo spazio e quelli sul tempo pubblicati dalla seconda metà del XVII secolo fino ad Einstein.

Torino, 17 Settembre 2026.

INDICE

1. I sistemi di riferimento e lo spazio assoluto	p. 4
2. Il Principio di Relatività classica	7
3. Giustificazione newtoniana dello spazio assoluto	10
4. Osservatori inerziali e non inerziali	14
5. La posizione di Mach	18
6. Il tempo	22
7. Relatività Ristretta e Principio di Equivalenza	25
8. Conclusioni	29

1. I sistemi di riferimento e lo spazio assoluto

La prima delle leggi della dinamica di Newton è il principio di inerzia. L'enunciato, così come è stato formulato da Newton stesso nei *Principia Mathematica*, è il seguente: “*Ogni corpo persevera nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, a meno che non sia costretto a mutare quello stato da forze impresse su di esso.*”¹ Questa formulazione, presa isolatamente, è manifestamente incompleta. Rispetto a chi o a che cosa un moto può definirsi rettilineo e uniforme? Quando osserviamo o descriviamo il moto di un corpo (cioè, quando valutiamo la sua velocità e accelerazione), lo facciamo in riferimento a qualche corpo o ambiente, o anche rispetto a noi stessi; per es., se studiamo le oscillazioni di un pendolo in un laboratorio, supponiamo che il laboratorio e noi stessi siamo fermi, e riferiamo il movimento del pendolo alla retta verticale passante per il punto di sospensione; così facendo trascuriamo il moto di rotazione terrestre, il moto di rivoluzione della Terra intorno al Sole, ecc.; *la descrizione che otteniamo è quindi relativa a un osservatore dato*, e sarebbe alquanto diversa se fosse riferita al centro della Terra o a qualche altro corpo dell'Universo. I possibili modi di descrivere il movimento sono tutti egualmente arbitrari? O esiste un punto di vista privilegiato, che corrisponde all'unica descrizione corretta, mentre tutte le altre sono, in un certo senso, apparenti?

Certamente Newton aveva esplorato questi problemi, ma pensava di poter anticipare le obiezioni alle sue idee facendo precedere la formulazione delle leggi della dinamica da alcuni principi che riteneva inattaccabili, in modo che lo fossero anche le loro conseguenze. Il suo procedimento era quello assiomatico della geometria, dalla quale egli traeva un'idea avulsa dai fenomeni del tempo e dello spazio, distinguendo tempo, spazio e movimenti “veri”, in quanto indipendenti dall'osservazione e dagli eventi, dagli stessi elementi apparenti, relativi, dipendenti dalle osservazioni. Lo spazio assoluto di Newton è affine allo spazio euclideo, in quanto questo contiene al suo interno figure che possono essere trasformate, traslate ecc., mentre esso stesso, a differenza di queste, è immodificabile. Allo stesso modo, i corpi materiali possono essere deformati, spostati e così via, ma lo spazio rimane sempre uguale. Per quanto riguarda il tempo, Newton concepisce il tempo assoluto non come quello scandito dai nostri orologi fisici o dai cicli astronomici (che presentano inevitabili irregolarità), ma come quello che verrebbe misurato da un orologio ideale e perfetto, i cui cicli si susseguono con un ritmo rigorosamente uniforme, identico per tutti e in ogni luogo.² Ma avvertiva che vi fosse qualche difficoltà nascosta nella sua esposizione, e la distinzione che pose tra spazio, tempo e moto assoluti e i corrispondenti relativi e apparenti sembra essere assai funzionale a contrastare le inquietanti domande che la sua stessa esposizione poteva far sorgere.

Nella sua formulazione assiomatica ebbe cura di evitare indagini che avrebbero potuto indebolire la sua costruzione della dinamica; nei *Principia Mathematica*, Newton affermava esplicitamente di non voler definire spazio, tempo, luogo e moto proprio perché li considerava concetti già noti a tutti. Subito dopo aver definito alcuni termini tecnici meno comuni, Newton scrive nello *Scholium* (il commento che segue le definizioni iniziali): “*Fin qui abbiamo definito termini meno comuni. Non definisco tempo, spazio, luogo e moto, in quanto notissimi a tutti.*” Questa posizione è rafforzata

1 “Lex I: Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus a viribus impressis cogitur statum suum mutare.”

2 Newton, nello *Scholium*, si lamenta esplicitamente del fatto che non esiste in natura un orologio fisico perfetto. Fa l'esempio dei giorni solari, che non sono tutti esattamente uguali. Quindi, per Newton, il tempo degli orologi reali appartiene alla categoria del tempo “apparente e volgare”.

dalla seguente affermazione: “*Inoltre il volgo non concepisce queste quantità se non in relazione a oggetti sensibili.*” In questo, Newton si richiama alla pretesa secondo la quale la sensibilità ordinaria non coglie l’essenza delle cose, idea perfettamente compatibile con la *forma mentis* del matematico che trascura la forma dell’oggetto concreto per dedicarsi allo studio di figure astratte; ma doveva essersi accorto che, se non avesse posto all’inizio della sua esposizione dei principi non empirici, avrebbe dovuto affrontare difficoltà non lievi, come il definire un criterio universale per stabilire se un corpo è in moto o no, o come determinare empiricamente se un moto sia o no uniforme in assenza di qualsiasi riferimento a corpi materiali. Probabilmente aveva in mente il conflitto tra il sistema eliocentrico e quello geocentrico: quest’ultimo era più adatto a descrivere le apparenze, cioè i moti dei corpi celesti così come vengono osservati dalla Terra, ma è errato, dato che in realtà i pianeti ruotano intorno al Sole.

Impiegando una terminologia moderna, possiamo affermare che secondo Newton esiste un sistema di riferimento privilegiato, che non è un oggetto o un sistema di corpi materiali e quindi non è identificabile mediante l’osservazione; il moto rispetto ai singoli corpi materiali (osservatori compresi) è sempre relativo; il sistema privilegiato è lo spazio stesso, e quindi un moto può dirsi rettilineo e uniforme (o, al contrario, accelerato) solo in riferimento allo spazio così come egli lo concepiva. Eliminando la materia, lo spazio continuerebbe ad esistere immutato. Tale spazio è definito da Newton come *assoluto* (cioè, indipendente dall’osservatore e dai corpi in esso contenuti), *vero* (in quanto opposto agli spazi o ambienti cui, di fatto, facciamo generalmente riferimento, che sono “apparenti”) e *matematico* (in quanto la sua struttura è definita dalla geometria euclidea, l’unica considerata vera ai suoi tempi); brevemente, si parla di *spazio assoluto*.

A onor del vero, quando si attribuisce a Newton la paternità del concetto di spazio assoluto, si fa torto ad una scuola di pensiero già affermata; lasciamo parlare il filosofo e futuro vescovo George Berkeley nel suo breve trattato *De motu* (1721). “*Peripatetici pro varietate mutationum, quas res aliqua subire potest, varia motus genera distinguebant. Hodie de motu agentes intellegunt solummodo motum localem. Motus autem localis intelligi nequit nisi simul intelligatur quid sit locus; is vero a neotericis definitur pars spatii quam corpus occupat, unde dividitur in relativum & absolutum pro ratione spatii. Distinguunt enim inter spatium absolutum sive verum, ac relativum sive apparens. Volunt scilicet dari spatium? Spatium undequaque immensum, immobile, insensibile, corpora universa permeans & continens, quod vocant spatium absolutum. Spatium, autem, a corporibus comprehensum, vel definitum, sensibusque adeo subjectum, dicitur spatium relativum, apparens, vulgare.*”³ Non solo il senso, anche il lessico è quello di Newton, che aveva seguito gli insegnamenti del suo predecessore a Cambridge, Isaac Barrow, e partecipava delle idee correnti negli ambienti colti della sua epoca.

La critica di Berkeley ha carattere principalmente filosofico-psicologico, piuttosto che fisico. Infatti, subito dopo, al capo n. 53, il Nostro prosegue come segue: “*Fingamus itaque corpora cuncta*

3 “I peripatetici, per la varietà dei cambiamenti che qualcosa poteva subire, distinguevano diversi tipi di movimento. Oggi invece chi studia il movimento intende solo il movimento locale. Ma il movimento locale non può essere compreso se non sappiamo cos’è il luogo; e questo, secondo i moderni, è la parte di spazio che un corpo occupa, da cui si distingue in relativo e assoluto secondo lo spazio. Infatti distinguono tra spazio assoluto o vero, e spazio relativo o apparente. Vogliono dire, cioè, che sia dato uno spazio? Uno spazio ovunque immenso, immobile, insensibile, che pervade e contiene tutti i corpi, che chiamano spazio assoluto. Lo spazio invece, compreso o definito dai corpi e percepibile dai sensi, si chiama spazio relativo, apparente, comune.” *De motu*, pp. 18-19.

*destrui & in nihilum redigi. Quod reliquum est vocant spatium absolutum, omni relatione quae a situ & distantis corporum oriebatur, simul cum ipsis corporibus, sublata. Porro spatium illud est infinitum, immobile, indivisibile, insensibile, sine relatione & sine distinctione. Hoc est, omnia ejus attributa sunt privativa vel negativa. Videtur igitur esse merum nihil. Parit solummodo difficultatem aliquam quod extensum sit. Extensio autem est qualitas positiva. Verum qualis tandem extensio est illa, quae nec dividi potest, nec mensurari, cujus nullam partem, nec sensu percipere, nec imaginatione depingere possumus? Etenim nihil in imaginationem cadit, quod, ex natura rei, non possibile est ut sensu percipiatur, siquidem imaginatio nihil aliud est quam facultas representatrix rerum sensibilium, vel actu existentium, vel saltem possibilium.”*⁴

Tuttavia, l'analisi delle forze agenti nel moto circolare da lui proposta non è soddisfacente, e sembra che Berkeley non abbia ben compreso il senso dell'esperimento dell'acqua contenuta nel secchio posto in rotazione intorno al suo asse. Le forze centrifughe che sollevano il liquido verso l'esterno si manifestano solo quando il liquido è animato da un moto circolare rispetto all'ambiente del laboratorio, cioè rispetto alla Terra – questo è il risultato dell'esperimento, perché è ciò che lo sperimentatore osserva indipendentemente da come si interpreti il fenomeno. Queste forze centrifughe non sono affatto relative a qualche osservatore o altro corpo, in quanto producono effetti che non dipendono né dal punto di osservazione né dalla presenza dello sperimentatore o di altri oggetti presenti nelle vicinanze. Si potrebbe obiettare che in realtà gli effetti osservati dipendano dalla rotazione relativa alla Terra stessa, o alle stelle fisse o a qualunque sistema di corpi che si ritenga in quiete rispetto allo spazio, e quindi non vi sarebbe bisogno di uno spazio assoluto cui il moto rotatorio debba essere riferito; ma questa è un'obiezione di altro genere, che non è esplicitamente formulata da Berkeley. D'altronde, è difficile pensare che la Terra o altri corpi agiscano su una massa in rotazione in modo da creare forze centrifughe, la cui intensità dipende dalla distanza dall'asse di rotazione e dalla velocità di rotazione. La spiegazione più semplice era proprio quella newtoniana: queste forze erano originate dal movimento della massa rotante, non dalla presenza di altri corpi, e questo movimento, dato che gli effetti erano oggettivi e non relativi, doveva essere esso stesso oggettivo, cioè assoluto secondo il lessico dell'epoca.

Le critiche di Berkeley, vuoi perché la dinamica di Newton si rivelò così efficace da poter spiegare molti fenomeni fin allora scollegati tra di loro e non ben compresi, vuoi perché non abbastanza ben formulate nell'ambito delle scienze fisiche, non raccolsero consensi nelle epoche successive, fino a quando Mach non sviluppò una critica radicale molto più efficace dell'idea di spazio assoluto.

4 “Dunque immaginiamo che i corpi vengano distrutti e ridotti a nulla. Quello che resta si chiama spazio assoluto, privo di qualsiasi relazione che derivasse dalla posizione e dalle distanze dei corpi, assieme agli stessi corpi eliminati. Inoltre quello spazio è infinito, immobile, indivisibile, insensibile, senza relazioni e senza distinzioni. Questo vuol dire che tutti i suoi attributi sono privativi o negativi. Sembra quindi essere puro nulla. Solo il fatto che sia esteso crea qualche difficoltà. L'estensione però è una qualità positiva. Ma che tipo di estensione è quella che non può essere né divisa né misurata, di cui non possiamo percepire nessuna parte con i sensi né raffigurare con l'immaginazione? Infatti nulla entra nell'immaginazione che, per natura, non possa essere percepito dai sensi, visto che l'immaginazione non è altro che la capacità di rappresentare le cose sensibili, sia attualmente esistenti, sia almeno possibili.”

2. Il Principio di Relatività classica

A questo punto, si pongono due problemi: 1. Come si può dimostrare – o almeno giustificare – la teoria dello spazio di Newton? 2. Ammesso come ipotesi che le idee di N. siano corrette, come possiamo stabilire lo “stato di moto” di un osservatore o di un corpo rispetto a tale spazio?

Un’analisi approfondita del secondo punto conduce (secondo N.) alla giustificazione del primo; quindi, conviene esaminare lo stato di moto di un oggetto materiale rispetto allo spazio.

