

PER SAPERNE DI PIÙ

Inerzia Inertia

Alessandro Bettini (*)

*Dipartimento di Fisica e Astronomia “G. Galilei”, Università di Padova e
INFN-Sezione di Padova, Padova, Italia*

Riassunto. La parola *inerzia* compare in fisica in diversi concetti. Mi limiterò qui alla storia della *legge*, o *principio*, di inerzia, come fisico, che non è uno storico. Cercherò di chiarirne la storia con le parole degli autori rilevanti sino alla scoperta di G. Galilei e la formalizzazione, e primo uso della parola, da parte di Newton. Considererò gli atomisti greci, T. Digges, G. Bruno, P. Gassend, R. Descartes e C. Huygens. Queste letture mostrano, in particolare, come l’attribuzione a Galilei della cosiddetta inerzia circolare invece che rettilinea sia un falso storico.

Abstract. The word *inertia* appears in several physics concepts. I shall limit the discussion to the history of the inertia *law*, or inertia *principle*, as seen by a physicist that is not a historian. I shall try to elucidate the development with the words of the relevant authors, up to the discovery by G. Galilei and the formalisation, and first use of the word, by I. Newton. I shall consider the Greek atomists, T. Digges, G. Bruno, P. Gassend, R. Descartes and C. Huygens. This reading shows, in particular, that the claim that Galilei discovered the circular rather than linear inertia is historically false.

1. Introduzione

Per una persona, l’inerzia è una forma di pigrizia, fisica o mentale, il che non è certo un pregio. Nella storia, paradossalmente, fu proprio la scoperta di Galilei della *legge di inerzia* che sbloccò l’inerzia, appunto, nella quale lo sviluppo della fisica era rimasto, fermo da secoli nei dogmi aristotelici, aprendo così la via alla scienza moderna. In considerazione della sua importanza, la legge viene spesso anche chiamata *principio di inerzia*. La parola *inerzia* in fisica compare per la prima volta in Newton, e da qui inizierò, per tornare poi ai precedenti storici.

(*) E-mail: bettini@pd.infn.it

Per essere un precedente significativo non basta una frase corretta, ma che sia puramente descrittiva. Essa invece, deve far parte di una struttura logica supportata da prove sperimentali. Un esempio al limite si trova citato nella monumentale storia della scienza cinese di J. Needham [1]. L'autore, dopo aver dichiarato che lo studio del moto è sostanzialmente assente dalla fisica cinese, cita dal Canone Moista del IV secolo a.C., cioè al tempo di Aristotele, le frasi [tra parentesi sue interpolazioni interpretative]

La cessazione del moto è dovuta alla [forza contraria] di un “supporto”

Se non c'è [la forza contraria] di un “supporto” il moto non finisce mai. Questo è vero come che un bue non è un cavallo.

Letteralmente sembra la legge di inerzia, ma ovviamente non lo è, non essendo inserita in una teoria fisica e non avendo neppure stimolato la nascita di una teoria. Vedremo altri esempi simili, di precedenti non realmente tali, ma spesso citati come se lo fossero.

Per definire una grandezza fisica dobbiamo saperne le proprietà, cioè conoscere almeno alcune leggi che la riguardano. Ma per trovare queste leggi dobbiamo avere una qualche definizione della grandezza stessa. Trovato qualcosa, precisiamo la definizione. Critici pedanti hanno parlato e parlano di circolarità delle definizioni, ma è invece una spirale che si allarga. Ciò è stato imputato anche a quelle di Newton di massa, forza e inerzia.

Sul principio di inerzia si è molto scritto da parte di storici, epistemologi e filosofi. La breve storia in quest'articolo è invece raccontata da un fisico. Nel preparare i corsi di lezione, ho imparato che conviene sempre leggere le fonti originali, sia perché il processo storico insegna anche sui contenuti, sia perché abbastanza frequentemente succede che ci sia stato chi, riferendone, abbia inconsciamente o deliberatamente alterato gli originali e che il risultato sia stato riprodotto nei testi successivi. Questa sfortuna accadde, segnatamente, a Galileo Galilei.

