

Storia del concetto di moto (parte seconda).

“Colui che cerca l'esatta *verità* deve ricordare che cosa significa ogni nome di cui fa uso: altrimenti si troverà avvolto in un viluppo di parole, come un uccello nella pania, che quanto più si dibatte, più s'impania. E perciò in Geometria (l'unica Scienza che sia piaciuto a Dio fin qui di concedere all'umanità), gli uomini cominciano col fissare il significato delle loro parole”.

Thomas Hobbes

Definizioni

DEF. I - *La quantità di materia [massa] è una misura di sé stessa, in quanto dipende congiuntamente dalla densità e dal volume.*

Così una quantità d'aria di densità doppia in uno spazio doppio ha una massa quadrupla, in uno spazio triplo ha una massa sestupla. La stessa cosa si può dire per la sabbia, per la neve e per la polvere che siano condensate per compressione o liquefazione e per tutti i corpi condensabili. [Oggi si dice che la massa di un dato corpo è data dal prodotto della sua densità per il volume occupato].

DEF. II - *La quantità di moto è una misura di sé stessa, in quanto dipende congiuntamente dalla velocità e dalla quantità di materia.*

La quantità di moto di un intero corpo è la somma delle quantità di moto delle singole parti componenti e perciò un corpo di quantità doppia [di massa doppia] e con la stessa velocità ha una quantità di moto doppia; se anche la velocità è doppia la quantità di moto sarà quadrupla.

DEF. III - *La vis insita, o forza innata della materia, è un indice della resistenza con la quale un corpo, per quanta in esso ne risiede, continua nel suo stato attuale, sia esso di quiete o di moto uniforme lungo una linea retta.*

La forza è sempre proporzionale alla massa del corpo cui essa è applicata e non differisce dalla inattività della massa, se non nel nostro modo di concepirla. Un corpo non è rimosso senza difficoltà dal suo stato di quiete o di moto, a causa della natura inerte della materia. Da ciò si può dedurre che questa 'vis insita' può essere chiamata col nome più significativo di 'inerzia' (*vis inertiae*) o forza di inattività.

Fin qui, dice Newton, è stato indicato in quale senso siano da intendersi nel seguito parole non comunemente note. Ma Newton ha necessità di fissare ancora due

importanti concetti; nel famoso Scolio con cui termina la prima parte Newton introduce il tempo assoluto e lo spazio assoluto:

- I. *Il tempo assoluto, vero, matematico, in sé e per sua natura senza relazione con alcunché di esterno, scorre uniformemente, e con altro termine è chiamato durata.*
- II. *Lo spazio assoluto, per sua natura senza relazione con alcunché di esterno, rimane sempre uguale e immobile.*

Occorre ribadire, a questo punto, che l'assolutezza del tempo e dello spazio sono fondamentali nella visione newtoniana; il moto rettilineo ed uniforme è legato all'assenza di accelerazione, all'assenza cioè di variazioni temporali della velocità; se non esistesse un tempo assoluto non si potrebbe quindi neanche parlare di moto rettilineo ed uniforme, in quanto il moto stesso dipenderebbe dall'orologio dell'osservatore. In Inghilterra ed in Europa in generale la nozione di tempo assoluto era familiare, potremmo dire scontata. Per quanto riguarda Newton, la fonte diretta della sua ispirazione fu il suo maestro Isaac Barrow: "...sia che le cose si muovano, sia che giacciono in riposo, sia che dormiamo, sia che siamo svegli, il tempo scorre uniformemente" [I. Barrow: *Lectiones geometricae*].

Per quanto riguarda il concetto di spazio, vi sono due fondamentali vedute. L'una trae origine dalla necessità di considerare un luogo attraverso cui si possa dire che il movimento avviene; tale concezione, detta *posizionale*, presuppone evidentemente l'esistenza dello spazio indipendentemente da quella degli oggetti che in esso possono essere posti: "*grembo in cui nacque il mondo*", secondo la bellissima metafora di Platone. Tale è lo spazio di Newton.