Anzitutto, si può notare come questo problema non sia affatto ozioso e trascurabile. Può sembrare, infatti, che stabilire una relazione dei corpi con lo spazio sia inutile: perché non considerare tutti i moti come relativi a oggetti materiali, e accettare come egualmente valide tutte le possibili descrizioni di un moto in generale, salvo il prendere in considerazione, caso per caso, la più opportuna? D’altronde, è ciò che si fa in pratica: quando si afferma che la velocità per esempio di un’automobile è di 50 km/h, si fa riferimento alla superficie terrestre, senza chiedersi quale sia la velocità “reale” rispetto a qualche ipotetico “spazio assoluto” del tutto superfluo in tale contesto. In realtà, la storia dell’astronomia sembra contraddire una tesi siffatta⁵: se tutti i moti sono considerati relativi e la scelta di un corpo o sistema di riferimento è arbitraria in linea di principio, perché mai dovremmo considerare i pianeti in rivoluzione intorno al Sole e non intorno alla Terra? Che senso avrebbe potuto avere il confronto tra i sistemi tolemaico e copernicano, anzi la stessa proposta di quest’ultimo come vero sistema del mondo? E inoltre: perché possiamo affermare che la Terra ruota intorno al proprio asse Nord-Sud in 24 ore? Rispetto a cosa i pianeti, la Terra e qualsiasi corpo in moto si muovono? Evidentemente, i vari sistemi di riferimento non sembrano essere ugualmente validi, ma costituiscono una gerarchia. Anche il Sole è in moto rispetto alla Via Lattea, e le galassie non sono immobili. I singoli corpi o sistemi di corpi, considerati fissi in un ambito locale, non sono tali in uno spazio più vasto.

Il prevalere dell’ipotesi eliocentrica su quella geocentrica dimostra che alcune descrizioni sono state considerate “più vere” di altre. Questo suggerisce che esistano sistemi di riferimento privilegiati, e dato che questi non possono essere riferiti ad un dato corpo o sistema di corpi, possono eventualmente consistere nella relazione con lo spazio stesso. A parte considerazioni di carattere astronomico – le quali indicano chiaramente che ogni sistema materiale che possiamo scegliere come riferimento risulta a sua volta in moto rispetto a un insieme più vasto, e che nessuno di essi appare in quiete nel senso newtoniano del termine, poiché possiamo osservare solo moti relativi – vi è tuttavia una ragione fondamentale a favore della teoria di Newton, o di qualsiasi altra teoria che, pur divergendo da essa in qualche punto, conservi una distinzione tra descrizioni corrette e non corrette, cioè tra osservazioni “valide” e “non valide”. *Tale ragione è la possibilità stessa della fisica*

5 Proprio la storia dell’astronomia prova che l’idea di un riferimento assoluto ha goduto del consenso universale ben prima delle formulazioni del Newton. La raffigurazione del cosmo come una successione ordinata di sfere presuppone un centro fisso, e già questo, insieme al motore immobile, è un sistema di riferimento assoluto. Il sistema copernicano fu rivoluzionario perché pose il centro nel Sole e non nella Terra, ma postulava un centro dell’universo come quello tolemaico; e così anche Keplero e Galilei non formularono l’ipotesi che non vi fosse alcun corpo centrale. La differenza tra “cosmo dotato di un centro” e “spazio assoluto” è più descrittiva-lessicale che concettuale; superato il contrasto tra i due sistemi a favore di quello copernicano, e abbattuta la distinzione tra fisica terrestre e fisica celeste, l’attenzione si spostava verso lo spazio, perché il problema del centro non era più attuale. Se pure l’astrazione dello spazio assoluto è precedente a Newton, questi ne evidenziò la necessità (secondo lui) attraverso l’analisi delle accelerazioni e delle forze, procedendo oltre l’idea intuitiva – già contenuta in quella di un centro del cosmo – di un contenitore di tutti i corpi.

come insieme di teorie dotate di significato oggettivo: le leggi della fisica devono essere oggettive (cioè, non dipendenti da circostanze particolari) e quindi non relative ai singoli osservatori, bensì valide per tutti: tuttavia, ciò è possibile solo se tutti i singoli osservatori adottano una visione del mondo in base alla quale concordano nella descrizione della stessa classe di fenomeni; e dato che ciò di fatto non avviene sempre, è *necessario stabilire se vi sono osservatori più attendibili di altri, quali sono e come si distinguono da tutti gli altri*. Lo spazio assoluto, che rappresentava per Newton il riferimento perfetto, giustificava l'esistenza della fisica come scienza oggettiva, perché non era un particolare osservatore e costituiva un riferimento universale: era quantomeno un'ipotesi sufficiente, se non proprio necessaria, a conseguire tale scopo. Altrimenti, vi sarebbero tanti universi possibili quanti sono gli osservatori, e non sarebbe possibile concepire una teoria unitaria dell'universo.

Se questo modo di concepire il problema è logicamente ineccepibile, esso comporta di per sé gravi difficoltà. La prima è ovvia: la fisica acquista un carattere essenzialmente teoretico e ideale; infatti, le sue leggi non sono “vere” per tutti, ma solo da un punto di vista molto particolare – quello dell'osservatore in quiete rispetto allo spazio assoluto. Si rifletta sulle resistenze ad abbandonare il sistema geocentrico, direttamente collegato alle osservazioni benché imperfetto e complicato, a favore di quello eliocentrico, che appariva ipotetico, astratto, non immediatamente in grado di prevedere i moti celesti e per di più non supportato inizialmente da osservazioni decisive a suo favore.⁶ L'idea di uno spazio assoluto che tutto contiene e rispetto al quale si deve riferire qualsiasi movimento è ancora più lontana dall'esperienza comune e dai risultati delle osservazioni e degli esperimenti. Nella misura in cui la scienza acquista certezza e universalità, diventa sempre più astratta e lontana dall'esperienza ordinaria (perché la realtà fenomenica è necessariamente relativa all'osservatore e non è immediatamente comprensibile a partire da principi generali). La seconda rimanda al problema precedente: per rimediare all'astrattezza, che sconfina nell'irrealtà, dobbiamo conoscere la nostra relazione con lo spazio. Se non risolviamo questo problema, anche qualora la fisica esistesse come teoria unitaria, essa si ridurrebbe a una descrizione astratta basata su ipotesi non verificate.

Quando si parla di relazione di un corpo o di un osservatore con lo spazio assoluto, si intendono almeno tre informazioni: posizione, velocità e accelerazione del corpo rispetto allo spazio. Per poter stabilire effettivamente tale relazione, queste tre grandezze devono essere conoscibili mediante le stesse procedure sperimentali, eseguibili da qualsiasi osservatore in qualsiasi luogo o tempo. È chiaro che *la posizione assoluta di un corpo non può essere definita*, anzitutto per ragioni teoriche: lo spazio secondo N. è infinito e omogeneo e quindi non dovrebbe avere un centro (ciò era invece possibile nel sistema aristotelico geocentrico e in quello copernicano eliocentrico); tutti i luoghi nello spazio sono indistinguibili e perciò equivalenti. Tuttavia, questa è una deduzione che N. non formulò esplicitamente, pur mantenendo l'idea che vi fosse un centro del mondo, di cui discusse nel Libro III.⁷ Il problema è ora la velocità. Si osserva che un dato corpo ha, rispetto a un dato osservatore, una velocità v ; qual è la sua velocità reale v' ? Anche in questo caso, N. (e non solo lui, ma pres-

6 Non solo; tra le conseguenze del sistema eliocentrico vi è l'assenza apparente di parallassi stellari, osservabili solo con strumenti moderni. L'astronomo Tycho Brahe propose il proprio sistema misto proprio per questo motivo.

7 Newton affermò che se la distribuzione di massa fosse finita, la materia esterna tenderebbe per gravità verso l'interno, collassando in un'unica massa sferica al centro. Ma se la materia fosse invece distribuita uniformemente in uno spazio infinito, non potrebbe mai riunirsi in un'unica massa, formando invece infiniti corpi sparsi (il Sole e le stelle fisse).

soché tutti i fisici da Galileo in poi) risponde negativamente: non è possibile determinare sperimentalmente la velocità assoluta v di un corpo (anche se nulla ci vieta di pensare che abbia un valore definito: ma *in fisica si pretende che una grandezza sia determinabile sperimentalmente*; la semplice ipotesi che abbia un valore definito non ha interesse, se non si può stabilire in qualche modo quale esso sia⁸).

Questa conclusione in realtà non risale a N., ma era già acquisita e generalmente ammessa. La sua giustificazione empirica deriva dal cosiddetto “*Principio di Relatività galileiana*” (in senso classico prerelativistico, da non confondersi con la teoria della Relatività, che però sostanzialmente lo accoglie). L’enunciato è il seguente: “*Se un sistema chiuso (nel senso che chi si trova al suo interno non può ricevere nessuna informazione dall’esterno) si muove di moto rettilineo e uniforme rispetto a un corpo esterno, è impossibile eseguire al suo interno esperienze od osservazioni che evidenzino il suo stato di quiete o di moto rispetto a quel corpo*”; per esempio, se ci troviamo all’interno di un vagone ferroviario che si muove di moto rettilineo e uniforme rispetto alla superficie della Terra (ciò significa che non avvertiamo urti e accelerazioni) e se nessuna informazione ci giunge dall’esterno, non possiamo sapere se noi stessi e l’ambiente in cui ci troviamo siamo in moto o se siamo in quiete rispetto alla superficie terrestre. A maggior ragione non possiamo misurare la nostra velocità, che non può essere quindi definita se non in relazione con il mondo esterno: infatti, ogni fenomeno osservato all’interno di un sistema in moto con velocità costante avviene come se questo fosse fermo. Detto altrimenti: per stabilire la propria velocità rispetto a un corpo, bisogna scambiare informazioni con quel corpo – per esempio, osservarlo direttamente. Tuttavia, *questo principio presuppone che si possa parlare di moto uniforme in senso assoluto* – vale a dire, che la differenza tra un moto uniforme e un moto non uniforme deve poter essere stabilita all’interno di un sistema chiuso, e nella teoria di Newton questa distinzione rimanda necessariamente a uno spazio “assoluto” rispetto al quale un moto è o non è uniforme.

Se non possiamo misurare la nostra velocità rispetto a oggetti al di fuori della nostra capacità di osservazione, a maggior ragione non possiamo stabilire la nostra velocità rispetto allo spazio assoluto: evidentemente, questo non è un ente “osservabile” nel senso che a questo termine viene comunemente attribuito, e quindi ogni ambiente od ogni corpo, rispetto ad esso, è “chiuso” in quanto è impossibile stabilire sperimentalmente la sua relazione con un ente non osservabile per natura. In un certo senso, *è un postulato geometrico necessario a giustificare la differenza tra moti uniformi e non*. Perciò, *le osservazioni eseguite in ambienti che si muovono di moto rettilineo e uniforme rispetto allo spazio assoluto sono tutte equivalenti, e tutti gli osservatori in moto rettilineo e uniforme rispetto allo spazio debbono constatare che, in condizioni uguali, i fenomeni avvengono allo stesso modo, cioè secondo le medesime leggi*, come se gli osservatori fossero fermi – non ha importanza se sono “veramente” fermi, anzi il concetto di “corpo fermo” a questo punto è inutile.

8 Questa pretesa è stata in larga misura abbandonata dall’attuale fisica teorica avanzata.

3. Giustificazione newtoniana dello spazio assoluto

Le conclusioni precedenti non si estendono all'accelerazione. Dobbiamo tenere presente che il moto di un corpo, cioè la variazione della sua posizione nel tempo rispetto a un osservatore o a un sistema di riferimento, è completamente descritto da posizione, velocità e accelerazione, termine che rigorosamente inteso significa non solo l'aumento o la diminuzione della rapidità del moto, ma anche la variazione della direzione del moto. Secondo la dinamica, non è necessario procedere oltre, perché le forze agenti su di un sistema fisico sono proporzionali alla sua accelerazione, il che fa di quest'ultima la grandezza più importante, quella dotata di reale contenuto fisico, a differenza della velocità che ha un carattere descrittivo ed è relativa all'osservatore. Immaginiamo di nuovo di essere all'interno di un vagone ferroviario, che inizialmente ha velocità costante rispetto alla superficie della Terra, e di non ricevere nessuna informazione dall'esterno, e supponiamo che, a partire da un certo istante, questo acceleri; è possibile rilevare questa accelerazione dall'interno del vagone, senza alcuna informazione esterna, e misurarla? La risposta è positiva: specie se la velocità dell'ambiente cresce abbastanza rapidamente, l'osservatore stesso avverte una forza che lo spinge nel verso opposto a quello del moto; al contrario, l'osservatore avverte una spinta nello stesso verso del moto se l'ambiente frena. Allo stesso modo, gli oggetti che non sono solidali con l'ambiente (cioè, che non sono vincolati a questo) sembrano mettersi in moto senza che su di essi agisca una forza di origine interna all'ambiente. Se un oggetto è lasciato cadere all'interno di un sistema chiuso che accelera lungo un piano orizzontale, l'osservatore all'interno non lo vede cadere lungo la verticale, come invece accadrebbe se il sistema non accelerasse. L'osservatore che verifica questi fenomeni può riconoscere l'accelerazione dell'ambiente col quale è solidale, almeno rispetto alla superficie terrestre; può affermare di accelerare rispetto allo spazio assoluto? *Anche in questo caso, N. risponde affermativamente: anzi proprio l'osservazione di questi fenomeni prova che il moto è relativo allo spazio.*