2. Isaac Newton

Nei *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, per brevità i *Principia* (prima edizione 1687), Newton (1643-1727), per prima cosa, scrive le definizioni dei concetti fondamentali, otto in totale, seguite ciascuna da un breve commento. La prima è quella della *quantitas materiae*, che Newton chiama indifferentemente sia *massa* sia *corpus*, e che noi chiamiamo massa; la seconda è quella della *quantitas motus*, che noi chiamiamo ancora così, il prodotto di massa e velocità. La terza definizione riguarda, appunto, l'inerzia (fig. 1).

Materiae vis insita est potentia resistendi, qua corpus unumquodque, quantum in se est, perseverat in statu suo vel quiescendi vel movendi uniformiter in directum [2].

La forza insita della materia è la sua capacità di resistere, grazie alla quale qualsiasi corpo, in quanto tale, permane nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme.

Def. III.

Materiæ vis insita est potentia resistendi, qua corpus unumquodq; quantum in se est, perseverat in statu suo vel quiescendi vel movendi uniformiter in directum.

Hæc semper proportionalis est suo corpori, neq; differt quicquam ab inertia Maffæ, nisi in modo concipiendi. Per inertiam materiæ fit ut corpus omne de statu suo vel quiescendi vel movendi difficulter deturbetur. Unde etiam vis insita nomine significantissimo vis inertiae dici possit. Exercet vero corpus hanc vim solum-

Fig. 1. – Da Newton, i *Principia*.

Nella forma, si possono notare due cose. Newton usa, qui e altrove, la parola *vis* cioè forza, in senso molto più ampio, e meno definito, di quello che facciamo noi. Chiamerà, nella quarta definizione, *vis impressa* la nostra “forza”. In secondo luogo, la definizione anticipa la prima legge. I pedanti, come già ricordato, qui e altrove, accusano Newton di circolarità.

Newton fa seguire il commento, dove compare la parola *inertia*.

Questa [la *vis insita*] è sempre proporzionale alla sua massa; e non differisce per nulla dall’inattività della massa, se non nel modo in cui la concepiamo. A causa dell’inerzia (*Per inertiam*) della materia, accade che un qualsiasi corpo difficilmente lasci il suo stato di quiete o di moto. Ne segue che la forza insita (*vis insita*) può, con massimo di significato, essere chiamata forza di inerzia (*vis inertiae*)

Nella sezione successiva, Newton esprime le tre leggi, assunte come assiomi, e alcuni corollari. Non usa formule, ma parole. Richiamo la prima, che interessa qui.

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

Ogni corpo continua nel suo stato di quiete, o di moto uniforme in linea retta, a meno che non sia costretto a mutarlo da forze su di esso impresse.

Poi esemplifica.

I proiettili continuano nel loro moto, nella misura in cui non sono ritardati dalla resistenza dell’aria, o spinti in giù dalla forza di gravità. Una trottola, le cui parti, essendo coese, si detraggono costantemente dal moto rettilineo, non cessa di ruotare se non per quanto ritardata dall’aria. Mentre i corpi dei pianeti e delle comete, essendo di dimensioni maggiori, conservano più a lungo i loro moti progressivi e circolari in spazi con minor resistenza [3].

Oggi non faremmo a lezione esempi come quelli della trottola e dei pianeti in considerazione della circolarità dei loro moti. Ma, nella sostanza, Newton è chiaro, gli impedimenti all’osservazione della legge sono due: le resistenze passive e il peso. Ma, come vedremo, passaggi analoghi in Galilei furono addotti a pretesto per negare la sua

scoperta della legge di inerzia. Alexandre Koyré (1892-1964) [4] inventò addirittura il termine di inerzia circolare, che ebbe molto successo tra i detrattori di Galilei, anche nostrani. Newton però non ne fu accusato.

Seguono la seconda e la terza legge e sei corollari. I primi due sono la legge della composizione dei moti e quella della composizione delle forze. Nello scolio che segue, Newton riconosce a Galilei la scoperta delle prime due leggi e dei primi due corollari.