A questa concezione si contrappone una seconda, detta *relazionale*: l'esistenza dello spazio deriva da una rete di oggetti senza i quali esso non esisterebbe. Tale è lo spazio di Aristotele e di Cartesio.

Ora Newton può enunciare le sue leggi (da lui chiamate *assiomi*) del movimento.

I Legge - Ciascun corpo persevera nel proprio stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, eccetto che sia costretto a mutare quello stato da forze impresse

II Legge – Il cambiamento di moto è proporzionale alla forza motrice impressa, ed avviene lungo la linea retta secondo la quale la forza è stata impressa.

III Legge – Ad ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria: ossia le azioni di due corpi sono sempre uguali tra loro e dirette verso parti opposte.

La prima legge del moto.

Quali sono gli elementi di novità apportati da Newton? Il problema del moto interessò già Aristotele e fino ai lavori di Cartesio e di Galileo non vi furono sostanziali modifiche alla Fisica di Aristotele. Soffermiamoci sulla prima legge, da Newton enunciata in latino, lingua capace di rendere meglio della traduzione inglese o di quella in italiano, il suo pensiero:

«Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus a viribus impressis cogitur statum ille mutare».

Ogni parola di questa definizione è importante, sia in sé, sia per Newton, scrittore, è noto, estremamente accurato, capace di scrivere e riscrivere cinque o sei volte lo stesso passo fino ad ottenere una stesura completamente soddisfacente.

Ogni parola è importante, ad esempio «*perseverare*», Newton usa il verbo all'infinito, quasi a voler sottolineare una necessità, come dire “*deve perseverare*” che viene tradotto invece con “*persevera*” o alle volte “*continua*”; traduzione comunque insoddisfacente, in quanto non rende appieno la forza dell'affermazione di Newton.

Qual è il significato di “*in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum*”? Status deriva da *sto, stare* e significa stato, condizione, posizione, tutti termini legati ad una situazione di riposo, di immobilità. Ma allora “*status movendi*” non è forse una contraddizione in termini? Sarebbe come dire “statica del movimento” o “dinamica della quiete”. Qui il pensiero di Newton si discosta dai predecessori; per Newton la quiete ed il moto rettilineo ed uniforme sono due manifestazioni di uno stesso “*status*”; non a caso egli usa la congiunzione “*vel*” e non “*aut*”; infatti “*aut*” è, nel linguaggio della logica, un “*or esclusivo*”, cioè significa “*o l'uno o l'altro*”, non vi sono vie di mezzo; invece “*vel*” corrisponde al semplice “*or*”, che si traduce in “*l'uno, l'altro o entrambi*”. In altre parole la quiete ed il moto rettilineo ed uniforme non si escludono a vicenda: interpretare lo “*status*” è solo questione di sistema di riferimento.

Status di movimento dunque: usando questa espressione Newton implicitamente afferma che il moto non è, come da Aristotele in avanti si era creduto, cioè da circa duemila anni, un processo di mutamento, opposto a quello *status* vero e proprio che è la quiete. Anch'esso è uno *status*, vale a dire qualcosa che, come la quiete, non implica affatto mutamento. Moto e quiete sono, come ho già detto, assegnati da questa parola al medesimo livello di essere, e non più a livelli diversi, come faceva Keplero, paragonando l'uno alle tenebre, l'altra alla luce, «*tenebrae et lux*». Cartesio, dal canto suo, così formula il principio di inerzia: “*ciascun corpo tende a conservare*

