

LO SPAZIO E IL TEMPO COME PROBLEMI DELLA 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 "spontanea" dell'Universo fisico, non è possibile avvicinarsi alla scienza 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 – XVIII secolo ha portato queste premesse ai loro estremi sviluppi formali, finché già nel corso del XIX secolo non sono emersi quei fatti che hanno posto le basi della crisi nel XX secolo, solo parzialmente risolta dalle due teorie della Relatività e della Meccanica Quantistica, dato che una teoria "finale" (se mai verrà elaborata) dovrà conciliare le due visioni incompatibili, quella deterministica e reversibile della Relatività e quella probabilistica della Meccanica Quantistica.

Chi scrive pensa che sia impossibile comprendere a fondo come mai 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 moderna". Possono darsi diverse spiegazioni, di natura sociale e politica; d'altronde, ciò non dipende da qualcosa di oggettivo, ma solo dalla formazione culturale di chi analizza il problema. Ma non si deve disconoscere 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. Senza la potenza del calcolo, la scienza fisica è impossibile.

Ma questo implica che lo studioso di scienze fisiche trasporta, nella sua interpretazione del mondo fenomenico, il metodo matematico, e le idee della Geometria. La Fisica classica si fonda sulla Geometria euclidea, trasformando il punto geometrico idealmente privo di estensione nel "punto materiale", particella ideale che si muove lungo traiettorie analizzabili matematicamente. Questo fondamento "geometrico" della Meccanica classica è evidente soprattutto nell'opera di Galileo e Newton, e – come detto prima – è apparso immodificabile e necessario fino agli inizi del XX secolo – quando s'è compreso che non vi è una sola Geometria "reale", ma sono egualmente "vere" tutte le geometrie coerenti, che cioè soddisfano il principio di non-contraddizione, l'unico presupposto permanente di ogni sistema matematico e di ogni descrizione fisica del mondo.

1. I sistemi di riferimento e lo spazio assoluto

Il principio di inerzia è la prima delle leggi della Dinamica di Newton; l'enunciato è il seguente: "Ogni corpo non sottoposto a forze permane in stato di quiete o di moto rettilineo e uniforme fino a che il suo moto non venga modificato da qualche forza esterna". Questa formulazione 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 il laboratorio e noi stessi 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?

Secondo Newton, esiste un sistema di riferimento privilegiato, ma non si tratta di un oggetto o sistema di corpi materiale e quindi 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, che è "assoluto" in quanto indipendente da qualsiasi osservatore. Per capire questo punto di vista, bisogna considerare l'Universo materiale come un insieme di corpi immersi in uno spazio senza confini e centro, omogeneo, le cui proprietà formali e la cui esistenza sono indipendenti dalla presenza della materia e di osservatori. Eliminando la materia, lo spazio continuerebbe ad esistere immutato. Tale spazio è definito da N. come assoluto (cioè, indipendente dall'osservatore e dai corpi), 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.

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 abbia ragione, come possiamo stabilire il nostro "stato di moto" rispetto a tale spazio?

Una 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 con lo spazio sia inutile: perchè 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 p.es. 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 contraddice una tesi siffatta: se tutti i moti sono relativi e il riferimento è indifferente, perchè mai dovremmo considerare i pianeti in rivoluzione intorno al Sole e non intorno alla Terra? E inoltre: perchè mai dire che la Terra ruota intorno al proprio asse N-S in 24 ore? Evidentemente, i vari sistemi di riferimento non sembrano essere ugualmente validi, ma costituiscono una gerarchia. Il prevalere dell'ipotesi eliocentrica su quella geocentrica dimostra storicamente che alcune descrizioni sono "più vere" di altre. È quindi possibile che vi sia una descrizione "assolutamente vera", e dato che non può essere riferita ad un corpo qualsiasi, deve consistere nella relazione con lo spazio stesso. A parte considerazioni di carattere astronomico (di per sé indicative, ma non ancora dimostrative), vi è tuttavia una ragione fondamentale a favore della teoria di N., o di qualche altra teoria che - pur divergendo da quella di N. in qualche punto - conservi una qualche distinzione tra descrizioni corrette e descrizioni non corrette, cioè tra osservazioni "valide" e "non valide". *Tale ragione è la possibilità stessa della Fisica come teoria dotata di significato oggettivo: le leggi della Fisica devono essere oggettive (= non dipendenti dalle circostanze dei fenomeni) e quindi non relative ai singoli osservatori, ma valide per tutti: ma ciò è possibile solo se tutti i singoli osservatori concordano nella descrizione dello stesso classe di fenomeni; e dato che ciò di fatto non avviene, è necessario stabilire se vi sono osservatori più attendibili di altri, e quali sono. Lo spazio assoluto rappresenta l'osservatore perfetto e giustifica l'esistenza della Fisica come sistema dotato di significato. 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 assume 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 di chi si identifica con lo spazio assoluto. Nella misura in cui diventa certa (non relativa), diventa anche irrealistica (perché la realtà fenomenica è necessariamente relativa all’osservatore). La seconda rimanda al problema precedente: per rimediare a questo carattere di irrealità, dobbiamo conoscere la nostra relazione con lo spazio. Se non risolviamo questo problema, anche qualora la Fisica esistesse come teoria unitaria, essa non sarebbe mai applicabile alla realtà fenomenica, o sarebbe essenzialmente inconoscibile.

Quando si parla di “relazione di un corpo o di un osservatore con lo spazio assoluto”, si intendono almeno tre informazioni - cioè, tre dati che - per stabilire effettivamente tale relazione - devono essere conoscibili in generale mediante le stesse procedure sperimentali eseguibili da qualsiasi osservatore in qualsiasi luogo o tempo, e cioè posizione, velocità e accelerazione del corpo rispetto allo spazio. È chiaro che *la posizione assoluta di un corpo non può essere definita*, anzitutto per ragioni teoriche: lo spazio secondo N. è indefinito e omogeneo e quindi non ha centro (ciò era invece possibile nel sistema aristotelico geocentrico e in quello copernicano eliocentrico: ma infatti si supposeva che vi fosse un centro; di qui la polemica fra le due concezioni); tutti i luoghi nello spazio sono indistinguibili e perciò equivalenti. 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 \mathbf{V} ? Anche in questo caso, N. (e non solo lui, ma pressoché tutti i fisici da Galileo in poi) risponde negativamente: non è possibile determinare sperimentalmente la velocità assoluta \mathbf{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 sia)

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*” (in senso classico - da non confondersi con la teoria della Relatività, che è un po’ più complicata). 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 nel suo interno esperienze od osservazioni che evidenzino il suo stato di quiete o di moto rispetto a quel corpo”; p.es., 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 fermi rispetto alla superficie terrestre e 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 - p.es., vederlo direttamente. Tuttavia, *questo principio presuppone che abbia senso assoluto parlare di moto uniforme* - vale a dire, 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 sapere la nostra velocità rispetto a oggetti al di fuori della nostra possibilità di osservazione, a maggior ragione non possiamo stabilire la nostra velocità rispetto allo spazio assoluto di N.: 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 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.

3. Giustificazione dello spazio assoluto secondo Newton

Le conclusioni precedenti non si estendono all'accelerazione. 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 rispetto alla Terra, e misurarla? La risposta è positiva: specie se l'accelerazione è sufficientemente grande, l'osservatore stesso avverte una forza che lo spinge nel verso opposto all'accelerazione (se questa è in avanti, è spinto all'indietro e viceversa) e allo stesso modo, gli oggetti che non sono solidali con l'ambiente (cioè, non vincolati a questo, p.es. a causa di forze d'attrito) sembrano mettersi in moto senza che su di essi agisca una forza di origine interna. Se un oggetto è lasciato cadere all'interno di un sistema chiuso in accelerazione, l'osservatore all'interno di tale sistema non lo vede cadere lungo la verticale - cosa che invece si verificherebbe, se la velocità rispetto alla superficie della Terra non variasse. 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 a causa di questa possibilità possiamo - secondo lui - asserire l'esistenza dello spazio assoluto.*

In realtà, N. affermò di aver eseguito una 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; 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 pareti interne di quello, 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. Quindi, N. 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 ai quali può essere solo relativa. Secondo N., *Il concetto dello spazio assoluto ha il suo fondamento fisico nel manifestarsi delle forze centrifughe.**