Sinora ho esposto i principi così come li ho ricevuti da matematici, e come confermati da molteplici esperimenti. Con le prime due leggi e i primi due corollari, Galilei stabilì che la discesa dei corpi è in ragione del tempo al quadrato e il moto dei proiettili avviene secondo una parabola, in accordo con l'esperienza, se non per quanto questi moti sono un po' ritardati dalla resistenza dell'aria [5].

Non ritiene siano necessari nuovi esperimenti a dimostrazione, in aggiunta a quelli di Galilei, Huygens e successori, e passa direttamente a descrivere quelli che invece fece lui stesso per dimostrare la terza legge. Mentre Newton quindi, che certo non era facile a riconoscere i contributi di altri, dà pieno credito a Galilei delle scoperte, questo non sempre avverrà nella letteratura successiva.

Newton dà alla legge di inerzia il rilievo di un principio fondante. E certamente lo è, anche se potrebbe sembrare che esso sia una conseguenza della seconda legge, argomentando che se la forza è nulla, l'accelerazione è nulla e la velocità è costante. Ma conseguenza non è perché, come insegniamo nei nostri corsi, le leggi valgono in un *sistema di riferimento inerziale*, e questo è definito come uno in cui vale la legge di inerzia, appunto. Possiamo infatti osservare accelerazioni non nulle in assenza di sorgenti di forze. Significa che non siamo in un riferimento inerziale.

La legge di inerzia è strettamente correlata al principio di relatività, anch'esso stabilito da Galilei, e del quale, una volta di più, egli verrà espropriato nella letteratura successiva, sino ai giorni nostri. Il termine *principio di relatività* sarà introdotto nel 1904 da Henri Poincaré nella memoria in cui lo formulò esattamente [6], dopo una pluriennale critica, in particolare, della misura del tempo [7]. Newton qui lo espone, senza dargli un nome, tra i corollari, come Corollario V.

Il moto dei corpi che stiano nel medesimo dato spazio [cioè in un certo riferimento comune] sono relativi tra di loro, sia che lo spazio [il riferimento] sia a riposo sia che si muova uniformemente in linea retta senza alcun moto circolare.

Segue la dimostrazione, come conseguenza della seconda legge, concludendo con:

Tutto questo è provato da un esperimento illuminante. Tutti i moti fatti su di una nave avvengono nello stesso modo, sia che la nave stia ferma, sia che si muova uniformemente in linea retta [8].

Per Newton quindi il principio di relatività non è un assioma indipendente, ma una conseguenza delle leggi del moto. Come tale è limitato alla meccanica. Galilei l'aveva invece proposto in tutta generalità.

Veniamo ora alla storia che condusse alla scoperta della legge di inerzia. Essa è in completo contrasto con la fisica aristotelica e lo stabilirla ne segnò la fine. Il grande filosofo pretendeva di conoscere, in base al ragionamento a priori, cosa fosse

“naturale” e cosa no, vizio non ancora scomparso ai nostri giorni. Per i corpi “gravi” è naturale muoversi verso il centro della Terra, per i “leggeri” di farlo verso la sfera della Luna. Non è naturale per un corpo muoversi con velocità costante. Se lo fa, deve agire su di esso una forza, proporzionale alla velocità. Le forze agiscono solo per contatto. Una freccia, ad esempio, è spinta da dietro dal mezzo in cui si muove. L’ipotesi dei pitagorici che la Terra ruoti su sé stessa e attorno al centro del sistema deve essere respinta perché, se si muovesse così velocemente, specie nel moto diurno, le pietre non cadrebbero verticalmente verso il loro luogo naturale, il centro della Terra, ma rimarrebbero indietro, le nuvole si vedrebbero viaggiare velocemente verso ovest, e così via.