lo stato in cui ritrova, e mai lo muta se non per cause esterne: nessun corpo si arresta da se stesso. Il riposo è uno stato contrario al movimento, e nessuna cosa si dirige per natura verso il suo contrario". Adesso il movimento, proprio perché *status*, come la quiete, può perseverare, e i corpi possono rimanere in movimento senza necessità di forze o cause che ve li mantengano: come si conservano in quiete, così perseverano in movimento. È chiaro che questo non poteva essere il comportamento dei corpi finché il movimento veniva considerato un processo di mutamento. Niente muta senza una causa come esplicitamente Newton afferma. Finché s'intese il movimento come processo, la sua conservazione non era concepibile senza un motore. Solo con la concezione del movimento come *status* venne eliminata la necessità di una causa o motore. Dobbiamo però precisare: non ogni tipo di movimento può essere concepito come *status*, ma solamente quel movimento che si svolge uniformemente e in linea retta, *in directum*, vale a dire nella medesima direzione e con la medesima velocità. Nessun altro tipo di movimento, né quello circolare, né quello rotatorio, anche quando fosse uniforme, può essere considerato come *status*, per quanto il movimento rotatorio sembri capace di conservarsi addirittura più a lungo di quello rettilineo, che, almeno nella nostra esperienza, si estingue sempre piuttosto rapidamente. Già molti secoli prima i Greci avevano osservato che l'unico moto perpetuo che si incontra in questo mondo è il moto circolare del cielo.

I Greci, per di più, pensavano che il moto circolare fosse l'unico realmente uniforme e permanente e non ritennero perpetuo nessun altro tipo di movimento. Ma il loro mondo, era un mondo di dimensioni finite, e come avrebbero potuto arrivare ad una legge che postula un mondo infinito? E questo non va dimenticato se non si vuole correre il rischio di essere ingiusti verso quanti non furono in grado di sostituire al circolo la linea retta.

Anche il grande Galileo, in fondo, fu tra questi. Distrusse, è vero - e fu suo grande merito - la concezione scolastico-aristotelica del movimento come processo, affermandone la perpetua conservazione; affermò, cioè, che un corpo, una volta in movimento, continua a muoversi all'infinito né mai rallenta, né mai si arresta, a meno che, naturalmente, non incontri resistenze contrarie. Ma anch'egli ritenne questa conservazione propria del movimento circolare, eterno movimento dei corpi celesti e della terra. Quanto al moto rettilineo Galileo non parlò mai di moto in linea retta; ma piuttosto di moto orizzontale o moto su un piano orizzontale: *"Imagino un mobile lanciato su un piano orizzontale e rimosso ogni impedimento: già sappiamo che il moto si svolgerà equabile e perpetuo sul medesimo piano, qualora questo si estenda all'infinito"*.

La seconda legge del moto.

Qui Newton precisa la relazione esistente tra causa (la forza impressa), e l'effetto (la variazione di velocità). Oggi diciamo che la accelerazione, cioè la variazione di velocità, è direttamente proporzionale alla forza impressa ed inversamente proporzionale alla massa. Newton sostituisce all'impulso dei cartesiani la forza come causa della variazione di velocità. È evidente a questo la necessità di postulare l'esistenza di un tempo e di uno spazio assoluti; ed invero, se non esistessero un tempo ed uno spazio assoluti, come si potrebbe parlare di perseveranza di uno stato di quiete o di moto? O di moto rettilineo? E come si spiega che in alcuni sistemi di riferimento il principio di inerzia sembra non essere rispettato? È a tutti noto, ad esempio, che se ci troviamo in un vagone in moto rettilineo ed uniforme, nessuna esperienza all'interno del vagone ci permette di riconoscere lo stato di quiete o di moto dello stesso; ad esempio se lasciamo cadere un oggetto, esso cade ai nostri piedi lungo la verticale condotta per il punto di lancio, esattamente come se ci trovassimo a terra (*relatività galileiana*). Ma se il vagone improvvisamente rallenta, noi ci sentiamo spinti in avanti, e tutti gli oggetti non vincolati si spostano in avanti. Qual è, in questo caso, la forza che ci sollecita? La risposta di Newton è che in questi sistemi agiscono delle forze che non sono dovute all'azione di altri corpi ma solo alla circostanza che il sistema di riferimento considerato non è solidale con lo spazio assoluto, e tali forze si dicono "**apparenti**". D'altra parte come si potrebbero enunciare le leggi del movimento in un sistema di riferimento in cui gli oggetti, all'improvviso, possono mettersi in moto in una direzione qualsiasi?

Perciò diremo inerziale un S.C. in cui gli oggetti in quiete non si spostano se non a causa dell'intervento di una forza esterna; questo S.C. è solidale con lo spazio assoluto; ma è inerziale anche qualunque altro S.C. in moto rettilineo ed uniforme rispetto ad un sistema inerziale.

Ma come è possibile distinguere un moto assoluto nel mezzo di una moltitudine di moti relativi che ci circondano? Lo stesso Newton riconosce la difficoltà dell'impresa, perciò egli si sente obbligato a fornire un criterio per riconoscere i moti assoluti di rotazione (esperimento dello secchio rotante); data l'importanza di questo argomento, riportiamo le parole di Newton:

Gli effetti che distinguono il moto assoluto dal moto relativo sono le forze di recessione dall'asse del moto circolare: in un moto circolare soltanto relativo non vi sono tali forze, mentre sono più o meno grandi, a seconda della quantità di moto, in un moto circolare vero e assoluto.

Prendiamo un recipiente attaccato ad una lunga corda; facciamolo ruotare, tanto che la corda si attorcigli strettamente; poi riempiamolo d'acqua e teniamolo fermo. Avvenga poi, per l'improvvisa azione di un'altra

forza, che il recipiente ruoti nel verso contrario e che, mentre la corda si svolge, il moto continui per qualche tempo. La superficie dell'acqua all'inizio rimarrà liscia, come prima che il recipiente cominciasse a muoversi; ma poi il recipiente comunicherà gradualmente il suo movimento all'acqua, che comincerà a girare sensibilmente, a recedere a poco a poco dal centro, a sollevarsi ai lati del recipiente, assumendo una forma concava (come ho sperimentato); e quanto più veloce diventerà il movimento tanto più in alto salirà l'acqua, finché, compiendo le sue rivoluzioni nel tempo stesso del recipiente, verrà ad essere ferma rispetto ad esso.

Questa ascesa dell'acqua mostra lo sforzo per recedere dall'asse del suo moto; e il moto circolare vero e assoluto dell'acqua, che è qui contrario al relativo, si rivela e può essere misurato dallo sforzo stesso. Da prima, quando il moto relativo dell'acqua nel recipiente era massimo non produceva sforzo di recessione dall'asse; l'acqua non mostrava di tendere verso la circonferenza e non si verificava nessuna salita verso i fianchi del recipiente, ma rimaneva a superficie piana, e perciò il suo vero moto circolare non era ancora cominciato. Ma successivamente, quando il moto relativo dell'acqua era diminuito, l'ascesa di essa verso i fianchi del recipiente provava il suo sforzo per recedere dall'asse, e questo sforzo mostrava che il reale moto circolare dell'acqua andava continuamente aumentando fino a raggiungere il massimo, nel momento in cui l'acqua restava ferma in relazione al recipiente.

Il moto assoluto dunque può essere individuato dalla misura delle forze di recessione dall'asse del moto circolare che agiscono sull'acqua nel momento in cui la rotazione dell'acqua è solidale con quella del secchio. Analogamente possiamo misurare il moto di rotazione assoluta della Terra dall'accelerazione (di *Coriolis*) del pendolo di Foucault. Il pendolo di Foucault consiste in un grave sospeso in modo da essere libero di oscillare in tutte le direzioni. Per semplificare, immaginiamo che tale pendolo si trovi ad uno dei poli - a una latitudine diversa avrà un movimento più complesso, ma il principio non cambia. Dato che il pendolo è sospeso a un giunto universale, il piano del suo movimento rimane fisso nello spazio assoluto, mentre la terra gli ruota al disotto.

Ad un osservatore posto sulla terra sembrerà che il piano di oscillazione del pendolo compia un giro ogni 24 ore; questo moto del piano di oscillazione del pendolo può quindi essere attribuito all'azione esercitata su di esso dalla forza di Coriolis (la forza di Coriolis è una forza che si manifesta quando un corpo si muove dal polo all'equatore).

La III legge del moto

La terza legge, nota anche come principio di azione e reazione, fu già anticipata da Cartesio ne *Il mondo*, in questi termini:

Come seconda regola, suppongo che quando un corpo ne spinge un altro non può trasmettere o sottrarre ad esso alcun movimento senza perderne o acquistarne nello stesso tempo una eguale quantità.

Naturalmente dove Cartesio parla di “*quantità di movimento*”, Newton parla di “*forza*”. Occorre precisare comunque che Cartesio non aveva chiaro il concetto di quantità di materia e quindi la sua “*quantità di movimento*” non era misurabile. La formulazione di Newton è quindi più razionale, in quanto le grandezze sono misurabili. Occorre precisare, a proposito di questa legge, che azione e reazione non sono mai applicate ad uno stesso corpo, ed infatti, se così fosse, non sarebbe possibile alcun movimento o tutti i movimenti sarebbero rettilinei ed uniformi.

La meccanica di Newton, pur nella sua perfezione formale, non è esente da critiche, ed infatti già i suoi contemporanei sollevarono seri dubbi. Il punto più vulnerabile riguarda il concetto di spazio assoluto e quindi il ragionamento sull'esperimento del secchio rotante (la critica al concetto di tempo assoluto viene invece mossa circa centocinquanta anni dopo). Esiste davvero uno spazio assoluto? Uno spazio cioè in cui uno o più corpi sono fermi e tutti gli altri in movimento? E non è forse un circolo vizioso affermare che lo spazio assoluto è lo spazio nel quale è rispettato il principio di inerzia, per poi affermare che il principio di inerzia vale nello spazio assoluto?

La critica più importante, per le sue implicazioni filosofiche, è del vescovo anglicano G. Berkeley. Berkeley critica il concetto di spazio assoluto e quindi di moto assoluto; ritiene poco convincente l'esperimento del secchio rotante proposto da Newton come criterio di misura dei moti assoluti. Berkeley si oppone all'idea di spazio assoluto in quanto esso non è identificabile; il moto relativo dell'acqua nel secchio non è più importante del moto relativo dell'acqua e di altri oggetti compreso lo stesso secchio, in quanto questo serve solo come contenitore. Ciò che dall'esperimento si dovrebbe dedurre è che le forze centrifughe appaiono solo quando un corpo ruota "*rispetto alle stelle*":

Se supponiamo che tutto si annulli eccetto un globo, è impossibile immaginare un qualsiasi movimento di tale globo. Consideriamo ora che i globi siano due, e che oltre ad essi non esista alcun'altra cosa materiale: il moto circolare di questi globi attorno al loro centro comune non può essere immaginato. Ma ammettiamo che venga improvvisamente creato il cielo delle stelle fisse: saremo allora in condizione di immaginare il moto dei globi per mezzo della loro posizione relativa alle varie parti del cielo.

Berkeley dimostra così di precedere i suoi tempi di molti anni: il riferimento alle stelle fisse fu infatti ripreso e continuato, 150 anni dopo, dal fisico austriaco E. Mach.

Il contributo di Mach.

Mach rielabora quanto affermato da Berkeley, e la sua importanza risiede principalmente nel fatto che egli suscitò una ripresa della discussione del problema in un periodo in cui l'autorità di Newton era assoluta. Nel 1872 Mach scrisse:

Secondo me esistono solo moti relativi... Quando un corpo ruota rispetto alle stelle fisse, si producono forze centrifughe; quando ruota rispetto ad un altro corpo e non in relazione alle stelle fisse, non si producono forze centrifughe. Non ho nulla in contrario a chiamare rotazione la prima, purché ci si ricordi che è una rotazione relativa rispetto alle stelle fisse.

E ancora:

Ovviamente non ha importanza se noi pensiamo che sia la terra a ruotare attorno al suo asse o che essa sia ferma mentre le stelle fisse le girano intorno. Da un punto di vista geometrico in tutti e due i casi si tratta di un moto relativo della terra e delle stelle l'una rispetto alle altre. Ma se ammettiamo che la terra sia ferma e che le stelle le girino intorno, non c'è schiacciamento della terra, non c'è esperienza del pendolo di Foucault, e così via. Ora, possiamo superare questa difficoltà in due modi: o ogni moto è assoluto, o la nostra legge d'inerzia è formulata in modo sbagliato. Io preferisco la seconda soluzione. La legge d'inerzia deve essere concepita in modo da portare allo stesso risultato sia nella prima sia nella seconda ipotesi. È perciò evidente che nella sua formulazione bisogna tener presenti le masse dell'universo.

In conclusione, secondo Mach, i sistemi inerziali sono quelli che non sono accelerati rispetto alle stelle fisse, cioè rispetto ad una media, convenientemente definita, di tutta la materia dell'universo. **La materia ha una inerzia solo perché esiste altra materia nell'universo.** Queste affermazioni, di enorme importanza nella fisica moderna, verranno da Einstein chiamate "*principio di Mach*".

Malgrado la fondatezza di queste obiezioni, la cui importanza non sarà del tutto chiara fino alla comparsa di A. Einstein, circa duecento anni dopo, a Newton va riconosciuto comunque il merito di avere formulato per la prima volta in maniera razionale e formalmente corretta i principi del moto; una formulazione nella quale compaiono relazioni matematiche tra grandezze misurabili, e quindi riesce a chiarire il rapporto tra causa ed effetto. In effetti la cosiddetta *fisica classica*, nata con Galileo e completata da Newton, rappresenta una valida approssimazione delle leggi del moto

almeno fino a quando le velocità prese in considerazione sono piccole rispetto alla velocità della luce. Allorquando le velocità dei corpi diventano confrontabili con quella della luce, l'approssimazione non regge più ed occorre formulare una nuova dinamica, la *dinamica relativistica*; ma questo non significa che Newton debba essere accantonato, la sua dinamica riesce a dare una spiegazione semplice e completa di tutti i fenomeni che incontriamo nella vita di ogni giorno. Al contrario, i fenomeni che hanno portato a sviluppare la teoria della relatività, sono fenomeni con cui ben pochi di noi hanno avuto a che fare, e le previsioni di questa teoria sono spesso in contrasto con la nostra esperienza quotidiana. Ad ogni modo la dinamica relativistica è un ampliamento della dinamica newtoniana in quanto la include come caso particolare. D'altro lato nelle scuole si continua ad insegnare la meccanica di Newton che, malgrado i suoi limiti, ha consentito il lancio dei satelliti artificiali ed il viaggio verso altri pianeti. Le previsioni di Newton su questo punto si sono dimostrate quindi esatte.

Germano Germani

Bibliografia:

- I. Newton: *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* – Utet Torino, a cura di Alberto Pala
- II. Cartesio: *Principia Philosophiae*, parte II
- III. G. Galilei: *Discorso sopra due nuove scienze* – Utet Torino
- IV. A. Koyré: *Studi newtoniani* – Einaudi Editore Torino 1972
- V. D. W. Sciama: *L'unità dell'universo* – Einaudi Editore Torino 1965
- VI. Landau-Kitaigorodskij: *La fisica per tutti* – Editori Riuniti Roma 1969
- VII. G. Berkeley: *Trattato sui principi della conoscenza umana*
- VIII. E. Mach: *La Meccanica nel suo sviluppo storico-critico* – Boringhieri Torino 1969

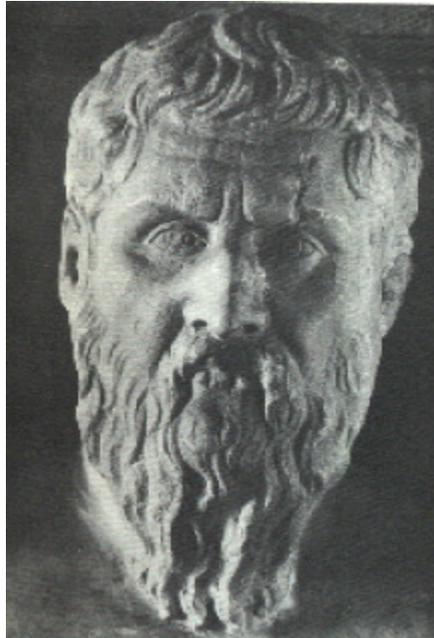


Figura 1: Platone (428-347), filosofo greco nato ad Atene. Per Platone la conoscenza è "reminiscenza", ricordo di ciò che l'anima ha visto nella sua esistenza precedente.

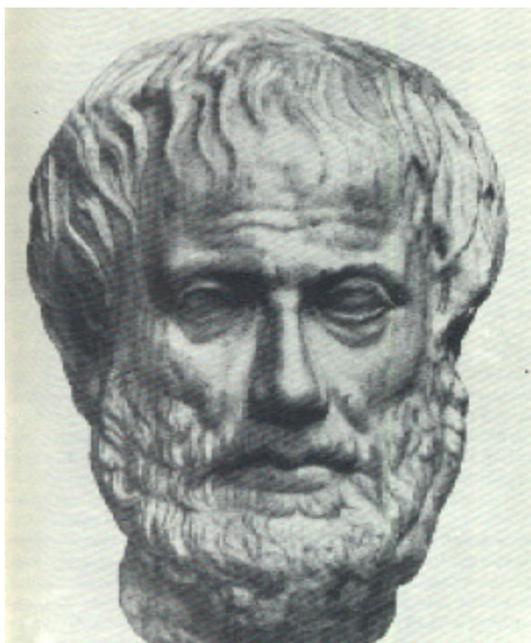


Figura 2: Aristotele (384-322), filosofo greco nato a Stagira, fu discepolo di Platone e precettore di Alessandro Magno. Fu tra i più grandi filosofi della tradizione occidentale.

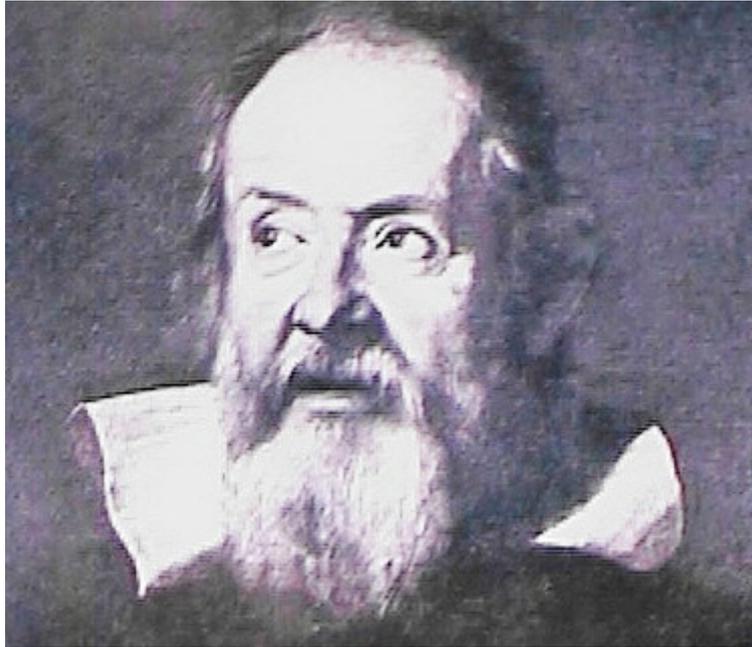


Figura 3: Galileo Galilei (1564-1642), grande filosofo e fisico, padre del metodo sperimentale e iniziatore della fisica moderna.



Figura 4: Cartesio (1596-1650), filosofo e matematico francese, ideatore della Geometria analitica.

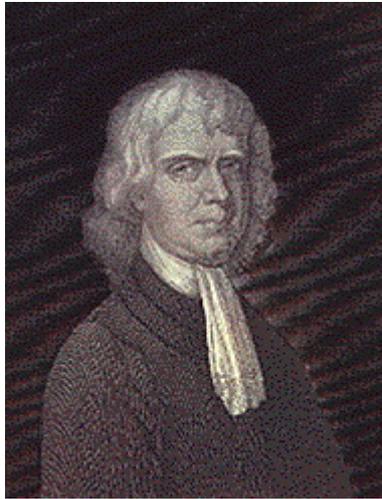
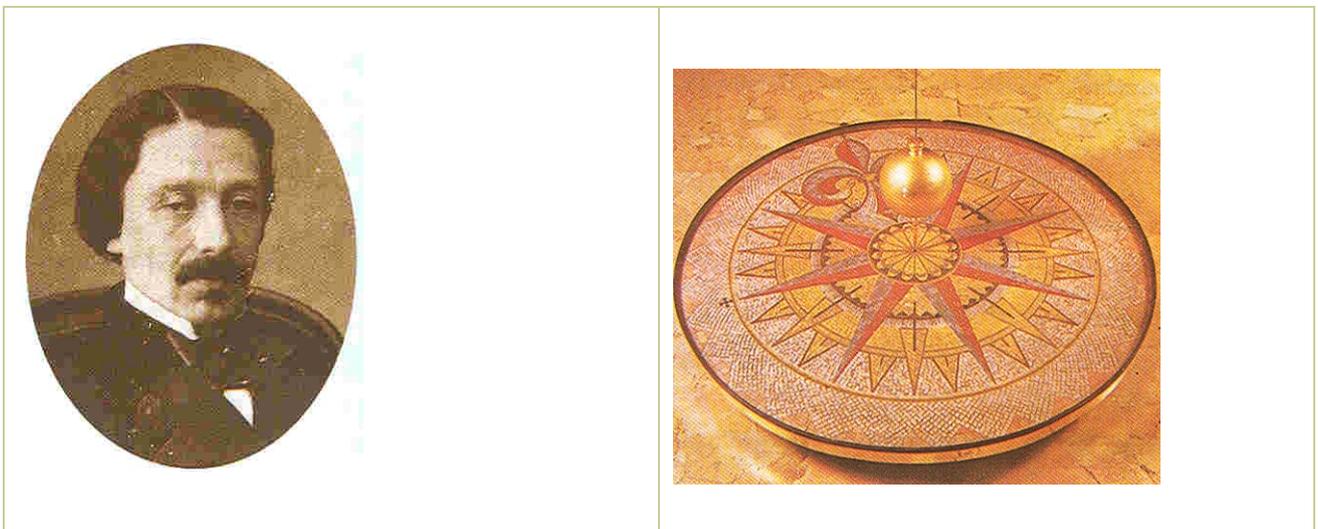


Figura 5: Isaac Newton (1642-1727), matematico, fisico e astronomo inglese, lasciò studi fondamentali di meccanica e ottica. Sua è la legge della gravitazione universale.



Figura 6: Ernst Mach (1838-1916), fisico e filosofo austriaco, è considerato tra i massimi rappresentanti dell'empiricriticismo e padre della moderna epistemologia.



Il fisico francese Léon Foucault (1819 – 1868) ed il suo pendolo .

Nel 1851 Foucault eseguì nel Pantheon di Parigi un celebre esperimento con il quale dimostrò che la terra è sottoposta ad una rotazione attorno al proprio asse .

Ai poli , il piano di oscillazione di un pendolo , ruota , rispetto alla Terra , in verso opposto a quello della rotazione terrestre e con la stessa velocità angolare . Esso rimane fisso rispetto ad un sistema di riferimento inerziale

.All'equatore le oscillazioni di un pendolo avvengono , per un osservatore terrestre , sempre nello stesso piano .