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 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 lo 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* (detto 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 forma ecc.); 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 l'analisi di N. - soprattutto dal fisico austriaco *E. Mach* (1838-1916), il cui lavoro - benché molto personale - ha avuto sviluppi estremamente interessanti, modificando in modo sostanziale la sistemazione 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 p.es. 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 intorno 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 si ipotizza che le forze centrifughe manifestano lo spazio assoluto. Prendiamo la rotazione della Terra: questa può essere misurata in modi diversi, con procedure operative indipendenti tra loro - per esempio, misurando il periodo di oscillazione di un pendolo, o la variazione del suo piano di oscillazione, 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 manifestati, 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, perchè 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.

Gli O.I. sarebbero - nella formulazione di N. - gli 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. corrisponde alle 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} agente su un corpo di massa \mathbf{m} , trova che l'accelerazione \mathbf{a} soddisfa la legge $\mathbf{F} = \mathbf{m} \mathbf{a}$; 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 (p.es. lasciati cadere) acquisteranno la stessa accelerazione indipendente dalle rispettive masse (questa indipendenza di \mathbf{a} da \mathbf{m} è caratteristica anche della gravità - fatto, questo, certo non casuale e suscettibile di ulteriore analisi), 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 dalle masse - che si manifesta in ogni caso di O. non I., per esempio l'oss. in rotazione - e il fatto stesso di avvertire su di sé gli effetti dell'accelerazione di trascinamento - permette di riconoscere l'O. non I.

È importante rendersi conto di come *l'indipendenza delle accelerazioni relative dalle masse sia strettamente connessa allo stesso principio d'inerzia*. Infatti, i corpi fermi rispetto a un sistema (es. vagone), ma non vincolati ad esso, il quale inizialmente si muove di moto rettilineo e uniforme rispetto ad un altro (es. superficie terrestre), continuano per il principio d'inerzia a muoversi tutti, rispetto a quest'ultimo, di moto rettilineo e uniforme: perciò il loro moto relativo al sistema accelerato deve essere un moto d'insieme, con la stessa acc. relativa. *L'inerzia (tendenza dei corpi a muoversi con velocità costante) è la causa dell'indipendenza dell'acc. relativa di un corpo, misurata da un O. non I., dalla massa di quel corpo.*

Infine, si può osservare che:

- gli O. non I. sono in moto accelerato rispetto agli O. I.;
- tutti gli O. I. sono in moto traslatorio uniforme l'uno rispetto all'altro.

5. Ulteriori considerazioni

Quanto detto a proposito di Mach pone nuovi problemi. Se si ammette che le forze centrifughe sono conseguenza di accelerazioni relative alle masse, si ipotizza che queste masse ne siano la vera causa fisica: si finisce con ammettere che, p.es., le forze centrifughe misurate dall'osservatore terrestre siano 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 delle forze prodotte dalle masse remote dell'Universo (cioè, le stelle fisse) sui corpi in rotazione rispetto ad esse. È inevitabile giungere a questa conclusione, perchè 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 tratta? 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. *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. Questa tesi è nota come “*Principio di Mach*” - non è tuttora chiaro se esso sia in qualche modo verificabile, e se una teoria dell'Universo nel suo insieme debba o no contenere il principio di Mach.

Inoltre, si può porre attenzione al carattere “pseudogravitazionale” delle forze fittizie. L'indipendenza delle accelerazioni fittizie dalle masse è asserita dal “*Principio di Equivalenza*”, secondo il quale un sistema in moto accelerato crea al suo interno un campo di forze non distinguibili dalla gravità. In termini sperimentali, secondo il P. di E. non è possibile, per un osservatore all'interno di un sistema accelerato rispetto a un osservatore inerziale, verificare solo in base ad osservazioni ed esperienze eseguite all'interno del sistema e senza alcuna informazione dall'esterno, se il sistema accelera o se è soggetto ad una forza gravitazionale originata dall'esterno. Non ha importanza quale, tra le due spiegazioni, sia quella reale; ciò che interessa è l'impossibilità di stabilirlo solo in base ai fenomeni che hanno luogo all'interno del sistema. In un certo senso, il P. di E. è una estensione del P. di Relatività, ed esprime l'identità dell'aspetto gravitazionale e di quello inerziale della massa.