3. Atomi e vuoto

La legge di inerzia implica che un corpo possa muoversi anche nel vuoto con velocità non nulla, eternamente. Questi concetti furono ipotizzati già nel V secolo a. C. da Leucippo e dal suo discepolo Democrito. In risposta alla scuola eleatica e ai paradossi sul moto di Zenone, essi affrontarono il problema del continuo. Se prendo un pezzo di legno e lo divido in due, ho due pezzi di legno. Se taglio uno dei due, ottengo ancora due pezzi di legno, più piccoli. La domanda è: posso continuare a dividere all’infinito ed ottenere sempre pezzi della stessa materia? A quei filosofi parve che la risposta dovesse essere negativa. La materia è fatta di particelle che non sono divisibili, atomi appunto (attenzione, a essere granulare è la materia, non lo spazio). Questi sono piccolissimi e invisibili e si muovono continuamente nello spazio vuoto. Essi interagiscono solo quando entrano in contatto tra loro. L’ipotesi che il vuoto esista non è banale, perché il vuoto era concepito come il nulla, ciò che “non è”. Come può il non essere?

Di Leucippo non ci è rimasto nulla, di Democrito qualche frammento.

Per convenzione è il dolce, per convenzione l’amaro, per convenzione il caldo, per convenzione il freddo e per convenzione il colore; in realtà ci sono solo gli atomi e il vuoto [9].

Tra le fonti indirette la più vicina è Aristotele. Questi ci dice che Leucippo sostiene che l’entità fondamentale esiste, ma non è una sola, sono invece gli atomi che (parentesi sue)

sono in numero infinito, e sono invisibili a causa della piccolezza delle particelle. Si muovono nel vuoto (perché il vuoto c’è — *κενὸν γὰρ εἶναι*), e quando si mettono insieme causano la creazione e quando si separano causano la dissoluzione. Hanno un effetto e subiscono un effetto quando vengono in contatto (il contatto non li rende uno), ma quando sono composti e connessi assieme creano qualche cosa [10].

Gli atomi quindi, tra un urto e l’altro, si muovono, con velocità finita, nel vuoto. Non sappiamo se gli atomisti considerassero questa velocità costante, ma certo pensavano il moto continuo ed eterno. Scriverà Aezio fiorito nel I o II secolo d. C.

Democrito dice che i corpi primari (cioè gli atomi solidi) non hanno peso, ma si muovono all'infinito come urtandosi a vicenda [11].

Leucippo e Democrito non potevano certo controllare sperimentalmente le loro ipotesi. Ma quando questo sarà possibile, 22 secoli dopo, a partire dalle scoperte di John Dalton (1766-1844) e Amedeo Avogadro (1776-1856), si troverà che gli atomi esistono davvero e che hanno molte, anche se non tutte, le caratteristiche ipotizzate dagli atomisti greci. Pura fortuna?

Aristotele, in contrasto, si oppose alla possibilità stessa che il vuoto esista, con argomenti che riteneva essere logici, anche se a leggerli oggi non sembrano tali. Nonostante la sua influenza però, l'ipotesi del vuoto, degli atomi e del loro moto rimarrà viva nella cultura greca e in quella romana, segnatamente nella filosofia di Epicuro (342-270 a. C.) e nella poesia, il *De rerum natura*, di Tito Lucrezio Caro (I secolo a. C.). Rimarrà viva anche nel medioevo sia nelle filosofie arabe sia in quelle occidentali. Sarà ripresa da Galilei ⁽¹⁾, inizialmente come congettura coerente con la sua conclusione sperimentale che la forma e le dimensioni di un corpo non hanno alcun ruolo nel galleggiamento o affondamento di un solido in un liquido [12]. Egli sviluppò ulteriormente il suo "atomismo" ne *Il saggiatore* [13] e ne *Le nuove scienze* [14], come descrizione matematicamente necessaria della struttura della materia, pur cosciente dell'impossibilità di verifiche sperimentali con i mezzi dell'epoca. Con questo rischio molto, perché l'atomismo era considerato un'eresia, più grave della mobilità della Terra, in quanto in possibile contrasto con la transustanziazione dell'eucarestia [15].

4. Thomas Digges

Tentativi di superare le teorie aristoteliche del moto furono sviluppati nel medioevo. Già nel VI secolo, il filosofo bizantino di Alessandria, Giovanni Filopono (c. 490-570) nei suoi *Commentari* alla *Fisica* di Aristotele ragionò che il mezzo in cui un mobile si muove non può essere la causa del suo moto e avanzò l'idea che un proiettile si muova per aver ricevuto un impulso iniziale, dalla mano o dall'arco, che poi gradualmente si esaurisce. