

# Evoluzione del concetto di forza

→ M. Jammer, *Storia del concetto di forza nella fisica classica e moderna* (1960), tr. Milano Feltrinelli 1980

## Le origini

Prima di scoprire come sia nato il concetto di forza, anche se non nell'accezione moderna, bisogna tener conto del fatto che anche i concetti scientifici hanno trovato le loro origini e la loro fondazione nell'esperienza quotidiana, e quindi dall'*esperienza sensoriale*. Infatti le concezioni scientifiche, pur essendo frequentemente il risultato dell'intuizione spontanea, tendono a modellarsi, nei limiti del possibile, per analogia con le concezioni dell'esperienza comune.

E' importante sottolineare come la terminologia scientifica, per quanto riguarda specialmente la scienza antica, fornisca informazioni relative alle possibili vie di trasmissione delle idee scientifiche da una cultura all'altra; analogamente la nomenclatura antica relativa ai concetti scientifici fondamentali getta qualche luce sulla storia delle loro origini e della loro evoluzione.

Nella fase prescientifica l'idea di *forza* si è probabilmente formata attraverso la coscienza degli *sforzi* compiuti nelle azioni volontarie. Tale definizione venne poi riferita anche all'ambiente esterno provocando una generalizzazione del concetto di forza. Così alberi, fiumi, rocce, nubi vennero dotati di forze e furono considerati centri di potenza. Si pensava, infatti, che tutto ciò che era attivo fosse anche dotato di vita, e un oggetto, materiale o animale, in quanto dotato di vita, era concepito come se possedesse il medesimo genere di forze che l'uomo riconosceva esistenti in se stesso. Perciò tali oggetti, non solo venivano dotati di una natura antropomorfa, ma erano anche temuti: nei loro confronti si nutriva rispetto e riverenza.

La forza veniva spesso personificata o attribuita a uno spirito oppure a un dio dotato di un potere supremo. Il concetto di forza intesa come una divinità (*nht*), può essere fatto risalire all'antico Egitto sino alla diciannovesima dinastia. La forza, in quanto personificata da *nht*, non indicava solo la forza nel senso di violenza e ferocia, ma implicava un elemento d'ordine etico.

Un analogo sviluppo si può osservare in Mesopotamia. La civiltà mesopotamica era soggetta a forze naturali incostanti ed imprevedibili. Per tale civiltà la forza era impersonata da *Enlil*, il dio della tempesta. *Enlil* rappresenta l'incostanza, le vicissitudini della vita e l'azione dinamica, in contrasto con *Anu*. *Anu* significa "la distesa del cielo" e simboleggia il principio dell'immutabilità e della permanenza. *Enlil* non rappresentava la forza unicamente nel senso di brutalità e di potere, ma egli conferiva alla forza anche il significato di elemento ordinatore dell'universo, di norma regolatrice contro il caos. Anche per molte altre civiltà vi è o vi è stata questa identificazione del concetto di forza con una divinità. Per esempio Erodoto riferisce che la concezione di dio secondo gli antichi persiani e iranici coincideva con quella delle grandi forze naturali; analogamente il nome del "moderno" *Allah* deriverebbe da *al-Azziz* riconducibile a *Al-Uzza* ovvero "il più potente".

Nel pensiero prescientifico greco assistiamo, invece, alla lotta per trovare un compromesso tra forza e destino. *Zeus*, contenendo un'idea di vigore e potenza, rappresenta la forza onnipervadente della natura. Tuttavia anch'egli (→ Omero) deve sottostare al volere del destino (*Moirai*), legge impersonale e inalterabile. Nel successivo sviluppo di questa tematica, particolarmente nel contesto orfico, si può assistere ad una unione tra i due.

Vediamo così che il concetto di forza è stato, fin dall'inizio, strettamente legato a idee di tipo religioso. Basti vedere oggi come anche il Dio cristiano sia simbolo della forza, anche se in questo caso si parla di forza etica. Infatti Dio è la sorgente della forza e della potenza, ma la forza è quella della buona volontà e della giustizia.

## Il mondo antico

**Talete**, **Anassimandro**, ed **Anassimene** (VII-VI sec. a. C.) possono essere definiti i primi *cosmologi*; essi, tuttavia, credevano nel moto eterno; quindi non si ponevano il problema del moto. La loro filosofia può essere, comunque, considerata la prima filosofia naturale (fisica) in quanto essi definivano la natura (*physis*) come sostanza primaria.

**Parmenide** (VI sec. a. C.) diceva che ciò che esiste è un *plenum* infinito: egli nega il moto argomentando che il moto stesso e la sua variazione non possono avere alcuna realtà (→ paradosso di Achille che non riesce a raggiungere la tartaruga). Per Parmenide bisogna abbandonare la fede nel mutamento degli elementi, in nome di quell'unità essenziale che si nasconderebbe dietro tutte le cose e che sarebbe rivelata dall'analisi filosofica.

**Eraclito** (VI sec. a. C.) afferma che tutte le cose si possono ricondurre ad un antagonismo di opposti entro la cosa singola: la forza, tuttavia, non è un elemento regolatore esplicito di questo conflitto. Questa teoria viene ripresa anche da **Anassagora** ed **Empedocle** (V sec. a. C.). Il secondo elabora la dottrina dell'amicizia (*philotes*, *philia*) e della discordia (*neikos*). Anassagora elabora invece la teoria della mente. Entrambi affermano che la causa del moto è da attribuire a *forze non immateriali ma corporee ed estese nello spazio*. Anassagora, inoltre, per spiegare il divenire, dice che la forza motrice è esterna alla materia: la mente (*nous*), fattore dinamico che introduce l'ordine della natura; per Empedocle, invece, esistono due forze distinte ed antagoniste che vengono classificate insieme agli elementi: vi è una forza A chiamata amicizia (genera l'armonia fra gli elementi attraendoli gli uni verso gli altri) ed una forza B chiamata discordia (separa gli elementi dal centro generato dall'amicizia); il mondo viene descritto come un organismo che respira.

Gli **atomisti** dicevano che il mondo è sempre in movimento e che il simile *attrae* il simile.

**Platone** (IV sec. a. C.) afferma che la realtà fenomenica ha un moto effetto di un'*anima vivente immortale* di cui le manifestazioni non sono altro che potenza. La forza, per Platone è qualcosa di intrinseco alla materia e la radice di tutte le forze è qualcosa di segreto che si trova nell'anima del mondo. La forza è detta *dynamis* il cui verbo è *dynasthai* che significa "essere capace" (in forma sia attiva che passiva).

**Aristotele** (IV sec. a. C.) per spiegare la forza introduce sia la causa *materiale* che quella *efficiente*. Egli distingue due tipi di forza: una concezione platonica di forza insita nella materia secondo natura (*physis*) ed un'emanazione della sostanza, che produce il moto

in un secondo oggetto. Questa sola, causa del “moto violento” (vs. “moto naturale”) è la forza in senso proprio (la prima esprime la tendenza naturale di ciascun corpo a “cadere” verso il “luogo proprio”). La forza è inseparabile dal proprio oggetto, non può essere distaccata dalla sostanza in cui ha avuto origine. Ammette, dunque, solo due categorie: la forza di *trazione* e quella di *spinta*.

Il pensiero di Aristotele oscilla fra la forza intesa come principio di moto e la forza come quantità di energia corrispondente alla potenza del moto di un motore.

Il peso per Aristotele è una manifestazione del moto naturale e non causa del moto violento. Non è, dunque, una vera e propria forza (come sarà per la fisica moderna). Obbedisce alle seguenti leggi:

$v = A/B$ A = potenza della forza motrice ;    B = resistenza $AT/BS = \text{costante}$ T = tempo ;    S = spazio
--

La forza è emanazione della sostanza; ha il proprio luogo entro il soggetto che è il veicolo della forza stessa ed è indipendente dall'oggetto.

**Posidonio** (stoico del II sec. a. C.) considera la forza come nozione primaria, qualcosa che lega i due oggetti così correlati ed è ad essi simultanea. L'universo diventa un unico complesso grazie all'interazione di un sistema di forze.

Gli **Stoici**, in generale, consideravano la forza come un insieme di “agente” e “paziente” inseparabili. Il cosmo è un complesso unitario in cui la “simpatia” (*sympatheia*) agisce mediante un fluido onnipresente detto *pneuma* (spirito, in senso fisico: aria calda, cfr. “pneumatico”). Questo fluido è in sostanza l'anima (*psiche*) del mondo (cfr anima del mondo in Platone).

### Dal Medioevo all'età moderna

Se si vuol tracciare una linea di demarcazione cronologica tra scienza antica e moderna, questa può esser fatta coincidere con l'istante in cui **Giovanni Buridano** [→ sotto] concepì la sua teoria della quantità di moto, proclamando che *sia i moti celesti che quelli terrestri sono soggetti alle stesse leggi meccaniche*.

Questa linea di pensiero si compie quando **Newton**, con la legge sull'attrazione universale, diede il “colpo di grazia” alle teorie delle forze astrologiche (forze celesti esercitate dalle stelle sul mondo terrestre).

Per comprendere, quindi, in modo corretto, l'importanza della rivoluzione newtoniana non ci si può esimere dal precisare l'importanza, per il Medioevo, dell'astrologia, intesa come una coerente struttura di pensiero (Lynn Thorndike)

In prospettiva **astrologica** l'intero mondo naturale è regolato e determinato dai moti dei corpi celesti. Essa si basa sul riconoscimento intuitivo del fatto che ciò che appare accidentale è associabile a certe distribuzioni di corpi nello spazio. Questo modo di concepire la forza in astrologia introduce, tuttavia, elementi irrazionali nel concetto in questione, riducendolo ad un pseudoconcetto, inaccessibile alle dimostrazioni matematiche e alle verifiche sperimentali.

Secondo il filosofo del Novecento Cassirer l'astrologia presenta analogie con la *Teoria generale della relatività* di Einstein. Se per Einstein la realtà dinamica è determinata metricamente, per l'astrologia la realtà metrica è determinata dinamicamente. Se qui lo spazio si risolve in forza, nel pensiero astrologico la forza si risolve in spazio. L'apparato celeste quindi non è altro che la visione del nesso di azione dell'universo.

**Teoria di Albumasar**: egli difende l'astrologia richiamandosi alla dottrina aristotelica dell'*etere* per la quale i corpi astrali sarebbero costituiti da una quintessenza (l'etere appunto), diversa da ciascuno dei 4 elementi di questo mondo e dalle loro combinazioni. Il moto dei corpi celesti è eterno, perfetto ed immutabile. Nel mondo sublunare si hanno movimenti ciclici di generazione e corruzione causati dall'eterno moto circolare dei corpi celesti. Da questi due punti risulta evidente che l'astronomia araba era costituita da una ricapitolazione e da un'elaborazione delle concezioni aristoteliche (salvo che per l'alchimia e la medicina).

**Teoria di Al-Kindi**: per quanto riguarda la concezione di forza, egli unì concetti aristotelici a nozioni neo-platoniche.. Dai suoi studi fatti nel campo dell'ottica, egli stimò che, come la luce ed il calore, anche la forza si propagasse mediante raggi. Il suo punto di partenza è costituito da un'interpretazione del fenomeno dall'irraggiamento delle stelle, concepito come veicolo di influenze astrologiche e di forze: non solo le stelle, ma anche tutti gli elementi del mondo sarebbero sorgenti di forze (fuoco, colore e suono non sarebbero altro che esemplificazioni di questa diffusione di forze). *Differenze da Aristotele*: per Aristotele la propagazione della luce è istantanea, mentre le forze (finite) non possono essere tali, perché una forza maggiore di una forza data che fosse istantanea dovrebbe allora agire in un tempo ancor più breve della istantaneità, il che è impossibile.

Un personaggio che si rifà alle teorie arabe fu **Ruggero Bacon** (XIV sec.) [da non confondersi con Francesco Bacon]. Secondo lui gli oggetti dell'universo, nonostante la loro diversità, sono collegati da una rete di reciproche azioni e reazioni rese attive dall'infusione di virtù celesti sui corpi inferiori. Mentre tutti gli altri studiosi del tempo si fermavano ad accettare come spiegazione ultima le “virtù celesti”, Bacon è il primo a spingersi oltre, ipotizzando il loro meccanismo fisico. La nozione principale a cui ricorre Bacon è quella di “specie” (*species* = immagine, similitudine, cfr. le dottrine antiche dell'attrazione tra cose simili e la teoria moderna della gravitazione tra “masse”); ma egli non riuscì a darne una definizione esatta. In un brano della sua opera *Opus maius* Bacon si avvicina alla definizione di *species*: “questa forza vien detta similarità, immagine, specie, e vien chiamata con molti altri nomi, ed è prodotta dalla sostanza così come dall'accidente e dalla sostanza spirituale più di quella corporea”. In altre opere Bacon afferma che la “specie” non è emessa dall'agente, perché, se così fosse, l'agente stesso verrebbe indebolito fino a consumarsi. L'agente invece eccita l'attività potenziale del mezzo che si frappone fra lui e il paziente, per eccitare infine l'attività potenziale della sostanza del paziente. In altre parole la forza è un certo tipo di reazione a catena. Egli si rifà chiaramente alla concezione di forza di Al-Kindi; fu probabilmente influenzato dagli studi sull'ottica di questi e dalla lettura del trattato sull'ottica di Aristotele (*De divinatione*) o dal *De rerum natura* di Lucrezio.

Nella sua opera, *In sententia*, **Bonaventura** comprende, tra le cause del moto di un corpo pesante, una forza di repulsione esercitata dalle sfere celesti. Egli così si ricollega alla spiegazione aristotelica secondo cui la causa efficiente è l'impregnarsi di una porzione di materia con la *forma terrae*, mentre la causa accidentale è costituita dalla rimozione dell'ostacolo che formava la

resistenza al moto prima che questo avvenisse. Questa teoria non ebbe successo perché in essa si assumeva che un corpo avrebbe dovuto muoversi sin dall'inizio con la massima accelerazione, in quanto si era tacitamente assunto che la repulsione si attenuasse con la distanza.

Contro l'accettazione dell'esistenza di sole forze attrattive si mossero due obiezioni:

- l'assunzione di una forza attrattiva dovrebbe condurre alla conclusione che un corpo deve essere più pesante in vicinanza alla superficie terrestre che quando si trova più in alto. Questo andava contro la teoria delle sfere;
- si affermava che se l'attrazione era la *vix motrix* di un corpo, considerando che la resistenza al moto fosse proporzionale alla massa, un corpo massiccio, avrebbe dovuto muoversi con velocità inferiore a quella di un corpo più piccolo.

Viene anche modificata la *formula matematica* che esprime la forza. Secondo la tradizionale legge sostenuta dai Peripatetici la velocità del mobile ( $v$ ) è determinata dal rapporto tra forza motrice (A) e resistenza (B) ( $v$  è proporzionale a A/B). Secondo **Giovanni Filopono** (fine VI sec.), invece,  $v$  è proporzionale a A-B. Questa tesi è fondata su considerazioni metafisiche neoplatoniche. Una terza forma della legge del moto fu proposta da **Tommaso Bradwardine**. Egli riconobbe la necessità di modificare le precedenti formulazioni al fine di comprendervi anche il caso di uguaglianza tra la forza motrice A e la resistenza B. La legge del moto di Bradwardine assume questa forma:  $v = \log (A/B)$

Per quanto riguarda la *forza di gravità* va detto quanto segue.

Innanzitutto bisogna premettere che in accordo con la duplice natura delle forze, anche la *forze resistenti* appartengono a due classi:

- le resistenze *esterne* (che si esercitano sul mobile in direzione opposta a quella del suo moto)
- le tendenze *interne* (che tendono a far tornare il mobile nel suo luogo naturale)

In analogia al concetto dell'impeto, la *gravità* veniva ridotta ad una forza intrinseca al grave, e cioè a una forza che non aveva bisogno, per la propria azione, di un ulteriore *substratum*.

Il concetto di forza di resistenza/caduta come proprietà della materia, e quindi nel senso aristotelico, viene sostituito dal concetto di forza come *attività* interna che è causa del moto del corpo. Questo concetto era conforme alla teoria espressa da Averroè secondo cui il peso di un grave non varia al variare della sua distanza dal centro della terra finché esso si trova entro i limiti di una data sfera degli elementi.

Nel Trecento troviamo un diverso filone di idee, il quale conduce ad una prima anticipazione della nozione di campo di forza.

**Giovanni Buridano** supponeva che la *virtus caelestis* permeasse tutto lo spazio ed esercitasse così la propria influenza sui corpi, in modo più o meno simile a quanto accade con un campo stazionario di forze, per la fisica attuale.

In contrasto con Aristotele Buridano suggeriva che Dio avesse comunicato a queste sfere, nel creare l'universo, un *impetus* iniziale simile a quello che viene impresso a una pietra quando la si scaglia.

Nonostante la teoria dell'*impetus* abbia origini anteriori a Buridano, egli fu il primo ad applicarla sistematicamente al moto circolare delle stelle, rompendo quindi con l'idea (aristotelica) di una disomogeneità tra mondo sublunare e mondo celeste e anticipando, in questo, le vedute galileiane.

Durante il Quattrocento, la nozione di *impeto rotazionale*, fu interpretata in modo maggiormente spiritualistico. Nel *De ludo globi* Nicola Cusano sostiene che l'impeto anima il globo così come lo spirito anima il corpo umano.

Il concetto di forza generalmente accettato nel Cinquecento consisteva in una combinazione tra il principio secondo cui "il simile attrae il simile", la teoria neoplatonica della *simpatia* cosmica e l'assunzione peripatetica [cioè: aristotelica, → da "Peripato", nome dei giardini della scuola di Aristotele, il "Liceo"] di intelligenze di ordine superiore (*dèi planetari* in Aristotele, *angeli* per i cristiani → Dante) considerate alla stregua di potenze motrici operanti nelle stelle. Anche nella seconda metà di questo secolo prevalse la teoria della *simpatia* [*sym-pàtheia* = com-patire, percepire/subire "in rete"] discendente dall'antica tradizione platonica fatta rivivere dalla scuola di Chartres e trasmessa sino a Copernico da Cusano, Ficino ed altri pensatori.

Come testimonianza di tale teoria si riporta una dettagliatissima descrizione della simpatia delle parti rispetto ad un "tutto" eseguita da **Girolamo Fracastoro** (mago, astrologo, alchimista del '500):

"Quando due parti di un medesimo tutto sono separate l'una dall'altra, ciascuna di esse invia all'altra un'emanazione della propria forza sostanziale, una specie che si propaga attraverso lo spazio intermedio; grazie al contatto di questa specie ciascuna delle parti tende verso l'altra allo scopo di riunirsi in un singolo tutto; così si spiega la mutua attrazione del simile verso il simile, e la simpatia del ferro verso il magnete ne è un esempio".

Si troveranno tracce di questa teoria anche in un autore del Settecento: *De occultis proprietatibus* di **Antonio Luiz**. Secondo quest'ultimo il simile si unisce al simile; e l'universo è mantenuto in ordine grazie a questa facoltà.

Tuttavia questi lavori (ed altri della stessa epoca), pur essendo di ispirazione neoplatonica, trasformano la più o meno mitica concezione dell'anima del mondo in un'idea scientifica, secondo cui le varie parti dell'universo si influenzano reciprocamente. È questo il clima culturale che portò alla concezione della natura come organismo autonomo ed autosufficiente. Questa concezione si rifletteva, tuttavia, nell'assunzione di una moltitudine di forze solamente ipotizzate e quindi di qualità meramente occulte; perciò la concezione di forza mancava ancora di tutte quelle determinazioni quantitative e fisiche necessarie alla formazione di una solida base per una nuova scienza fisica.

Fa eccezione **Bernardino Telesio**:

Nel suo *De rerum natura juxta propria principia* egli riduce tutte le forze attive ad una forza di *espansione* dovuta al *caldo* e ad una forma di *contrazione* dovuta al *freddo* [→ Anassimene di Mileto, VI sec. a. C.]. Come argomentazione della sua tesi Telesio porta il "fatto" che il contrasto tra *caldo* (principio del *movimento*) e *freddo* (causa di *immobilità*) per la supremazia condusse alla creazione del cielo e della terra [in effetti si tratta di un'altra ipotesi che a sua volta può essere suffragata solo mediante indizi, per via analogico-induttiva, oppure per *auctoritas*].

Una caratteristica di molte teorie pre-newtoniane era la seguente. In contrasto con quello che sarebbe stato il concetto di forza di **Newton** (per cui la forza è una quantità soggetta a leggi matematiche) venivano prese in considerazione come entità matematiche i punti di applicazione della forza anziché la sua grandezza. La tendenza di un oggetto terrestre ad avvicinarsi alla terra stessa veniva concepita in termini di azione tra i loro centri di gravità, invece che in termini di una relazione esistente tra le parti (massicce) di questi due corpi.

Queste concezioni furono oggetto di critica da parte di due importanti precursori del nuovo concetto di forza del Seicento: William Gilbert e Giovanni Keplero.

Nel *De mundo nostro sublunari* **Gilbert** pone in rilievo l'origine fisica ("magnetica") delle forze attrattive. Questo concetto è conclusione suggerita dalla "rivoluzione copernicana": se in realtà la terra non è che uno dei pianeti che ruotano attorno al sole, e se il sole, non è che una tra le stelle (come sostiene **Bruno**), allora la gravità dev'essere una proprietà comune a tutti i corpi celesti, e ciascun corpo deve esercitare le proprie forze attrattive sulle parti che gli sono "affini".

**Keplero** giunge alle sue famose leggi relative al moto dei pianeti supponendo una forza di attrazione esercitata dal Sole verso ciascun pianeta (interpretata in un primo tempo come il risultato di *eros*, in senso platonico)

Il concetto di forza non trovava posto nella fisica di **Descartes**, che doveva servirsi unicamente di concezioni matematiche. "Io non accetto - scriveva nei *Principia philosophiae* - né desidero che si abbiano in fisica principi diversi da quelli che si hanno in geometria o nella matematica astratta, in quanto tutti i fenomeni della natura possono essere spiegati per loro mezzo, e di essi si può dare una dimostrazione certa".

La geometrizzazione della fisica: questo era il programma di Descartes ancor prima che nascesse la meccanica classica. Si trattava di un programma troppo audace e troppo difficile, anche per un gigante intellettuale come Descartes. Già all'inizio egli dovette aggiungere al proprio vocabolario matematico il concetto di estensione impenetrabile (della materia solida), la cui natura, come concetto matematico, è tra le più discutibili. Inoltre la teoria dei vortici, che per Descartes era un sistema di proposizioni essenzialmente cinematiche, implicava concetti quali quello di pressione e altre nozioni simili che erano concetti dinamici camuffati.

Come spiegava, allora, Descartes il fenomeno della gravità?

Ma ora desidero che tu prenda in considerazione che cosa sia la gravità di questa Terra, vale a dire la forza che unisce tutte le sue parti e che le fa tendere verso il suo centro, ciascuna di esse in modo maggiore o minore a seconda che siano più o meno grandi e solide; il che non è altro, e non consiste in altro, se non che le parti del piccolo cielo che la circonda, ruotando molto più rapidamente di quanto non facciano, attorno al suo centro, quelle che le appartengono, tendono ad allontanarsi da essa con molto maggior forza, e di conseguenza le spingono in basso.

La gravità non è altro che il moto verso il basso della materia terrestre, nient'altro, cioè, che una turbolenza antiperistatica nel pieno. I corpi terrestri sono compressi verso il centro del vortice, e cioè verso la terra, dagli elementi eterei e galleggianti del vortice. Pertanto la gravità non è una tendenza insita nella materia ma una repulsione, una reazione esercitata dalle particelle d'etere che si allontanano dal centro del vortice. Una pietra cade sulla Terra perché deve lasciar spazio alle particelle eteree che, grazie al loro moto circolare, si allontanano dalla superficie della Terra. Se questa materia eterea dotata di un veloce movimento rotatorio non circondasse la Terra, oppure se si supponesse che la Terra si trovasse nel vuoto, allora tutti i corpi che non sono saldamente legati al suolo verrebbero scagliati lontano in conseguenza del moto circolare cui sono costantemente soggetti. Molto noto è l'esperimento seguente, cui si ricorre molto spesso nelle lezioni per dimostrare la forza centrifuga.

Due cilindri di vetro, ciascuno dei quali contiene dell'acqua e una pallina di legno B, vengono collegati a un comune asse di rotazione A in modo da formare un piccolo angolo rispetto all'orizzontale. Quando il sistema è in quiete le palline di

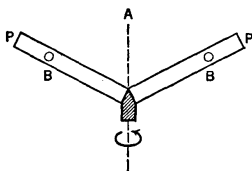


Fig. 2. Un esperimento che dimostra la teoria dei vortici di Cartesio concernente la gravità.

legno occupano nei cilindri le posizioni più alte possibili, P; ma quando il sistema ruota con una certa velocità angolare, le palline vengono spinte verso il centro (e cioè verso l'asse di rotazione). All'interno dei cilindri di vetro ruotanti l'acqua corrisponde al Inezzo vorticoso, costituito da particelle d'etere, di Descartes, e le palline di legno corrispondono agli oggetti terrestri. (Naturalmente l'impulso centripeto che ne risulta, se viene espresso nei termini moderni della meccanica classica, è un effetto di spinta statica in

un mezzo soggetto a un campo di forze inerziali radiali, vale a dire la cosiddetta forza centrifuga).

Il problema della cosiddetta "forza centrifuga" fu risolto da Christiaan **Huygens** nell'opera intitolata *Horologium oscillatorium*, dove l'argomento del moto circolare uniforme è trattato solo in modo accidentale e senza le necessarie dimostrazioni geometriche. Huygens possedeva l'espressione matematica della cosiddetta forza centrifuga già nel 1669, come rivela la sua famosa lettera ad Henry Oldenburg, il segretario della Royal Society di Londra. In questa lettera, che porta la data del 4 settembre 1669, Huygens chiese ad Oldenburg di custodire negli archivi della Royal Society alcuni anagrammi «per evitare dispute, e per dare a ciascuno quanto giustamente gli spetta nell'invenzione di nuove cose." Uno degli anagrammi è translitterato come segue: "Se un corpo si muove di moto circolare con quella velocità che avrebbe

qualora cadesse da un'altezza pari alla quarta parte del diametro, avrà una forza centrifuga pari alla sua gravità; e cioè, esso tende la fune con cui è unito al centro come se fosse appeso ad essa”.

Con la nostra notazione moderna la forza centrifuga, così com'è dimostrata per intero nell'opera postuma di Huygens *De vi centrifuga*, è data dalla formula  $F = mv^2/r$ , dove  $v$  indica la velocità e  $m$  la massa della particella, mentre  $r$  è il raggio della sua traiettoria circolare. Se la particella dovesse cadere per una distanza pari a  $s = r/2$ , e cioè per un quarto di diametro, la sua velocità sarebbe  $v = \sqrt{2gs} = \sqrt{gr}$  e la sua forza centrifuga avrebbe di conseguenza un valore pari a  $mg$ , ossia un valore pari al suo peso. Il che dimostra la correttezza, in termini di meccanica newtoniana, dell'asserzione di Huygens relativa al caso particolare citato, assumendo la validità della formula generale per  $F$ .

E' ovvio che la forza centrifuga è concepita da Huygens come una forza reale, alla stessa stregua delle altre forze note a quei tempi. L'idea di considerarla una forza apparente o inerziale è naturalmente di data assai posteriore.

Per quanto riguarda la *forza di gravità* Huygens era uno di quei numerosi scienziati del continente che non riuscivano ad ammettere la concezione della forza in termini di *azione a distanza*. Per lui, come per tutti gli altri, una simile concezione significava la capitolazione del pensiero scientifico di fronte a qualità occulte. Fondandosi sulla filosofia cartesiana, egli inizia il *Discours* con queste osservazioni:

Per trovare una causa intelligibile della gravità, si deve scoprire come possa accadere, supponendo in natura solo corpi fatti di una stessa materia, e nei quali non si consideri alcuna qualità o inclinazione ad avvicinarsi l'uno all'altro, ma solo diverse grandezze, figure e moti, come, dico, possa accadere che tuttavia molti di questi corpi tendano direttamente verso un medesimo centro, e attorno ad esso si riuniscano, ciò che è il più comune e principale fenomeno di ciò che chiamiamo gravità.

Huygens passa quindi a illustrare la propria teoria della gravità mediante un esperimento che egli stesso aveva eseguito avendo in mente questo scopo particolare e che considera di una certa importanza in quanto permette di visualizzare il suo principio di gravità. Posto un certo numero di minuti frammenti di ceralacca in un recipiente chiuso contenente acqua, Huygens aveva poi fatto ruotare il recipiente stesso. Le particelle di ceralacca, essendo leggermente più pesanti dell'acqua, si erano disposte lungo il bordo del fondo. Quando si arrestava il movimento rotatorio del recipiente e l'acqua continuava ancora a ruotare, queste particelle, toccando il fondo e fermandosi più rapidamente, si accumulavano verso il centro del fondo stesso. Ebbene, afferma Huygens, questo moto centripeto è un'esatta riproduzione del meccanismo gravitazionale. Dopo una discussione relativa ai diversi moti della materia fluida che circonda la terra e che per certi aspetti è simile alle particelle d'etere di Descartes, Huygens identifica la gravità con "lo sforzo che compie questa materia fluida per allontanarsi dal centro e per disporre nei posti che abbandona quei corpi che non possono seguire questo movimento".

Per render ragione del «moto naturalmente accelerato» di Galileo relativo ai corpi in caduta libera, nonché del fatto che la gravità non può essere schermata da un qualsiasi oggetto interposto - osservazione questa che riveste un estremo interesse - Huygens suppone che la materia fluida, concepita come molto sottile e capace di penetrare facilmente attraverso i pori della normale materia, ceda ai corpi che cadono una successione continua di impatti per contatto. In tal modo egli pensava di poter spiegare la gravità ricorrendo a una *vis a tergo* [forza da dietro] che escludesse ogni azione a distanza. Le teorie dei vortici di Descartes e di Huygens divennero i prototipi di tutte le future teorie meccanicistiche postnewtoniane della gravitazione e, almeno entro certi limiti, esse esercitarono anche un'influenza non trascurabile sullo stesso Newton.

Che **Newton** non avesse mai rifiutato la possibile esistenza di un mezzo etereo inteso come strumento per una teoria sostanzialmente cinetica della gravità, per lo meno al tempo in cui stava componendo la prima edizione dei *Principia*, risulta in modo ovvio dalle sue osservazioni sulla *Definizione I*, dove afferma: "Non considero qui un mezzo, se pure un tale mezzo esista, che permei liberamente gli interstizi tra le parti dei corpi."

"*Se pure un tale mezzo esista.*" Queste parole sono caratteristiche dell'atteggiamento di Newton nei confronti del problema della natura della gravitazione, almeno per quanto concerne la pubblicazione citata. Non essendo in possesso di materiale sperimentale e d'osservazione sufficiente a dar concretezza a una specifica teoria sulla natura della gravitazione, Newton preferiva astenersi dal pronunciare giudizi su questo problema e discuteva la gravitazione indipendentemente dal fatto che potesse trattarsi di un'azione a distanza o di un risultato dell'azione per contatto tra particelle d'etere e materia ordinaria. Pur parlando di "corpi che si attraggono l'un l'altro," delle "attrazioni di un corpuscolo verso le diverse particelle d'etere" e di "attrazione mutua", e pur usando espressioni analoghe che avrebbero potuto ingannare il lettore facendogli credere di aver a che fare con una concezione delle forze intese come innate nella materia e agenti a distanza, in nessun punto della prima edizione dei *Principia* Newton fa affermazioni che tendano in questa direzione.

Inoltre, nella seconda edizione dei *Principia* (1713) egli fece una dichiarazione esplicita in proposito (essendosi forse reso conto della possibilità di dare adito a tali fraintendimenti), scrivendo:

Uso qui la parola *attrazione* in generale per indicare un qualsiasi tentativo fatto dai corpi per avvicinarsi l'uno all'altro, sia che questo tentativo sorga dall'azione dei corpi stessi, in quanto tendenti l'uno verso l'altro o agitanti l'uno l'altro grazie a spiriti emessi; sia che esso sorga dall'azione dell'etere o dell'aria, o di un qualsiasi altro mezzo, corporeo o incorporeo, che in qualsiasi maniera spinga, gli uni verso gli altri, i corpi che in esso sono situati.

All'inizio del libro III (*Sistema del mondo*) nel capitolo in cui si discute delle regole del ragionamento in filosofia, Newton, aggiunse, nella seconda edizione, questa frase: "Io non affermo che la gravità sia essenziale ai corpi: parlando della loro *vis insita* non intendo altro che la loro inerzia." Quest'improvvisa riesumazione del concetto di *vis insita* [forza intrinseca] e la sua nuova interpretazione in termini di inerzia era dovuta alla necessità di neutralizzare la precedente espressione, e cioè la *Definizione III*, in cui l'inerzia era indicata come una "forza innata della materia," "un potere di resistere," nonché le osservazioni sull'inerzia comprese nella *Regola III*, dove Newton aveva stabilito che tutti i corpi sono "dotati di certi poteri (che noi chiamiamo inerzia)". Abbiamo, infine, il famoso detto di Newton "*hypotheses non fingo*," alla fine del libro III, nello Scolio generale, in cui afferma con enfasi:

Fino ad ora abbiamo spiegato i fenomeni del cielo e del nostro mare mediante il potere della gravità, ma non abbiamo ancora assegnato una causa a questo potere... Non sono ancora stato capace di scoprire la causa di queste proprietà della gravità a partire dai fenomeni, e non intendo fingere ipotesi; infatti tutto ciò che non è dedotto dai fenomeni dev'essere chiamato ipotesi; e le ipotesi non hanno posto nella filosofia sperimentale, siano esse metafisiche oppure fisiche, si riferiscano a qualità occulte o a qualità meccaniche. In questa filosofia proposizioni particolari vengono inferite dai fenomeni, e sono poi generalizzate per induzione. E', questo il modo in cui sono state scoperte l'impenetrabilità, la mobilità, le forze impulsive dei corpi e le leggi del moto e della gravitazione. Ed è per noi sufficiente che la gravità esista realmente, e che agisca secondo le leggi che noi abbiamo spiegato, e che serva ampiamente a render ragione di tutti i moti dei corpi celesti e del nostro mare.

Bentley con molta eloquenza forzò il significato della concezione newtoniana della gravitazione nei propri *Sermoni*. La mutua attrazione senza contatto o impulso, così egli sosteneva, non è un attributo della mera materia ma qualcosa che è necessariamente dovuto a un principio immateriale, a una mente immateriale e vivente che deve "dar forma e attuazione alla morta materia, e reggere la struttura del mondo." Secondo Bentley la gravitazione universale era al di sopra di ogni meccanismo e di ogni causa materiale, e procedeva "da un più alto principio, da un'energia e un'impressione divine". L'interpretazione data da Bentley della gravitazione universale non incontrò l'approvazione di Newton. Newton così si oppone alle affermazioni di Bentley in una lettera inviata a quest'ultimo nel 1692:

A volte lei parla della gravità come se fosse essenziale e inerente alla materia. La prego di non attribuire a me una simile concezione; infatti la causa della gravità è proprio ciò che io non pretendo di conoscere, e pertanto sarebbe necessario molto più tempo per prenderla in considerazione.

In modo simile Newton si rivolge a Bentley, fornendogli queste indicazioni, in una seconda lettera:

L'inconcepibile che la materia bruta e inanimata possa, senza la mediazione di qualcos'altro che non sia materiale, operare sul resto della materia e influenzarlo senza un mutuo contatto, come dovrebbe accadere nel caso della gravitazione qualora questa fosse essenziale e inerente alla materia nel senso di Epicuro. E questa è una delle ragioni per cui desidero che lei non attribuisca a me la gravità come innata. Che la gravità sia innata, inerente ed essenziale alla materia, così che un corpo possa agire su un altro attraverso il vuoto e a una certa distanza, senza la mediazione di un qualcos'altro mediante cui l'azione e la forza di quei corpi possano essere trasmesse dall'uno all'altro, è per me un'assurdità così grande che non credo che alcuna persona che abbia qualche facoltà razionale di pensiero in questioni filosofiche possa mai cadervi. La gravità dev'essere causata da un agente che agisce costantemente secondo certe leggi; ma che questo agente sia materiale oppure immateriale, è questione che ho lasciato alla considerazione dei miei lettori.

Veniamo ora all'ultimo documento da noi usato per giustificare la nostra interpretazione della teoria newtoniana della gravitazione, e cioè all'*Opticks*, la cui prima edizione fu pubblicata nel 1704. Per quanto riguarda la nostra discussione, però, è di maggiore importanza la seconda edizione (1717), nella cui avvertenza Newton afferma quanto segue:

E per mostrare che non considero la gravità come una proprietà essenziale dei corpi, ho aggiunto una questione concernente la sua causa, decidendo di proporla sotto forma di questione perché non sono ancora soddisfatto di essa, per mancanza di esperimenti.

Così, nella questione 31, Newton afferma nuovamente:

Non considero qui come queste attrazioni possano aver luogo. Ciò che chiamo attrazione può aver luogo per impulso, o attraverso qualche altro mezzo a me ignoto. Uso qui questa parola unicamente per indicare, in generale, una qualsiasi forza grazie alla quale i corpi tendono l'uno verso l'altro, quale che ne sia la causa.

Ancora una volta abbiamo, in questi brani, quella tendenza in un certo senso agnostica nei confronti della gravitazione che già abbiamo trovato nei *Principia*. Si deve tuttavia ammettere che, anche nell'*Opticks*, ci sono affermazioni le quali sembrano suggerire che Newton non si opponesse così fortemente, almeno a volte, alla concezione della gravitazione concepita come potenza innata nella materia. Così egli scrive nella questione 31:

Prendendo in considerazione tutte queste cose, mi sembra verosimile che Dio abbia all'inizio formato la materia in particelle solide, massicce, dure, impenetrabili e mobili di tali dimensioni e figure, e con tali altre proprietà, e in tale proporzione allo spazio, da essere adatte in sommo grado al fine per il quale egli le formò... Mi sembra inoltre che queste particelle non abbiano solamente una *vis inertiae*, accompagnata da quelle leggi del moto passive che naturalmente risultano da quella forza, ma anche che esse vengano mosse da certi principi attivi, quale quello della gravità.

Può anche non essere impossibile che quando, negli ultimi anni della sua vita, egli inclinò in modo più preciso a una teoria corpuscolare della luce e ritenne superflua l'assunzione di un etere onnipervadente, questo diverso orientamento abbia avuto ripercussioni sulla sua concezione della gravitazione. Nel complesso, tuttavia, egli si opponeva, nella misura in cui era in gioco la metodologia scientifica, a ogni interpretazione metafisica o teologica della gravitazione. Il che era nettamente in contrasto col suo atteggiamento nei confronti della concezione dello spazio, un atteggiamento che era fortemente legato a considerazioni di tipo metafisico e teologico.

In sintesi: nello schema concettuale della scienza fisica secondo Newton, il concetto di forza gravitazionale è una *nozione* in ultima analisi *irriducibile*. Essa si distingue dagli altri tipi di forze grazie alla sua universalità e alla conseguente importanza che essa assume rispetto alle considerazioni astronomiche e cosmologiche. I suoi aspetti quantitativi vengono accertati attraverso l'osservazione; la sua natura ultima è ignota.

E' importante notare che, per i contemporanei di Newton, ciò implicava che la gravitazione rimanesse un fenomeno privo di spiegazione. Infatti, a quell'epoca, spiegare un fenomeno fisico significava ancora darne le cause meccaniche, e cioè renderne ragione in termini di qualità fondamentali della materia: impenetrabilità, estensione e inerzia, insieme alle leggi del moto. Orbene, era chiaro che la tradizionale spiegazione meccanica, così com'era stata esposta da Descartes o da Huygens, non poteva render ragione del fatto che la gravitazione è proporzionale alle masse e non alle superfici dei corpi implicati. E in realtà Newton comprese che tutte le teorie basate sul semplice impatto esterno erano sostanzialmente insufficienti a causa di questo motivo. Eppure questo era l'unico metodo scientifico di spiegazione allora disponibile e inattaccabile da un punto di vista metodologico. Si può essere pressoché sicuri che queste riflessioni fossero responsabili delle indecisioni e dei dubbi di Newton sulla possibilità che la gravitazione potesse mai ridursi a fenomeni puramente meccanici.

**Leibniz** in un interessante articolo pubblicato nel 1686 negli "Acta Eruditorum" col titolo *Brevis demonstratio erroris memorabilis Cartesii et aliorum*, Leibniz discute gli aspetti quantitativi della forza. Egli sostiene che la quantità di moto cartesiana, e cioè il prodotto della massa per la velocità, non è la misura generale della forza. Questa errata concezione, sostiene Leibniz, sorge dal fatto che nelle cinque macchine ordinarie la velocità e la massa "si compensano reciprocamente". Di qui, continua Leibniz, i cartesiani sono saltati alla conclusione che sia proprio questa la quantità che si conserva nell'universo (e che costituisce pertanto la misura matematica della forza). Al fine di esporre la corretta misura della forza, Leibniz prende l'avvio dall'affermazione che una medesima forza è necessaria per sollevare una massa  $m_a$  di 1 libbra a un'altezza  $h_a$ , di 4 piedi e una massa  $m_b$  di 4 libbre ad un'altezza  $h_b$  di 1 piede. La medesima forza sarà presente quando questi corpi cadano rispettivamente dalle medesime altezze. Orbene, come ha dimostrato Galileo, la velocità  $v_a$ , conquistata dal primo corpo nel cadere per una distanza di 4 piedi è il doppio della velocità  $v_b$  acquistata dal secondo corpo nel cadere per una distanza di 1 piede:  $v_a = 2v_b$ .

In base all'assunzione naturale per cui la forza è proporzionale alla massa  $m$ , è valida la seguente equazione: forza =  $mf(v)$ , dove  $f(v)$  indica una funzione, ancora da determinare, della velocità. Poiché le due forze sono eguali, abbiamo che:  $m_a f(v_a) = m_b f(v_b)$ . Ma  $m_b = 4m_a$ , e  $v_a = 2v_b$ . Pertanto  $m_a f(2v_b) = 4 m_b f(v_b)$  ovvero  $f(2v_b) = 4f(v_b)$ . Quest'ultima equazione, conclude Leibniz, mostra che la funzione  $f(v)$  dev'essere una funzione quadratica del proprio argomento, e cioè una funzione di  $v^2$ . Ciò che si conserva e costituisce la misura della forza è quindi:  $mv^2$ .

Nello stesso modo, in generale, si conviene, che le forze di corpi eguali sono come i quadrati delle velocità, e che pertanto le forze dei corpi in universale sono in ragion composta rispetto ai corpi e ai quadrati delle velocità". È questa la definizione matematica data da Leibniz per la forza in azione.

Sulla base di questa concezione Leibniz avrebbe potuto facilmente concepire l'azione gravitazionale come espressione dell'*interazione a distanza* tra punti di forza. La sua teoria monadologica gli permetteva, infatti, di concepire questi "punti metafisici" come dotati di *appetitus* e percezione; il che avrebbe giustificato un'azione a distanza inconcepibile se riferita a materia inerte. In realtà egli si oppose all'idea di azione a distanza, mentre ad affermarla fu piuttosto il suo allievo Boscovich.

La nozione di forza come *azione a distanza* (su cui Newton non aveva voluto pronunciarsi) divenne a poco a poco un concetto basilare per il grande edificio classico della meccanica teorica. Così nella sua *Mécanique céleste* Laplace sostenne che i suoi studi avevano per oggetto la riduzione di tutti i fenomeni meccanici a forze agenti a distanza. L'opera monumentale di Lagrange, e cioè quella *Mécanique analytique* che è il fastigio della meccanica classica, fu scritta nello stesso spirito. La meccanica dell'azione a distanza ottenne un'ulteriore conferma nelle fortunate applicazioni delle teorie classiche dell'elettricità e del magnetismo, quali furono esposte da Laplace e Poisson e sistematizzate da Weber. Persino gli effetti della capillarità, che sono fenomeni di contatto per eccellenza, furono assoggettati al principio di azione a distanza da parte di Laplace e di Gauss.