In realtà, N. affermò di aver eseguito un'esperienza a sostegno della sua teoria, quella del secchio rotante, e si basò essenzialmente sull'analisi delle forze centrifughe. In pratica, considerò il seguente esperimento. Riempì d'acqua un secchio e lo sospese con una fune, quindi torse la fune diverse volte, finché non divenne rigida (*donec filum a contorsione admodum rigescat*); aspettò che la superficie del liquido ridivenisse piana, e quindi lasciò che la corda si svolgesse, ponendo in rotazione il recipiente. Inizialmente, il moto è trasmesso solo al secchio – ci vuole un po' di tempo perché l'acqua, grazie al contatto con le sue pareti interne, cominci a ruotare. Quindi, al principio dell'esperimento, vi è rotazione relativa dell'acqua rispetto al secchio, e viceversa. Dopo un po', l'acqua ruota insieme col secchio – è in quiete rispetto a quello – e si nota che il profilo della sua superficie si solleva verso i bordi, in misura tanto maggiore quanto più veloce è la sua rotazione. N. conclude che le forze centrifughe che spingono le particelle d'acqua lontano dall'asse del moto di rotazione sono la manifesta conseguenza del moto rotatorio, esattamente come chi gira su una giostra avverte una forza centrifuga. *Il moto rotatorio è effettivo nella misura in cui produce effetti sperimentabili e oggettivi* – se non fosse per l'incurvarsi della superficie dell'acqua, non potremmo concludere nulla del genere; ogni rotazione sarebbe relativa, come lo è la velocità. N. ne deduce che l'accelerazione è determinabile in modo assoluto a partire dalle forze centrifughe, e quindi va riferita ad uno "spazio assoluto" e non ai singoli corpi materiali, rispetto alle quali può essere solo relativa. Secondo N., *il manifestarsi di forze centrifughe in un sistema fisico implica che questo sia in*

rotazione rispetto allo spazio. La sua conclusione ricalca le considerazioni svolte prima sugli effetti delle accelerazioni degli ambienti che trascinano in un moto traslatorio osservatore e corpi in essi contenuti, sia quando questi sono solidali con l'ambiente, sia quando non sono rigidamente vincolati, come nel caso di un passeggero in un mezzo pubblico in piedi sul pavimento. Le forze avvertite dagli osservatori e dai corpi non hanno origine riconoscibile nell'azione di altri corpi, e vanno intese come effetti della variazione della velocità dell'ambiente rispetto allo spazio, spiegazione, questa, ancora più convincente nel caso di forze centrifughe, che divergono dall'asse di rotazione e non hanno un orientamento fisso; non c'è modo di trattarle come forze esercitate da altri corpi. Si tenga presente che nella dinamica newtoniana le forze sono sempre azioni e reazioni tra corpi materiali. Le cosiddette forze di inerzia, quali quelle che agitano corpi soggetti ad accelerazione, secondo la dinamica classica non possono avere origine dall'azione di altri corpi.

È opportuno ribadire, qualora non fosse sufficientemente chiaro da quanto già detto finora, la differenza tra le definizioni di velocità e di accelerazione secondo la cinematica e quelle secondo la dinamica. La cinematica è puramente descrittiva e le sue definizioni sono formali, cioè non presuppongono la specificazione di un particolare sistema di riferimento fisico; di fatto, si impiegano assi cartesiani, o si scrivono equazioni senza precisarlo. La dinamica collega accelerazioni e forze ed esige la scelta di un sistema di riferimento fisico. Senza una teoria ben definita della dinamica, il problema dello spazio non si può trattare in termini moderni; ci si deve fermare a considerazioni filosofico-psicologiche. Ma in termini fisici, per via della seconda legge di Newton, il dibattito sulla natura dello spazio dipende dallo studio delle accelerazioni. L'esperimento del secchio rotante di Newton rientra a pieno titolo in questo schema. Lo stesso vale per il pendolo di Foucault, il cui piano di oscillazione varia nel tempo rivelando il moto di rotazione diurna della Terra; per la direzione del filo a piombo; e per la deviazione orientale dei gravi. Tutte queste osservazioni hanno in comune il fatto di essere eseguibili all'interno di un ambiente chiuso, o, almeno, di non dover fare riferimento alle stelle fisse. *Questo è un punto assolutamente fondamentale*, perché separa in modo netto la misura della velocità da quella delle accelerazioni; mentre per il Principio di Relatività classica non possiamo stabilire lo stato di moto o di quiete di un osservatore all'interno di un sistema chiuso in moto rettilineo e uniforme rispetto a un corpo esterno, possiamo stabilire se è o no accelerato solo in base a osservazioni ed esperienze compiute all'interno di un sistema chiuso. Infatti, le prove più forti della rotazione diurna terrestre sono gli esperimenti condotti in laboratorio (pendoli ecc.) o sulla Terra, trascurando i moti apparenti celesti, proprio perché sono ottenute senza considerare informazioni provenienti dall'esterno di un laboratorio, o dal cielo stesso.

Restava però un problema di non poco conto, del quale N. dimostrava d'essere pienamente cosciente. Di fatto, non possiamo avere direttamente informazioni sullo spazio e quindi in linea di principio non possiamo sapere se rispetto ad esso un dato moto sia correttamente descritto; N. pensava di aggirare, se non risolvere, il problema cercando un sistema di riferimento immobile, o almeno che potesse essere considerato tale con ottima approssimazione. In pratica, il suo suggerimento era di considerare tutti i moti come relativi a questo sistema di riferimento. A seconda dei casi, questo può essere la Terra per la maggior parte delle osservazioni effettuate sulla sua superficie, o il Sole se vogliamo valutare i moti planetari, o le stelle fisse se estendiamo le nostre ricerche all'astronomia. Le *stellae fixae* sono di fatto la soluzione ultima; non a caso, la prova del moto annuo di rivoluzione della Terra fornita da Bessel più di un secolo dopo si basava sull'osservazione della parallasse di 61 Cygni.

Questo passaggio avviene soprattutto nel Libro III dei *Principia*, intitolato *De Mundi Systemate* (Il sistema del mondo), dove Newton passa dalla matematica astratta all'astronomia. In un primo momento, Newton assume come dato osservativo, tra i *Fenomeni* che aprono il Libro III, che le stelle fisse siano in quiete l'una rispetto all'altra: da ogni punto di osservazione sulla Terra, esse non sembrano muoversi tra loro, mantenendo le stesse posizioni relative nei secoli. Ma Newton non si limita a questa assunzione empirica: nella Proposizione XIV del Libro III⁹ (*Orbium aphelia et nodi quiescunt*), dimostra che gli afeli e i nodi delle orbite planetarie sono in quiete, come conseguenza della legge di gravitazione. Nel Corollario I alla stessa proposizione, deduce che anche le stelle fisse sono in quiete, poiché mantengono posizioni fisse rispetto agli afeli e ai nodi. Nel Corollario II, aggiunge un argomento di natura dinamica: le stelle fisse, essendo distribuite uniformemente in tutte le direzioni del cielo, annullano reciprocamente le proprie attrazioni gravitazionali (*per prop. LXX lib. I*), cosicché nessuna di esse tende a cadere verso le altre. Questo stesso ragionamento era esposto per esteso nelle lettere a Richard Bentley (1693)¹⁰. Sulla base di questi tre argomenti congiunti – osservativo, geometrico-dimostrativo e dinamico – Newton conclude che le stelle fisse formano un'impalcatura rigida e non rotante immersa nello spazio assoluto, fornendo così il miglior sistema di riferimento accessibile all'osservazione.¹¹

Nel Libro III dei *Principia Mathematica*, N. discute la posizione del centro del mondo a partire dall'ipotesi secondo la quale *Centrum systematis mundani quiescere* (“il centro del mondo è in quiete”) concludendo *Hinc commune gravitatis centrum terrae, solis & planetarum omnium pro centro mundi habendum est* (“Si deve ritenere che il centro di gravità comune del Sole, della Terra e di tutti i pianeti sia il centro del mondo”). A tutto rigore, questo corollario consegue da una proposizione presentata come ipotesi (*Hypothesis I*), a favore della quale argomenta in questo modo: “*Hoc ab omnibus concessum est*” ecc. Mi pare che il senso generale si debba intendere nel modo seguente: *se accettiamo che vi sia un centro del mondo, e che sia in quiete e solidale con le stelle fisse, allora questo è il centro di gravità del sistema solare*.

È evidente che Newton avrebbe potuto spiegare gli effetti dei moti di rotazione in quanto relativi alle stelle fisse senza contraddire gli esiti dei suoi esperimenti sulle forze centrifughe e senza fare alcun riferimento allo spazio assoluto. Anzi, si potrebbe sostenere che sia proprio lo spazio assoluto, e non le stelle fisse, a costituire il riferimento meno soddisfacente dei due: non essendo un corpo materiale, esso non può rientrare nello schema di azione e reazione su cui Newton stesso fonda l'intera dinamica, laddove le stelle fisse, per quanto remote, restano quantomeno corpi materiali in

9 Faccio riferimento all'edizione del 1726.

10 Questa argomentazione non è corretta. L'equilibrio del sistema delle stelle fisse sarebbe intrinsecamente instabile. Una distribuzione perfettamente uniforme è un ideale matematico, ma fisicamente impossibile: la minima perturbazione innescerebbe il collasso gravitazionale della materia in grumi. Newton stesso, nelle lettere a Bentley, ammise che tale perfetto equilibrio non poteva essere il risultato di cause naturali, ma richiedeva un intervento divino.

11 È importante notare che la deduzione della legge di gravitazione universale non richiede, in linea di principio, il riferimento alle stelle fisse. La legge emerge dallo studio del problema dei due corpi, analizzando il moto relativo del pianeta rispetto al Sole. In un calcolo esatto, il Sole non è considerato un punto fisso, ma oscilla attorno al baricentro comune del sistema Sole-pianeta. L'orbita relativa è un'ellisse la cui dinamica dipende dalla massa totale del sistema ($M+m$), non solo dalla massa del Sole. Il baricentro, in assenza di forze esterne, è in quiete o in moto rettilineo uniforme, e costituisce quindi un sistema di riferimento inerziale naturale, interno al sistema stesso. Le stelle fisse intervengono non per dedurre la legge, ma per verificare empiricamente che questo sistema baricentrico sia effettivamente in quiete rispetto allo spazio assoluto.

senso proprio. Il fisico e filosofo della scienza *Ernst Mach* pervenne circa due secoli dopo proprio a questa conclusione, ma a favore della posizione di Newton vi erano due fattori: la forza di una tradizione che considerava lo spazio un elemento necessario ad ogni descrizione fisica dei moti, e il fatto che da un punto di vista fisico il riferimento alle stelle fisse non è più chiaro né più comprensibile di quello allo spazio. Le stelle fisse dovrebbero essere tali rispetto allo spazio, ma non sono veramente in quiete; sono animate da moti locali, e appaiono fisse solo grazie alla loro enorme distanza dal sistema solare, che rendeva impossibile la misura dei loro movimenti all'epoca di Newton.¹² Il loro insieme non è un sistema fisico di corpi solidali, e in astronomia può essere preso come riferimento per via di un'illusione che nasconde la profondità del cosmo per sostituirvi un'immagine fissa sulla volta celeste.¹³

Inoltre, fino alla scoperta della possibilità di geometrie non euclidee, o meglio della loro coerenza relativa (se è coerente la geometria euclidea, devono esserlo anche le geometrie non euclidee), l'unica geometria considerata vera era quella euclidea. Il modello dello spazio fisico era quello dello spazio geometrico; ma dal momento in cui diverse geometrie sono logicamente possibili, non vi può essere certezza su quale rappresenti effettivamente lo spazio. Già Gauss, nel 1824, espresse l'idea che la decisione dovesse essere lasciata a osservazioni empiriche; la stessa posizione fu assunta da Lobačevskij; poi Riemann, nella sua celebre prolusione del 1854 (*Sulle ipotesi che stanno alla base della geometria*) formulò l'ipotesi che la geometria dello spazio potrebbe non essere fissata a priori, ma dipendere dalla distribuzione della materia al suo interno – un'idea che anticipava concettualmente la Relatività Generale. La nozione della possibilità di molte geometrie minava le fondamenta della convinzione secondo la quale la natura dello spazio, così come era stata concepita, fosse necessaria e conoscibile indipendentemente dall'esperienza, e che fosse indipendente dalla materia che vi era contenuta. Questa stessa convinzione – che lo spazio fosse una struttura necessaria e conoscibile a priori – aveva trovato la sua formulazione filosofica più compiuta in *I. Kant* (*Critica della ragion pura*), secondo il quale le rappresentazioni dello spazio e del tempo sono forme *a priori* della sensibilità, senza le quali ogni conoscenza del mondo esterno sarebbe impossibile. Veniva a cadere la necessità della costruzione assiomatica di Newton, e si prospettava quella di riesaminare in modo radicalmente diverso il problema del moto, eventualmente rivalutando posizioni relativiste analoghe a quella di Berkeley.

12 Nel 1718, E. Halley annunciò che Aldebaran, Arturo e Sirio risultavano spostati dalle posizioni attese di frazioni consistenti di grado, deducendo che ciascuna avesse una propria velocità di traslazione nel cielo, ma la prova definitiva dell'esistenza di moti locali delle stelle deve attribuirsi a J. Cassini (1738).

13 È da notare che N. considerava lo spazio un *sensorium Dei*, cioè l'organo con il quale Dio osservava l'intero universo. Il lessico non è quello di Kant, ma la funzione che il filosofo tedesco attribuiva allo spazio è in un certo modo affine al concetto newtoniano, con la differenza che per Kant la forma *a priori* è una categoria cognitiva.

4. Osservatori inerziali e non inerziali

Diverse obiezioni furono opposte alla teoria dello spazio (e del tempo, anch'esso considerato assoluto e indipendente dalla materia) di N. Queste possono essere derivate contraddicendo le ipotesi – talvolta implicite – sulle quali egli si era fondato. Se si analizza il concetto di spazio assoluto, si può concludere che esso comprende le seguenti ipotesi: 1. Esistenza indipendente da quella della materia; 2. Proprietà (quelle formulate nella geometria euclidea) indipendenti dal singolo osservatore e dalla materia; 3. Il ruolo dell'accelerazione, che manifesta il moto rispetto allo spazio attraverso le forze centrifughe (e, più in generale, le forze d'inerzia). Si può quindi obiettare contro l'antioriorità dello spazio rispetto alla materia, contro l'indipendenza della sua struttura formale (assiomi e teoremi della geometria) dalla materia e contro la sua stessa deduzione a partire dalle forze centrifughe. Le critiche più interessanti si possono riassumere in due contro-teorie: 1. *La teoria dello spazio come insieme di relazioni: in breve, i corpi materiali sono una realtà anteriore rispetto allo spazio; questo esprime in un concetto unificante le possibili relazioni – compatibili con l'esperienza, l'intuizione e la logica – che intercorrono tra le figure geometriche, viste come idee che esprimono proprietà dei corpi quali estensione e forma*; 2. *La teoria della scienza in generale come di una struttura i cui elementi (concetti e leggi) devono esprimere l'esperienza, e solo ciò che da essa può essere dedotto*: per cui devono essere eliminati dalla fisica tutti i riferimenti a sostanze, enti, ipotesi ecc. per i quali non si possa trovare un fondamento sperimentale.

Il secondo punto di vista (che comunque non è incompatibile col primo; anzi, sono spesso condivisi) è stato sostenuto contro la posizione di N. soprattutto dal fisico austriaco *E. Mach* (1838-1916), il cui lavoro *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico* influenzò profondamente la filosofia della scienza, modificando in modo sostanziale l'approccio ai fondamenti della dinamica classica. Secondo M., il concetto di N. dello spazio non è deducibile dall'esperienza; la distinzione tra moto assoluto e moto relativo (in riferimento soprattutto all'accelerazione) presupporrebbe fin dall'inizio l'idea di uno spazio assoluto: *se si resta sul terreno dei fatti, non si conosce altro che spazi e moti relativi a corpi materiali*. Il sistema tolemaico e quello copernicano sono entrambi corretti, ma il secondo si è dimostrato più semplice e più pratico del primo. L'Universo non ci è dato due volte (cioè: non è “fattuale” distinguere per esempio fra la Terra in quiete e la Terra in rotazione), ma una volta sola, con i suoi moti relativi, gli unici che sono misurabili: in base all'osservazione, possiamo solo affermare che la Terra ruota rispetto alle stelle fisse – ogni altra descrizione si avvale di ipotesi non verificabili.

In effetti, analizzando l'interpretazione di N., si può notare un “salto logico” nel momento in cui ipotizza che le forze centrifughe manifestino il moto rispetto allo spazio assoluto. Prendiamo la rotazione della Terra: questa può essere misurata in modi diversi, con procedure operative indipendenti tra loro – per esempio, misurando la variazione del piano di oscillazione di un pendolo, o la deviazione orientale dei gravi, o anche le accelerazioni cosiddette “complementari” (che si manifestano nella formazione delle correnti cicloniche e anticicloniche nell'atmosfera: si tratta di fenomeni spiegabili mediante la rotazione terrestre). Tutte queste osservazioni forniscono lo stesso risultato, cioè possono essere interpretate ammettendo che la Terra ruoti in quasi 24 h, senza riferirci ad alcun altro corpo presente nell'Universo. Ma tale periodo della rotazione “assoluta” coincide con la rotazione del cielo delle stelle fisse intorno all'asse terrestre: detto altrimenti, la Terra ruota rispetto alle stelle fisse proprio in quasi 24 h. Non potrebbe essere proprio questa rotazione “relativa” la causa

dei fenomeni osservati sulla superficie del pianeta? Detto altrimenti: la causa delle forze centrifughe potrebbe essere (data la stretta coincidenza dei tempi di rotazione misurati) proprio la rotazione relativa alle stelle fisse, rotazione rispetto a corpi materiali, e non una presunta rotazione rispetto a uno spazio ideale, la cui realtà fisica non potrebbe essere dedotta se non attraverso proprio quei fenomeni per la spiegazione dei quali è stato introdotto. Non è possibile eseguire un esperimento che decida una volta per tutte quale sia la giusta interpretazione, perché l'analisi teorica di ogni esperimento del genere sarebbe in realtà fondata su una qualche teoria dello spazio e del movimento. Tuttavia, la critica di Mach – anche qualora non venga interamente accolta – ha indotto i fisici a modificare il linguaggio in cui la dinamica viene esposta, sostituendo allo spazio di N. il concetto di “osservatore inerziale”, O.I.

È a *Ludwig Lange* (1885) che dobbiamo il termine esatto "sistema inerziale" (*Inertialsystem* in tedesco¹⁴). L. definisce il sistema inerziale in modo puramente operativo: "Un sistema inerziale è un qualsiasi sistema di riferimento in cui un corpo libero (non soggetto a forze) si muove di moto rettilineo uniforme." È necessario che un osservatore inerziale, cioè solidale con un sistema inerziale, sia libero da forze esterne; abbiamo già visto che, se così non fosse, l'osservatore verificherebbe il manifestarsi di “forze apparenti” come le forze centrifughe (per un osservatore inerziale, reale è solo la forza centripeta che obbliga un corpo a muoversi intorno a un centro o a un asse, non la forza centrifuga). Quindi, almeno in linea di principio, esiste un criterio applicabile in pratica per decidere se un dato osservatore o sistema di riferimento è o no inerziale, e non vi è bisogno di sistemi di riferimento privilegiati perché ritenuti immobili o quasi, o dello stesso spazio assoluto.

Si osservi che la precisazione introdotta a proposito della definizione di osservatore inerziale, che a prima vista può apparire ridondante, è necessaria per stabilire operativamente la condizione sotto la quale un osservatore è tale. Un osservatore è inerziale se e solo se la risultante di tutte le forze esterne su di esso agenti è nulla: è la stessa condizione soddisfatta dal centro di gravità di un sistema di corpi in quiete, o in moto traslatorio uniforme.¹⁵ La definizione data, senza questa precisazione, è insufficiente: si consideri un sistema in caduta libera e i corpi contenuti al suo interno, alcuni in quiete, altri in moto rettilineo uniforme relativamente al sistema. Un osservatore in quiete rispetto a questo ambiente non rileva nessuna violazione del principio di inerzia; tuttavia non è inerziale, essendo soggetto alla forza di gravità, che, in un volume sufficientemente piccolo da rendere trascurabili le forze di marea, imprime le stesse accelerazioni a tutte le masse in esso comprese. L'osservatore deve verificare che gli oggetti di cui osserva il comportamento non siano soggetti a forze esterne, dato che i moti da lui misurati sono sempre e soltanto relativi al suo sistema di riferimento, e non può procedere ad una corretta misura delle forze in gioco se è soggetto ad accelerazioni.

14 Si deve a James Thomson, in quegli stessi anni, l'introduzione del termine “frame of reference”.

15 Si osservi che Newton pone il centro del mondo nel baricentro del sistema solare. Le stelle possono (e hanno effettivamente) moti locali, ma il baricentro del sistema delle stelle fisse deve rimanere in quiete, affinché possano collettivamente fungere da riferimento ultimo. In entrambi i casi, il centro di gravità è il punto fisso, non un corpo in particolare. L'annullarsi della risultante di tutte le forze è essenziale tanto per definire punti fissi che servano come riferimento, quanto per caratterizzare gli osservatori inerziali.

Per garantire che un sistema di riferimento sia inerziale, Lange propose una complicata costruzione¹⁶, partendo dall'ipotesi che esistano corpi liberi, cioè non soggetti a forze esterne, in modo da evitare ogni riferimento allo spazio assoluto. In breve, questa costruzione consiste nella determinazione di tre particelle libere che si muovano di moto rettilineo su tre rette non complanari, rispetto ai quali ogni altro corpo libero si muova di moto rettilineo. Questo risultato può essere raffinato come segue: *rispetto a un sistema di coordinate in cui tre particelle libere si muovono in linee rette e percorrono distanze proporzionali tra loro, il moto di qualsiasi quarta particella libera sarà rettilineo e uniforme*. Vi è – mi sembra – una difficoltà; cosa ci assicura che particelle libere continuino a muoversi in modo che i rapporti tra le distanze percorse siano costanti? Evidentemente, il principio di inerzia applicato a ciascuna particella e l'uniforme scorrere del tempo per tutti. Ma allora, a parte l'ingegnoso metodo adottato, non si vede quale sia il vantaggio rispetto alla più semplice formulazione newtoniana. L'interesse della proposta di Lange, e in generale di ricerche effettuate verso la fine del XIX secolo, consiste essenzialmente nell'esplorazione della possibilità di eliminare dalla fisica entità “metafisiche” ovvero non osservabili, e le idee connesse.

Tuttavia, c'è da chiedersi se la definizione di Lange costituisca una vera eliminazione dello spazio assoluto o semplicemente una sua riformulazione in termini operativi. Se un osservatore inerziale è colui rispetto al quale un corpo libero si muove di moto rettilineo uniforme, il concetto di spazio rientra ineludibilmente dalla finestra: per definire la “retta” e la “uniformità” del moto senza fare appello a uno sfondo assoluto, si deve infatti postulare a priori una geometria euclidea e un tempo universale in cui questi moti ideali possano verificarsi. I critici di Lange, e in seguito Poincaré nella sua riflessione sul convenzionalismo, notarono che, non esistendo in natura corpi perfettamente liberi da forze a causa della gravitazione universale, la definizione di sistema inerziale richiede comunque l'assunzione di uno sfondo spaziale e temporale fisso e inerte. Lange aveva dunque eliminato lo spazio assoluto come “sostanza” (il *sensorium Dei* newtoniano), ma non era riuscito a eliminarne la funzione di struttura geometrica *a priori*.

Ricapitolando: nella formulazione di N. gli O.I. corrispondono agli osservatori in moto traslatorio e uniforme rispetto allo spazio; da un punto di vista moderno, sono gli osservatori per i quali le leggi della dinamica classica sono vere, nel senso che qualsiasi fenomeno descritto da un O.I. soddisfa le leggi di N. Quindi, il moto di un corpo non soggetto a forze, misurato da un O.I., appare rettilineo e uniforme; se un O.I. misura la forza $\mathbf{F}$ ¹⁷ agente su un corpo di massa m , trova che l'accelerazione $\mathbf{a}$ soddisfa la legge $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$; ecc. Viceversa, gli osservatori non-inerziali eseguono esperienze in contrasto con quelle di N., e queste differenze vengono spiegate introducendo il concetto di “forze fittizie” o apparenti – dette anche “forze d'inerzia”.

In che modo un osservatore può stabilire la propria situazione? Si può riconsiderare l'esempio di un vagone che accelera rispetto alla superficie terrestre: chi si trovi al suo interno osserverà che tutti i corpi non vincolati al vagone (per esempio lasciati cadere, o semplicemente appoggiati sul pavimento senza essere in alcun modo trattenuti) acquisteranno la stessa accelerazione indipendentemente dalle rispettive masse (questa indipendenza di $\mathbf{a}$ da m è caratteristica anche della gravità –

16 v. riferimento bibliografico e descrizione del procedimento in E. Mach, *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, Boringhieri 1977 e on line all'indirizzo <http://www.superezko.net> e on line all'indirizzo [Space and Time: Inertial Frames \(Stanford Encyclopedia of Philosophy\)](http://www.superezko.net).

17 Ho impiegato il neretto per indicare grandezze vettoriali.

fatto, questo, certo non casuale e suscettibile di ulteriore analisi¹⁸), ed è facile vedere che ciò consegue dal principio d'inerzia, e che tale accelerazione (acc. relativa, $\mathbf{a}_r$) è uguale e contraria a quella dell'osservatore che la misura (detta "acc. di trascinamento", $\mathbf{a}_t$); cioè, si ha: $\mathbf{a}_r = -\mathbf{a}_t$. L'indipendenza di queste accelerazioni misurate rispetto alle masse, che si manifesta in ogni caso di osservatore non inerziale, per esempio l'osservatore in rotazione rispetto a un asse, e il fatto stesso di avvertire gli effetti dell'accelerazione di trascinamento, permettono di riconoscere che l'osservatore e il sistema con il quale è solidale non sono inerziali.

È importante rendersi conto di come *l'indipendenza delle accelerazioni relative ad un sistema non inerziale dalle masse sia una conseguenza dello stesso principio d'inerzia*. Infatti, consideriamo un sistema di corpi C inizialmente tutti in quiete rispetto a un sistema di riferimento S , ma non vincolati ad esso e liberi l'uno rispetto agli altri, in modo da potersi muovere indipendentemente. Sia i corpi C sia l'ambiente S si muovono inizialmente di moto rettilineo e uniforme con la stessa velocità $\mathbf{v}$ rispetto ad un sistema inerziale o quasi, come la superficie terrestre, O ; per il principio d'inerzia tutti i C , non essendo trascinati da S , persisteranno nel loro moto rettilineo uniforme rispetto a O con la stessa velocità $\mathbf{v}$ anche qualora S subisca un'accelerazione. Il moto relativo al sistema accelerato è quindi un moto d'insieme, con la stessa accelerazione rispetto a S . *L'inerzia (tendenza dei corpi a muoversi con velocità costante) implica l'indipendenza dell'accelerazione relativa a un osservatore non inerziale dalla massa del corpo*. Viceversa, se un insieme di corpi liberi manifesta, rispetto a un dato osservatore, un moto accelerato di insieme indipendente dalla massa dei singoli corpi, dobbiamo dedurre che tale osservatore non è inerziale, e che i corpi in questione si muovono in realtà di moto rettilineo uniforme rispetto a un O.I. Per moto "accelerato di insieme" deve intendersi non solo il caso in cui le accelerazioni dei singoli corpi sono uguali, ma anche il caso in cui siano sottoposti a forze centrifughe: in questa situazione le accelerazioni non saranno uguali; essendo orientate nel senso dell'allontanamento dall'asse di rotazione e dipendenti dalla distanza da esso, dipenderanno dalle posizioni dei corpi. Le accelerazioni misurate da un osservatore non inerziale dipendono dalla posizione dei corpi accelerati, o sono uguali per tutti. È opportuno introdurre il concetto di *campo di accelerazioni*, un esempio del quale è il campo gravitazionale, che però persiste anche se l'osservatore è inerziale¹⁹: quindi, mentre un campo di accelerazioni misurato in un sistema non inerziale può essere rimosso, ciò non è possibile per il campo gravitazionale.²⁰

In sintesi, tutti gli O.I. sono in moto traslatorio uniforme l'uno rispetto all'altro e tutti gli osservatori non inerziali sono in moto accelerato rispetto agli O.I. ed eventualmente tra di loro. Questi ultimi si riconoscono dal fatto che misurano campi di accelerazioni dovuti al loro moto accelerato rispetto agli O.I. e non osservati da questi ultimi.

18 È il fatto empirico a partire dal quale Einstein sviluppò la Relatività Generale.

19 Nella fisica classica, un campo è una grandezza dipendente dalla posizione. Si tratta di una informazione contenuta nello spazio. Applicato all'accelerazione di gravità, il concetto suggerisce l'idea di una relazione con lo spazio, oltre a quella di attrazione reciproca tra corpi. Vi è di più; il campo elettromagnetico si propaga nel vuoto alla velocità della luce e le cariche elettriche di prova subiscono l'azione del campo, non quella della carica sorgente; questa potrebbe non esistere nell'istante in cui le cariche di prova sono investite dal campo. Allo stesso modo, per lo stesso motivo, possiamo ricevere la luce da una stella molto lontana che sia già esplosa. Lo stesso vale per il campo gravitazionale; l'interazione tra due masse non è istantanea, anche il campo gravitazionale si propaga alla velocità della luce nel vuoto. Invece, un campo di accelerazioni fittizie non trasporta energia, non esercita forze, non ha realtà fisica; è solo il prodotto di osservazioni condotte in sistemi non inerziali.

20 Anche questa osservazione costituisce il punto di partenza della formulazione della Relatività Generale.

5. La posizione di Mach

Il fisico e filosofo della scienza *E. Mach*, dopo aver evidenziato come Newton non si fosse attenuto rigorosamente ai fatti nel formulare il concetto di spazio assoluto, propose che ogni moto dovesse considerarsi relativo a un dato corpo, o a un sistema di corpi, escludendo dall'analisi dei fenomeni ogni ipotesi "metafisica", cioè non confrontabile con osservazioni. Questa posizione può implicare che le forze di inerzia o, se si preferisce, le accelerazioni fittizie sarebbero generate dall'effetto della massa totale dell'universo sulle singole masse che lo compongono; di fatto, gli effetti del moto sarebbero una sorta di autointerazione di tutto il cosmo. *"Nessuno è in grado di dire cosa succederebbe se il secchio rimanesse fermo e l'universo intero ruotasse intorno ad esso. [...] Quando diciamo che un corpo K cambia la sua direzione e velocità solo per l'influenza di un altro corpo K' , abbiamo pronunciato una proposizione che è totalmente priva di senso se non pensiamo a un corpo fisso rispetto a cui avviene il cambiamento."*²¹ Ma allora, cosa accadrebbe se il secchio fosse fermo e fossero le stelle lontane a ruotare vorticosamente intorno ad esso? Questa domanda è una conseguenza delle idee di Mach sul movimento: tutti i moti sono reciproci ed è indifferente chiedersi quale corpo è fermo e quale in moto. Così, le forze centrifughe misurate dall'osservatore terrestre sarebbero effetti di una qualche azione esercitata sullo stesso osservatore e sui corpi ad esso vicini da parte di corpi lontani: si pone cioè il problema della natura delle forze prodotte dalle masse remote dell'Universo (cioè, le stelle fisse) sui corpi in rotazione rispetto ad esse. È difficile evitare di giungere a questa conclusione, se si assume che in fisica la causa di ogni fenomeno deve essere intesa come forza, cioè come azione di un corpo su un altro corpo. Di che tipo di forze si tratterebbe? Si può dire che queste forze sono l'origine dell'inerzia stessa dei corpi: infatti, essa si manifesta come tendenza di un corpo a resistere alle forze che lo pongono in accelerazione; ma questa è sempre relativa alle masse remote, che rappresentano lo "sfondo" fisico di ogni evento (e che sostituiscono lo spazio di N): quindi l'inerzia è la tendenza ad opporsi ad una variazione della velocità relativa alle masse remote (cioè, all'insieme delle stelle fisse) e deve essere conseguenza dell'azione di queste masse (che sono, in un certo senso, l'universo stesso) sui singoli corpi. Secondo la formulazione più comune del cosiddetto Principio di Mach²², l'inerzia di un corpo non è una proprietà intrinseca della materia immersa in uno spazio assoluto, ma è determinata dalla distribuzione di tutta la massa dell'universo. Quindi, *la massa stessa (che misura l'inerzia) non è più una proprietà dei corpi, ma esprime la relazione tra i corpi e tutto il resto dell'Universo.*

In realtà, le critiche che M. mosse all'interpretazione newtoniana dell'esperienza dell'acqua nel secchio rotante non implicavano esplicitamente una spiegazione delle forze d'inerzia nei termini della dinamica, come quella sopra esposta. Dato il suo empirismo estremo, M. non proponeva alcuna spiegazione definitiva, limitandosi ad esporre ciò che è possibile conoscere sperimentalmente. Nel suo credo filosofico, la scienza sembra doversi limitare a organizzare le informazioni traibili da osservazioni ed esperienze eseguibili. Se pure questa posizione ha il merito di eliminare idee inutili, in compenso tende a ridurre la scienza ad una funzione essenzialmente descrittiva, come se fosse la mappa di un territorio, rinunciando – se portata all'estremo – a ciò che vi è di più vitale nella ricerca

21 Tratto da *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, Boringhieri 1977. Il confronto con la traduzione inglese del McCormack (1919) evidenzia alcune discrepanze non proprio di nessun conto su alcuni punti nella discussione dell'esperimento del secchio rotante.

22 In realtà, Mach non lo ha mai formulato come "principio" né gli ha mai dato questo nome. Il nome è stato coniato da Albert Einstein nel 1918, cercando di catturare l'essenza delle critiche di Mach a Newton.

scientifica, cioè alla proposta di ipotesi o di teorie generali dalle quali dedurre la spiegazione dei singoli fenomeni in un quadro organico. *Senza un apparato teorico non vi è spiegazione, vi è solo descrizione*, e non si vede come una teoria possa consistere solo di materiale di origine empirica.

Vediamo ora più in dettaglio la critica a Newton. “...ancora una volta [fa riferimento all’esperimento del secchio rotante] *Newton non mantiene il proposito di prendere in considerazione solo il ‘fattuale’*. Nessuno, a nostro parere, è in grado di dire qualcosa sullo spazio assoluto e sul moto assoluto, che sono puri elementi ideali non conoscibili sperimentalmente. Come abbiamo già detto, tutti i principi fondamentali della meccanica sono conoscenze sperimentali su posizioni e movimenti relativi dei corpi.” Più avanti, M. prende in considerazione l’idea che tutto lo spazio possa essere riempito da un mezzo (“la cosa in sé non è impossibile”): qualora le conoscenze sperimentali al riguardo aumentassero, l’idea di assumere come sistema di riferimento un mezzo onnipervasivo potrebbe avere maggior valore scientifico di quella dello spazio assoluto, “che tante difficoltà porta con sé”.

“L’esperimento newtoniano del vaso pieno d’acqua [...] ci insegna solo che tali forze [le forze centrifughe] sono prodotte dal moto rotatorio relativo alla massa della terra e agli altri corpi celesti.” Tutto ciò va bene se vogliamo descrivere ciò che si osserva, ma potrebbe non essere sufficiente, se ci chiediamo che cosa effettivamente accade per giustificare i fenomeni. L’osservazione da sola non insegna nulla oltre alla registrazione di ciò che abbiamo osservato. M. considera il moto in quanto tale la causa immediata delle forze centrifughe, ma non possiamo credere che questa sia la spiegazione definitiva. Se il moto è una relazione tra corpi, non è difficile compiere un piccolo passo e chiedersi se le masse, quelle vicine e soprattutto quelle lontane (le cosiddette stelle fisse) non esercitino una qualche influenza sui corpi rotanti: altrimenti, in che modo il moto in quanto tale potrebbe produrre gli effetti osservati? Se tutti i moti sono relativi, e se la dinamica è basata sul concetto di forza, la conclusione sembra inevitabile; le forze centrifughe e anche tutte le forze di inerzia manifestano l’azione di masse remote.

Tuttavia, poco oltre, M. concede che “Newton, malgrado una certa propensione all’assoluto metafisico, si lasciò sempre guidare dalla prudenza dello scienziato.” Concorda con Newton nel riconoscere il “grande valore” della legge d’inerzia, “semplice e precisa” e osserva che “le leggi newtoniane sui moti dei pianeti restano conformi alla legge di inerzia anche se questi moti sono riferiti al cielo delle stelle fisse.” In questo fare riferimento a sistemi materiali nello studio dei moti e del sistema del mondo, Mach riconosce la “prudenza” dello scienziato Newton.

Mach analizza il principio di inerzia su basi strettamente empiriche. “Corpi molto distanti tra loro, che si muovono con direzione e velocità costanti rispetto a corpi fissi lontani, mutano le loro distanze reciproche in misura proporzionale al tempo.” In effetti, ogni osservatore concorderebbe con questa descrizione; tuttavia, M. non fornisce – in questo contesto – alcuna definizione di “corpi fissi”, che, mi sembra, considera tali rispetto alle stelle, anch’esse fisse per convenzione. In effetti, la scelta delle stelle fisse come riferimento materiale ultimo è coerente con l’empirismo di Mach, considerando che non si trova niente di meglio. Eppure, proprio la riflessione su questa scelta dovrebbe far emergere i limiti dell’empirismo, dato che le stelle non sono affatto in quiete; tuttavia, quando si deve giudicare la natura di un particolare moto, le masse remote sembrano essere il miglior sistema di riferimento accessibile alle osservazioni, anche qualora si accetti l’idea dello spazio assoluto.

M. propone un'originale formulazione del moto rettilineo e uniforme di una massa n : la sua accelerazione media rispetto alle masse remote m_i situate alle distanze r_i da n è nulla, ossia,

$$\frac{d^2}{dt^2} \frac{\sum_i m_i \vec{r}_i}{\sum_i m_i} = 0.$$

[Questa stessa equazione afferma anche che il centro di gravità delle masse m_i nel sistema di riferimento di n è in quiete rispetto a qualsiasi corpo che si muove di moto inerziale, confermando l'idea che le forze d'inerzia siano dovute all'accelerazione rispetto al centro di gravità delle masse lontane o stelle fisse].

In sintesi, l'approccio di Mach consiste nella sostituzione di un'ipotesi (lo spazio assoluto) con un punto definibile in meccanica, quello di centro di gravità delle masse lontane o dell'universo (le masse vicine non sembrano avere alcun ruolo nell'origine di forze fittizie). Non è possibile, afferma Mach, fare astrazione dal resto dell'universo. Se accettiamo che la gravità sia l'effetto della reciproca azione di due o più masse, possiamo accettare, andando appena oltre il pensiero di Mach, che le forze fittizie siano l'effetto dell'azione di tutte le altre masse su una di esse. Questo è in sostanza il significato del Principio attribuito a Mach.

Tuttavia, mi sembra chiaro che Mach era in grado di porre lucidamente il problema dello spazio e del moto, ma certo non di risolverlo. Le interazioni tra le masse, per quanto se ne sapeva ai suoi tempi, erano descritte dalla Legge di Newton, che appare del tutto estranea al Principio di Mach, almeno a prima vista; esplorando più in profondità, si può cogliere un'affinità tra le forze di inerzia e la forza peso, dato che in entrambi i casi le accelerazioni, come abbiamo visto, non dipendono dalle masse, ma eventualmente dalla posizione. Il lettore noterà che questa affinità richiama il principio di identità di massa inerziale e gravitazionale, ben noto già a partire da Newton, ma rimasto senza spiegazione fino a quando Einstein non formulò il Principio di Equivalenza. La critica di Mach ha essenzialmente carattere metodologico: si trattava, dal suo punto di vista, di eliminare ipotesi metafisiche superflue, limitandosi a ciò che è possibile dedurre empiricamente.²³

Gli sviluppi dovuti ad Einstein non confermano il Principio di Mach, anche se Einstein trasse ispirazione proprio dalla sua critica a Newton. Ciò che dell'approccio di Mach viene conservato nella Relatività Generale è una formulazione che non necessita di uno spazio come *background*, nel senso che la sostanza dello spazio-tempo coincide con la totalità degli eventi passati, presenti e futuri. La teoria stabilisce come la rete degli eventi è organizzata e collega la geometria alla materia. Tuttavia, la geometria non è completamente determinata dalla presenza della materia. Lo spazio-tempo è dotato di proprietà caratteristiche come la curvatura, e inoltre è possibile concepire un universo privo di materia. Del resto, le osservazioni astronomiche confermano che le distanze tra ammassi di galassie sono così grandi da poter considerare l'universo osservabile come mediamente vuoto. Le masse si muovono lungo le geodetiche dello spazio-tempo, non per interazione diretta tra di loro (non esiste la possibilità di interazione istantanea, questione che Mach non si era posto, perché è conseguenza della sintesi di meccanica ed elettromagnetismo operata dallo stesso Einstein con

23 Questa posizione, di matrice sostanzialmente positivista, nasconde una grande difficoltà insita nel termine "deduzione". Evidentemente non è possibile intenderlo in senso di "dimostrazione matematica" che non ha nulla di empirico; ma su quale base possiamo affermare che tutta la fisica è deducibile soltanto da osservazioni empiriche?

la formulazione della Relatività Ristretta), quindi il moto di una massa in caduta libera dipende dalla geometria locale dello spazio-tempo. Inoltre, la struttura dello spazio-tempo è regolata dalle leggi di trasformazione, che sono definite dalle proprietà matematiche di una varietà di Riemann a quattro dimensioni e dal Principio di Relatività Generale, per il quale le leggi della fisica sono le stesse per tutti gli osservatori. Sotto questo aspetto, fondamentalmente non vi è differenza rispetto al concetto prerelativistico dello spazio, salvo che la geometria di una varietà a quattro dimensioni sostituisce la geometria euclidea. Da questo punto di vista la Relatività Generale è piuttosto un'estensione della teoria di Newton, un po' come la geometria euclidea è un caso limite di una geometria non euclidea, con la differenza essenziale che non ha senso definire un qualche moto assoluto; in questo, viene accolta completamente la posizione di Mach.

Vi è un punto debole o almeno non chiaro sulla tesi della relatività di tutti i moti, così come esposta da Mach. Non essendo possibile distinguere tra il moto di rotazione diurna della Terra rispetto a quello delle stelle fisse, e quella anch'essa diurna delle stelle fisse intorno al prolungamento dell'asse terrestre, dovremmo chiederci quali conseguenze dinamiche avrebbe la seconda interpretazione. La relatività di tutti i moti rende plausibile ogni possibile descrizione. Diversamente, si dovrebbe accettare che vi sia qualche corpo o sistema di corpi privilegiato, come s'era sempre pensato, o che tutto debba riferirsi allo spazio, o che ogni scelta del corpo di riferimento sia una falsificazione della realtà, ma non si vede come se ne possa fare a meno. Per poter sostenere che il moto è solo relativo, poiché si accetta che la rotazione relativa alle stelle fisse genera forze di allontanamento dall'asse di rotazione, si deve per questo stesso fenomeno accettare che la rotazione delle stelle fisse produca effetti analoghi. La reciprocità di tutti i moti implica che le leggi della dinamica siano le stesse in tutti i sistemi di riferimento senza eccezioni. In base agli stessi presupposti di Mach, come possiamo escludere che le stelle fisse più lontane da un asse di rotazione non subiscano accelerazioni centrifughe tali da allontanarle da quelle più vicine all'asse di rotazione? Nulla avrebbe autorizzato Mach a ipotizzare che costituiscano una struttura rigida come le sfere celesti degli antichi astronomi. E poi, dato che vi sono più corpi rotanti nell'Universo, come è possibile che le stelle fisse ruotino intorno agli assi di rotazione dei singoli corpi in rotazione, a seconda di quale di essi viene scelto come riferimento? Sembra che il concetto di moto relativo alle stelle fisse non possa essere convertito nel moto delle stelle fisse rispetto a un corpo. A tutto rigore, sembrerebbe che, portata alle sue conseguenze ultime, la relatività del moto intesa come indifferenza alla gerarchia dei sistemi di riferimento conduca all'impossibilità di considerare fisso un qualsiasi sistema fisico. Si consideri il moto relativo della Terra intorno al Sole; la forza centrifuga alla quale è soggetta la Terra – qualora si considerassero solo le accelerazioni relative – sarebbe assai minore di quella avvertita dal Sole, mentre la forza di gravità agente sulle due masse è la stessa. Non vi è difficoltà, se le accelerazioni *non* sono quella relativa di uno dei due corpi rispetto all'altro, ma sono invece le accelerazioni assolute rispetto allo spazio o ad un sistema "fisso". Ma se tutti i moti sono relativi, sembra impossibile identificare un sistema "fisso". La relatività di tutti i moti è (quasi) ovvia in cinematica; ma in dinamica?

In alcuni articoli sono state sollevate obiezioni simili:

Hartman, H. I. e Nissim-Sabat, C., "On Mach's critique of Newton and Copernicus", arXiv:astro-ph/0311464. It is the article most closely aligned with the objections presented above;

Bhadra, A. e Das, S. C., "Comment on 'On Mach's critique of Newton and Copernicus'", the response to the previous one (available on arXiv, id 0705.1207).

Hartman, H. I. e Nissim-Sabat, C., "In Self-contradiction, Machian Geocentrism Entails Absolute Space", arXiv:1406.5434.

Sul contesto storico (L'esperimento Friedländer): Lichtenegger, H. & Mashlohn, B., "Mach's Principle", arXiv:physics/0407078.

6. Il tempo

Ancor più dello spazio, il tempo sfugge nella meccanica classica ad una definizione precisa. Le idee di Newton in proposito danno forma precisa a idee già presenti, sia pure confusamente, al senso comune²⁴ (“*Non definisco tempo, spazio, luogo e moto, in quanto notissimi a tutti*”). Possiamo chiederci in che misura Newton sia stato influenzato da idee pregresse, non pienamente giustificate sperimentalmente, più di quanto non lo sia stato riguardo alla sua concezione dello spazio, legata alle conoscenze matematiche della sua epoca. Ai suoi tempi non esisteva una teoria del tempo paragonabile per estensione e profondità alla geometria. Inoltre, il tempo così come è inteso in Occidente: lineare, quantitativo, omogeneo, misurabile, è una costruzione culturale specifica, alla quale hanno contribuito più fattori di natura diversa: la tradizione ebraico-cristiana (tempo lineare dalla Creazione al Giudizio), la rivoluzione scientifica (tempo come grandezza misurabile), la costruzione di orologi meccanici. Viceversa, dobbiamo alle conseguenze degli sviluppi tecnici successivi l’affermarsi nei paesi industrializzati di una concezione quantitativa, economica, legata all’uso delle risorse, alla razionalizzazione delle attività economiche, ecc.

Il lessico ordinario manifesta essenzialmente due proprietà che vengono attribuite al tempo: l’irreversibilità (“non possiamo tornare indietro nel tempo”) e l’ordinamento; c’è un prima e un dopo. Possiamo aggiungere l’unidimensionalità, già implicita nel caratterizzare la successione degli istanti o degli intervalli di tempo con le sole categorie del “prima” e del “dopo”. Le differenze con lo spazio sono molte, e non sono ben colte nella dinamica classica. In realtà, fino alla formulazione della Relatività Ristretta e, più esattamente, alla critica einsteiniana del concetto di simultaneità, il tempo non fu seriamente analizzato da parte dei fisici.

Il confronto con lo spazio fornisce alcune informazioni di natura prevalentemente negativa: possiamo studiare parti dello spazio con i mezzi della geometria e scoprirne parecchie proprietà, ma non possiamo compiere operazioni analoghe sul tempo. In qualche modo è possibile trattare lo spazio come un tutto, sia pure in modo astratto, ma non si può procedere analogamente con il tempo. Il tempo non è operativamente divisibile, nel senso che non è possibile separare in esso una parte come un intervallo compreso tra due istanti, conservarla e studiarla con cura. Questo genere di operazione non viene eseguita sul tempo, ma su un’astratta rappresentazione del tempo di natura geometrica. È possibile compiere un percorso chiuso, ma non esiste un ritorno all’istante di partenza. La dinamica newtoniana non è in grado di trattare l’irreversibilità; bisogna ricorrere al secondo principio della termodinamica, perché la meccanica classica è reversibile. Possiamo partire da questo aspetto per esplorare alcune difficoltà che si incontrano quando si tenta di analizzare il tempo in ambito classico puro.

La seconda legge di Newton è invariante rispetto all’inversione temporale. Questo termine non indica nulla di più della sostituzione di $-t$ al posto di t nelle equazioni, a partire dalla seconda leg-

24 Sembra che alcuni aspetti del tempo siano universalmente condivisi da tutte le culture umane: tutte distinguono tra “prima” e “dopo” in senso causale; tutti gli esseri umani percepiscono che alcuni eventi durano più di altri; tutte le culture umane (e la maggior parte degli organismi viventi) sono sincronizzate con il ciclo giorno/notte; tutte le culture hanno memoria degli eventi passati. Si tratta di un insieme minimale di concezioni; su molti altri aspetti emergono differenze significative. È evidente che l’aspetto fisico “puro” del tempo è sempre mescolato a qualcosa di psicologico o caratterizzato culturalmente; sembrerebbe che si riduca ad una successione di configurazioni di oggetti nello spazio e di grandezze fisiche che mai si ripetono. Qui mi limito alla rappresentazione offerta dalla meccanica classica, non relativistica.

ge. Ciò viene inteso nel senso che le leggi della fisica classica non dipendono dal verso di scorrimento del tempo, o, meglio, dato che il tempo non scorre affatto²⁵, dal verso in cui ordiniamo i fenomeni che in esso avvengono, rimanendo dell'idea che il tempo contenga tutti gli eventi come lo spazio contiene tutti i corpi. Inoltre, se è possibile prevedere il comportamento futuro di un sistema di corpi a partire da certe informazioni sufficienti, è perciò possibile stabilire quale era, istante per istante, la sua configurazione passata. Questo è un punto critico: l'universo è irreversibile, dato che a quanto sembra non torna ad una configurazione precedente, ma la dinamica classica non vieta nulla del genere.

La rappresentazione del tempo nella dinamica classica è una rappresentazione “parametrizzata”, nel senso che il tempo è trattato come una successione continua di istanti, ciascuno dei quali senza estensione quasi fosse un punto del tempo, e perciò associabile ad un numero contando il tempo a partire da un certo istante. Immaginare il tempo come una successione ordinata di istanti è un'ipotesi molto pesante, se non altro perché implica che sia indefinitamente divisibile, o, meglio, costituito da una successione di intervalli di tempo a due a due disgiunti che possono essere arbitrariamente piccoli. In breve, l'intervallo di tempo è trattato come una grandezza archimedeica, esattamente come le lunghezze ecc. Tuttavia, in pratica questo procedimento funziona bene e si è imposto contro ogni obiezione filosoficamente sensata. In effetti, il problema alla radice del metodo non è la “spazializzazione” del tempo, operazione che non è veramente eseguita in quanto non è eseguibile e ha significato solo geometrico. Non è possibile trasformare il tempo in spazio, ma solo di rappresentare matematicamente il tempo e le sue parti allo stesso modo di semirette, segmenti, ecc. Il problema vero è l'assunzione, arbitraria e sperimentalmente non accertabile né falsificabile, che sia composto da una successione di intervalli indefinitamente riducibili. Questo vale anche per lo spazio. Tuttavia, per quanto sia un'ipotesi del tutto arbitraria, essa non disturba di fatto l'edificio della dinamica classica, perché esistono fenomeni rilevabili sperimentalmente che avvengono in tempi molto, molto minori di quelli che occupano i fenomeni trattati dalla fisica classica.

Trattare l'istante – un'entità che non è veramente tale – come il parametro fondamentale nella dinamica classica è una necessità, dato che per descrivere il moto di un corpo il metodo migliore è assegnare ad ogni istante una posizione definita mediante equazioni orarie del tipo $x_i = f(t)$. Ciò permette di studiare analiticamente il moto, ed è chiaro che le possibilità offerte dall'analisi hanno prevalso su qualsiasi riserva concettuale in proposito, per quanto questa potesse essere fondata.

25 Questa rappresentazione del tempo come un flusso continuo è tanto comune quanto illusoria e, in qualche misura, è penetrata anche nella meccanica classica. È un'immagine in verità molto strana, perché attribuisce al tempo un'azione quale lo “scorrere” che in fisica dovrebbe essere attribuita solo a enti materiali. Il tempo non è un'entità osservabile, non è un fenomeno, non è nulla che si possa cogliere nella sua interezza. Dire che il tempo scorre significa constatare che le cose e noi stessi cambiamo. Possiamo aggiungere “nel tempo”, quasi fossimo contenuti in qualcosa che chiamiamo tempo. Questa rappresentazione, in particolare, si adatta bene allo spazio; è più difficile stabilire se sia adeguata al nostro rapporto con il tempo. Quando si tratta di questo, è inevitabile che si faccia allusione alla rappresentazione che ognuno può averne, la quale è partecipe di sensazioni comuni e di idee suggerite dalla riflessione personale. Il fatto è che lo spazio ha una struttura definita, quella della geometria. In un certo senso, è definibile oggettivamente, anche se non è detto che la percezione dello spazio sia comune a tutte le culture e a tutti gli individui, ma è molto più difficile stabilire quali siano gli elementi che oggettivamente definiscono il tempo. L'idea ingenua dello scorrere del tempo è un'immagine efficace di una corrente che trascina tutto e tutti, e che non inverte mai il senso del suo movimento; è un modo semplice per dire che il mondo dell'esperienza è irreversibile ed è intimamente legato al destino stesso degli esseri viventi. La fisica classica non definisce il tempo, semplicemente cerca di rappresentare l'evoluzione dei sistemi fisici in funzione dell'istante, l'equivalente del punto della dimensione tempo.

Stranamente, tante riflessioni sul tempo assoluto o relativo non hanno colto il punto fondamentale, e cioè che *fino ad Einstein si pensava che tutti gli osservatori, indipendentemente dal loro stato fisico, dovessero concordare sul fatto che un certo evento avvenga in un istante che è lo stesso per tutti, e che l'intervallo di tempo che separa due istanti sia lo stesso per tutti*. È difficile stabilire se stupisca di più la scoperta della relatività del tempo da parte di Einstein o il fatto che nessuno ci abbia pensato prima.

Il radicamento dell'idea secondo la quale il tempo scorre allo stesso modo per tutti è indubbiamente legata alle apparenze suggerite dall'esperienza ordinaria. I ritmi diurni e stagionali, il ricorrere degli stessi fenomeni a intervalli di tempo regolari o percepiti come tali, lo stesso scandire della vita quotidiana si impongono con una forza tale da escludere che qualcuno si ponga sul serio questo problema. Come tutti sono convinti che un metro sia un metro per tutti, così vale per il secondo e per qualsiasi intervallo di tempo. Ma vi è un aspetto nascosto, legato proprio all'unità di misura. Come possiamo stabilire che un dato intervallo di tempo come un secondo, del quale abbiamo una definizione precisa, tra un certo istante e uno successivo, sia uguale a quel secondo che separa altri due istanti? Una risposta possibile è che ogni intervallo di tempo ha rapporto costante con altri, ma ciò implica che le misure di tempo siano in ultima analisi riconducibili all'invarianza dei rapporti tra i tempi corrispondenti a eventi ciclici; in effetti, tutte le misure di tempo si riconducono all'osservazione di fenomeni che apparentemente si ripetono in modo regolare. Se accettiamo questa analisi, dobbiamo convenire che la possibilità di misurare il tempo si fondi sulla ciclicità di alcuni fenomeni che si manifestano su scale molto diverse (moti celesti, oscillazioni ecc.) e sulla constatazione empirica che i rapporti tra i tempi in cui essi si compiono sembrano costanti.

La misura di lunghezze ecc. sembra porre meno problemi; vi è però un'analogia con la misura di intervalli di tempo. Infatti, possiamo porre in dubbio che una data lunghezza, quale quella di una sbarra, sia sempre la stessa per tutti, o non cambi col tempo, così come si può porre in dubbio che ogni intervallo di tempo scelto come unità di misura abbia sempre la stessa estensione, e il motivo per cui nessuno o quasi si pone questi problemi è esattamente lo stesso già emerso per la misura del tempo: empiricamente, nulla suggerisce il contrario. O, ragionando dal punto di vista gnoseologico, potremmo ammettere con Kant che spazio e tempo siano forme a priori della sensibilità; non c'è, credo, modo di stabilire quale approccio sia quello vero, dato che ogni verifica sperimentale presuppone – se Kant ha ragione – quelle stesse precondizioni della sensibilità che si dovrebbe indagare sperimentalmente. Dal punto di vista fisico, si dovrebbe tener conto solo dell'esperienza, o meglio delle informazioni forniteci dalle indagini sperimentali. Tuttavia, queste non sono osservazioni immediate da parte di soggetti puramente recettivi. Le informazioni sono il risultato di procedure complesse e di molti fattori, e nessun esperimento può stabilire se l'unità di misura di tempo o di lunghezza sia una costante. Non è nemmeno chiaro se questo problema abbia senso, proprio per queste stesse ragioni.

È quindi evidente che le idee comuni su spazio e tempo, e anche quelle meno comuni radicate nella dinamica newtoniana, sono pregiudizi la cui solidità si fonda sull'esperienza ordinaria e su convenzioni generalmente accettate e non su un esame approfondito. Lo sguardo chi si occupa di scienze fisiche è rivolto alla scoperta di novità piuttosto che alla riflessione sui fondamenti, alla quale ci si rivolge quando le idee pregresse manifestano evidenti insufficienze.

7. Relatività Ristretta e Principio di Equivalenza

Un ostacolo alla rinuncia di un sistema di riferimento assoluto dotato di realtà fisica venne dall'elettromagnetismo. Le equazioni di Maxwell sono verificate da osservatori rispetto ai quali la velocità della luce c è quella calcolata in base alla costante dielettrica assoluta del vuoto e alla permeabilità magnetica del vuoto. In pratica, dato l'elevato valore di c , l'eventuale moto dello sperimentatore o della sorgente non influenza l'esito della maggior parte degli esperimenti, salvo la variazione della frequenza di oscillazione del campo elettromagnetico quando osservatore e sorgente sono in moto l'uno rispetto all'altro (effetto Doppler, già dimostrato per le onde sonore). Ma, se si considera la questione dal punto di vista teorico, si trova che le equazioni dell'elettromagnetismo non sono invarianti rispetto alle trasformazioni galileiane, che descrivono il passaggio da un sistema di riferimento a un altro in moto traslatorio uniforme rispetto al primo. Interpretata entro la cinematica classica, la teoria di Maxwell sembrava dunque richiedere un sistema di riferimento privilegiato: quello in quiete rispetto all'etere luminifero, il mezzo nel quale si supposeva si propagassero le onde elettromagnetiche. In sistemi in moto rispetto all'etere, la velocità della luce avrebbe dovuto risultare diversa da c , e le equazioni non avrebbero conservato la forma data loro da Maxwell. La teoria di Maxwell – generalmente incompatibile con le trasformate di Galileo-Newton – sarebbe allora rigorosamente applicabile solo alla classe degli osservatori in quiete rispetto al mezzo di propagazione della luce, dato che non tutti gli osservatori inerziali soddisfano questa condizione. Infatti, all'epoca (seconda metà del XIX secolo) non si concepiva che un'onda potesse propagarsi attraverso lo spazio vuoto; si discutevano seriamente le proprietà del mezzo che propagava la luce e si trovava che erano assai strane e singolari; l'etere – così chiamavano il mezzo – avrebbe dovuto non interferire affatto col moto dei corpi, pur essendo estremamente rigido ecc.²⁶

Le equazioni di Maxwell, nella concezione del loro autore e dei suoi contemporanei, erano valide nel sistema di riferimento in cui l'etere luminifero era in quiete. Maxwell stesso, derivando le sue equazioni, assunse implicitamente che sorgente e osservatore fossero in quiete rispetto all'etere, e sapeva che il moto relativo rispetto ad esso avrebbe dovuto produrre effetti osservabili sulla velocità della luce.²⁷ Solo qualche tempo dopo l'esperimento di Michelson e Morley²⁸ (1887), si riconobbe che non vi era alcuna necessità di un qualche "etere" che propagasse la luce. Oggi sappiamo che le equazioni di Maxwell sono valide in tutti i sistemi inerziali, ma questa comprensione è stata raggiunta solo grazie alla Relatività Ristretta di Einstein. Il superamento definitivo del vecchio concetto di un sistema di riferimento privilegiato avvenne quando Einstein provò l'invarianza delle equazioni di Maxwell sotto le trasformazioni di Lorentz: di fatto, formulando la Relatività Ristretta per conservare le equazioni dell'elettromagnetismo in ogni sistema inerziale, egli rinunciò al tempo assoluto (la misura degli intervalli di tempo dipende dall'osservatore). È indifferente che l'osservatore sia in moto rispetto alla sorgente, o viceversa; l'osservazione dei fenomeni luminosi e più in generale elettromagnetici dipende solo dal loro moto relativo. La propagazione della radiazione elettromagnetica avviene in condizioni diverse da quella delle onde sonore; queste devono propagarsi in un mezzo (aria, acqua, ecc.) e si devono distinguere i tre casi nei quali solo l'uditore è in moto rispetto

26 Il termine, se non il concetto, è sopravvissuto fino ai nostri giorni in locuzioni del tipo "comunicazioni via etere" ecc.

27 v. D. Kaiser, Lecture Notes for 8.225 / STS.042, "Physics in the 20th Century": Electrodynamics for Maxwell and Lorentz, pubblicato on line alla p. [Lecture Notes: Electrodynamics for Maxwell and Lorentz](#).

28 L'esperimento mirava a misurare la velocità della Terra rispetto all'etere. Non si trovò alcuna evidenza di un moto della Terra rispetto a un mezzo luminifero che riempisse lo spazio.

al mezzo, o solo la sorgente, o entrambi. Invece, il moto relativo della sorgente verso l'osservatore modifica la frequenza di oscillazione e la lunghezza d'onda della radiazione, senza che si possa distinguere tra i due moti rispetto a un qualche mezzo di propagazione.

Inoltre, si deve porre attenzione al carattere “pseudogravitazionale” delle forze fittizie, dette anche forze di inerzia, misurate nei sistemi non inerziali. Secondo il *Principio di Equivalenza* (Einstein 1907), *un sistema di riferimento in caduta libera in un campo gravitazionale è fisicamente equivalente a un sistema di riferimento inerziale in assenza di gravità*. Detto altrimenti, tutti i corpi contenuti all'interno di un ambiente in caduta libera cadono con esso con la stessa accelerazione e la stessa velocità in ogni istante (se inizialmente in quiete rispetto all'ambiente), quindi rispetto ad un osservatore solidale con l'ambiente sono in stato di quiete. Perciò tutti i corpi in caduta libera nella stessa regione dello spazio cadono con la stessa accelerazione, che è una riformulazione del principio sperimentale di identità di massa inerziale e massa gravitazionale. Ad essere precisi, così come sopra è esposto, il principio è rigorosamente vero per un sistema in caduta libera all'interno di un campo uniforme, in modo da escludere la comparsa degli effetti delle forze di marea, ovvero delle forze agenti sui corpi immersi in un campo non uniforme dovute alle differenze dell'intensità della forza di gravità; oppure, più realisticamente, per un sistema di dimensioni abbastanza piccole da rendere trascurabili le variazioni spaziali del campo gravitazionale.

Abbiamo accennato alla relazione di implicazione reciproca che lega il Principio di Equivalenza all'identità di massa inerziale e gravitazionale. Partiamo da quest'ultima. In generale, la seconda legge afferma che $F = ma$, dove m è la massa inerziale; infatti $a = \frac{F}{m}$ implica che accelerazione e massa siano inversamente proporzionali. Possiamo applicarla alla forza peso, $P = mg$, nella quale però m non è inversamente proporzionale a g ; aumentando la massa, aumenta il peso e l'accelerazione non varia. La massa che compare nella legge di gravitazione universale è gravitazionale, dato che è la sorgente della forza di gravità. Inerzia e gravitazione sono fenomeni ben distinti, quindi concettualmente i due aspetti della massa vanno considerati come grandezze diverse. Distinguendo le due masse, applicando alla forza peso la seconda legge di Newton otteniamo $m_i a = m_g g$ con $a = g$ (in valore assoluto), cioè $m_i = m_g$. Oppure, si consideri una forza F equilibrante un peso P . L'accelerazione risultante è nulla, quindi $a = g$; di nuovo, detta a l'accelerazione impressa da F , troviamo $m_i a = m_g g$ ecc. Potremmo evitare la conclusione $m_i = m_g$ imponendo $F = \frac{m_i}{m_g} P$, contro l'idea che forze uguali applicate allo stesso corpo imprimano accelerazioni uguali; ma allora, in base a quale criterio si potrebbe stabilire l'uguaglianza tra forze in dinamica? Certamente non applicando la seconda legge. Il calcolo della forza efficace di un corpo che scivola senza attrito su un piano inclinato, l'indipendenza del periodo di oscillazione di un pendolo dalla sua massa, la stessa legge di gravitazione ecc. implicano l'identità delle due masse, non solo la proporzionalità diretta²⁹.

29 L'identità tra massa inerziale e massa gravitazionale non è una convenzione, ma una necessità per la coerenza della seconda legge: quando si compongono forze di natura diversa (ad esempio, una forza applicata e il peso), la risultante è un unico vettore, e l'accelerazione si ottiene dividendo per una sola massa. Se le due masse non fossero identiche, questa operazione non sarebbe possibile in modo coerente. D'altronde, se il lettore dubitasse che la relazione tra le due masse sia di semplice proporzionalità, e che la loro identità sia solo una convenzione (p.es. perché si è scelto di impiegare per entrambe la stessa unità di misura), consideri che nessuno ha mai proposto o eseguito un esperimento per determinare la costante di proporzionalità e valuti come cambierebbero molte leggi fisiche qualora le due masse non fossero identiche.

Se due grandezze di significato fisico differente coincidono universalmente, abbiamo, se non una vera e propria contraddizione, un'incoerenza concettuale, dovendosi escludere la fortunata coincidenza. Vi deve essere una connessione profonda, non evidente nella dinamica classica, tra i due aspetti della massa, e la manifestazione di questa identità è strettamente legata al Principio di Equivalenza. Supponiamo che rispetto ad un osservatore, situato all'interno di un sistema e privo di ogni accesso a informazioni dall'esterno, tutte le masse contenute nel sistema e libere di muoversi accelerino con accelerazioni uguali in valore assoluto, direzione e verso. L'osservatore può interpretare il moto dei corpi in due modi: come effetto dell'accelerazione del sistema di riferimento (forze d'inerzia) oppure come effetto di un campo gravitazionale uniforme. Per l'identità di massa inerziale e gravitazionale, le due interpretazioni sono fisicamente indistinguibili.

In questo esempio abbiamo considerato moti traslatori, ma possiamo applicare il principio anche a moti rotatori. Si consideri la tecnica impiegata per simulare la gravità all'interno di una navicella spaziale posta a sufficiente distanza da qualsiasi massa, in modo da trovarsi in assenza di gravità. Ponendo in rotazione l'ambiente rispetto ad un asse di simmetria, le forze centrifughe spingeranno oggetti e osservatori posti al suo interno verso le pareti. Indichiamo con d la distanza dall'asse di rotazione e con ω la velocità angolare. Uguagliando l'accelerazione centrifuga $a = \omega^2 d$ e l'accelerazione di gravità otteniamo $\omega = \sqrt{\frac{g}{d}}$, uguale alla legge del periodo del pendolo.

Ritorniamo alle accelerazioni traslatorie. Supponiamo che l'osservatore si trovi nella navicella, e che ad essa venga ora impressa un'accelerazione di intensità uguale a g rispetto a un sistema inerziale. L'osservatore è spinto verso una parete che funge da piano d'appoggio; supponiamo che una massa sia connessa mediante una fune inestensibile alla parete opposta, e che inizialmente la fune e la direzione del moto, allineata all'accelerazione, formino un piccolo angolo. L'accelerazione della massa misurata dall'osservatore nella navicella, orientata nella stessa direzione ma in verso opposto al moto dell'ambiente, è del tutto indistinguibile da quella di gravità e la massa sospesa si comporterà esattamente come un pendolo sulla Terra.

In sintesi: il comportamento delle forze fittizie, il Principio di Equivalenza, l'identità di massa inerziale e massa gravitazionale³⁰ sono aspetti diversi della stessa legge fondamentale. L'indipendenza delle accelerazioni fittizie dalle masse implica che un sistema in moto traslatorio accelerato rispetto ad un sistema inerziale genera al suo interno un campo di forze apparenti localmente indistinguibile da un campo gravitazionale uniforme.³¹

30 È notevole che Newton mascheri l'identità esponendo il concetto di massa. Infatti, considera la massa come misura della quantità di materia, e in base a questo concetto giustifica sia la seconda Legge della dinamica, sia la legge di gravitazione, senza essere obbligato a spiegare altrimenti la connessione profonda tra inerzia e gravitazione. Tuttavia era perfettamente consapevole del problema; nei Principia, Newton misura sperimentalmente che la massa gravitazionale (quella che determina quanto un corpo è attratto dalla gravità) e la massa inerziale (quella che determina quanto un corpo resiste all'accelerazione) sono uguali con una precisione di circa 1 parte su 1000.

31 Sono state proposte tre formulazioni leggermente differenti del Principio di Equivalenza:

1. Principio di equivalenza debole: *Tutti i corpi in caduta libera subiscono la stessa accelerazione, indipendentemente dalla loro composizione o massa.* (Questo è ciò che avevano verificato Galileo, Newton ed Eötvös).
2. Principio di equivalenza di Einstein: *In una regione sufficientemente piccola dello spaziotempo, le leggi della fisica in un sistema in caduta libera sono quelle della Relatività Ristretta.* (Non solo la meccanica, ma anche l'elettromagnetismo, la termodinamica, ecc.)

Quali sono le conseguenze del Principio di Equivalenza? Le possiamo esplorare considerando le osservazioni eseguibili in un sistema in caduta libera. Di fatto, se trascuriamo gli effetti della rotazione diurna della Terra, tutte le esperienze eseguite sulla superficie del pianeta sono di questo genere. Se non fosse per la rotazione diurna, non sarebbe possibile distinguere l'osservatore terrestre da un osservatore inerziale. Nessuna esperienza eseguibile in laboratorio può evidenziare l'attrazione gravitazionale del Sole, dato che tutti i corpi presenti la subiscono in egual misura. La Terra e la Luna si muovono entrambe intorno al Sole, ma vista dalla Terra l'orbita lunare è quasi circolare, come se l'attrazione solare non esistesse. L'unico effetto che un osservatore inerziale attribuirebbe a un corpo in rotazione intorno ad una massa centrale sarebbe dovuto alle forze di marea; ma l'osservatore in caduta libera potrebbe limitarsi a constatare che la massa centrale deforma il sistema nel quale si trova e genera accelerazioni relative locali, proprio come le maree generate dalla Luna. Sotto questo aspetto, non vi sarebbe poi una grande differenza tra il sistema eliocentrico e quello geocentrico.

Tuttavia, vi è una conseguenza importantissima, che ci conduce a scenari molto lontani dalla fisica classica prerelativistica. Il campo gravitazionale, a differenza dei campi di accelerazioni fittizie, è generato dalle masse e non dal moto dell'osservatore, cioè del sistema con il quale è solidale. Passando ad un sistema inerziale, queste accelerazioni svaniscono. La loro comparsa o meno dipende dal sistema di coordinate; un sistema con gli assi cartesiani in rotazione rispetto ad un altro definisce una metrica (cioè, la distanza generalizzata che separa due eventi nello spazio-tempo) diversa. Eseguendo il calcolo a partire da un sistema di riferimento inerziale in Relatività Ristretta, si trova che la metrica relativa al sistema in rotazione uniforme non è quella di uno spazio-tempo "piatto". La curvatura di un sistema in rotazione è apparente: può essere eliminata passando a un sistema inerziale. Nel caso di un campo gravitazionale, invece, la curvatura è reale e non può essere eliminata da alcuna trasformazione di coordinate, se non localmente e approssimativamente.

Il passaggio dalla descrizione classica a quella relativistica implica una revisione profonda dei concetti di spazio e tempo. Non possono più essere considerati indipendenti, e l'integrazione della gravitazione nella struttura dello spazio implica l'abbandono della geometria euclidea. Resta da vedere se questa rivoluzione ha implicato la negazione definitiva dell'idea di uno spazio indipendente dalla materia, quale era lo spazio assoluto di Newton, o se ha sostituito quest'ultimo con una struttura puramente relazionale, una serie di regole per comporre la totalità degli eventi in uno schema coerente.

3. Principio di equivalenza forte: come la formulazione di Einstein, ma include anche l'energia gravitazionale stessa: un corpo la cui massa è in parte dovuta alla sua stessa energia gravitazionale cade con la stessa accelerazione di qualsiasi altro corpo.

8. Conclusioni

La Relatività Generale – la teoria oggi generalmente accettata come la migliore descrizione dello spazio-tempo e della gravitazione – non necessita di *background*; in breve, è una teoria generale delle trasformazioni di sistemi di riferimento applicata ad una varietà continua e differenziabile in quattro dimensioni, nella quale le coordinate, che rappresentano i punti-evento, non hanno significato se non in un dato sistema di riferimento. Non esiste uno sfondo indipendente dagli eventi ed è possibile determinare la posizione di un corpo solo rispetto a un sistema di riferimento che può essere scelto in modo assolutamente arbitrario. Le leggi fisiche devono essere valide in ogni possibile sistema di riferimento, cioè le equazioni che le esprimono devono trasformarsi in modo da mantenere la stessa forma. Quindi, queste equazioni e le relative leggi di trasformazione sono l'architettura unificante spazio, tempo, materia ed energia.

Tuttavia, lo spazio, o piuttosto lo spazio-tempo, ha delle proprietà locali e globali che non consentono a mio avviso di trattarlo come un puro sistema relazionale. La curvatura scalare, per esempio, la struttura delle geodetiche ecc. sono proprietà fisiche effettive; globalmente, l'espansione dell'universo rivelata dalla recessione delle galassie è intesa come espansione dello spazio; infine, lo spazio stesso contiene energia per via della costante cosmologica. La recente scoperta dell'aumento nel tempo della velocità di espansione dell'universo non riguarda solo un insieme di relazioni, è una proprietà globale dello spazio, come le caratteristiche sopra elencate. Nessuna teoria relazionale giustifica l'esistenza dello spazio, anche se questo non manifestasse alcuna caratteristica fisica oltre all'estensione e alle proprietà geometriche.

Un'ulteriore prova in questo senso può essere dedotta esaminando le equazioni di Einstein. Generalmente, si afferma che queste stabiliscono in che modo la materia determina la geometria, e in che modo quest'ultima guida il comportamento della materia. Questa descrizione, molto efficace per la sua concisione, va completata: tra le soluzioni delle equazioni, cioè tra gli universi compatibili con la teoria, troviamo modelli privi di materia, e d'altronde il nostro stesso universo è quasi completamente vuoto. Un elenco di posizioni, velocità, accelerazioni relative tra le varie parti del cosmo non è il cosmo.

La teoria quantistica invece necessita dello spazio-tempo come *background*. Essendo applicata a microsistemi, non implica di per sé alcuna teoria dello spazio, semplicemente lo presuppone. In breve: sebbene molti si siano sforzati di ridurre lo spazio a un insieme di relazioni e a dimostrare l'inutilità e la inconsistenza di qualche riferimento assoluto, gli stessi esiti ultimi delle loro critiche e delle conoscenze accumulate soprattutto nel XX secolo implicano che lo spazio mantenga una sua consistenza fisica indipendente dalla presenza o no della materia. Se vi è qualche dubbio in proposito, si considerino le equazioni di Einstein; esse hanno soluzioni anche imponendo che il tensore dell'energia e dell'impulso sia nullo in tutto lo spazio-tempo.

La condizione necessaria per ottenere una soluzione definitiva della natura dello spazio e del tempo è l'elaborazione di una teoria che unifichi la Relatività Generale e la Meccanica Quantistica. Abbiamo dei candidati come *String Theory* e *Loop Quantum Gravity*, ma il problema di fondo non è solo la loro verifica sperimentale. Non è possibile sapere se il "nostro" universo sia l'unico, ed è estremamente dubbio che si possa produrre qualche prova in questo senso. Non è possibile sapere, in particolare, se le caratteristiche che hanno determinato la storia dell'universo sono condizioni ini-

ziali arbitrarie, o se sono parametri “di indirizzo” che individuano un universo tra tanti esistenti: come l’indirizzo della propria abitazione, definiscono dove ci troviamo tra i tanti mondi matematicamente consistenti. Inoltre, non è possibile stabilire se ogni spazio-tempo abbia la stessa struttura di quello nel quale siamo immersi, o se vi siano varietà n -dimensionali fisicamente consistenti ma di natura completamente diversa. Non possiamo sapere se ogni modello matematicamente consistente (ce ne sono infiniti) descriva un universo “reale”, o quale sia il numero di questi modelli, e a questo punto non è nemmeno chiaro se termini che appartengono al lessico filosofico piuttosto che a quello fisico, quali “esistere”, “realtà” ecc. abbiano un significato definito quando si tratta di possibilità matematiche che vanno ben oltre la sperimentazione. Siamo però certi che la teoria di Einstein è di gran lunga migliore di quella prerelativistica, che è un caso limite della prima.

Infine, la Relatività Generale non implica che tutti gli osservatori siano equivalenti, o che la descrizione di moti relativi sia solo questione di convenzione e di opportunità. La teoria afferma solo che è possibile esprimere tutte le leggi fisiche fondamentali in forma covariante, in quanto indipendenti dalla scelta del sistema di coordinate; il che implica che il luogo non possa definirsi se non attraverso una scelta arbitraria delle coordinate: queste infatti non hanno consistenza fisica. Possiamo riferirci al Sole o alla Terra, ma la descrizione dell’universo non dipende dalla scelta effettuata. I sistemi in caduta libera non sono equivalenti a quelli soggetti a forze non gravitazionali; semplicemente, essi sostituiscono gli osservatori inerziali. In un certo senso, il campo gravitazionale, o il campo metrico, prendono il posto dell’insieme dei sistemi inerziali, che a sua volta sostituì lo spazio assoluto. In cosmologia, l’arbitrarietà della scelta del sistema di riferimento è sostituita da una particolare scelta della metrica che tenga conto dell’isotropia e dell’omogeneità dello spazio. Il sistema della cosmologia descrive le galassie come punti su una ipersuperficie tridimensionale in espansione caratterizzate da moti locali; l’universo ha una certa età, che è la stessa per tutti gli osservatori galattici e – almeno nella versione più semplice, che esclude differenze locali della velocità di espansione – evolve in modo omogeneo.³² La radiazione di fondo è un altro sistema privilegiato, pur non essendo un corpo materiale. Misurandone la frequenza, possiamo stabilire la velocità istantanea della Terra o di qualsiasi oggetto nello spazio rispetto alla radiazione di fondo. In qualche modo, l’idea di un riferimento assoluto sopravvive, sia pure in una forma completamente diversa da quella degli antichi sistemi astronomici o da quella data da Newton.

32 Nella cosmologia relativistica standard (basata sulla metrica FLRW), si assume che l’universo, su scale sufficientemente grandi, sia omogeneo e isotropo. Questo permette di ordinare lo spazio-tempo a quattro dimensioni secondo una successione di sezioni spaziali tridimensionali, ciascuna etichettata da un valore del tempo cosmico (il tempo proprio misurato da un osservatore “comovente”, cioè che segue il flusso medio delle galassie). Le galassie, in questa descrizione, sono approssimativamente punti fissi (comoventi) su queste sezioni tridimensionali, e ciò che cambia nel tempo è il fattore di scala che determina le distanze tra questi punti.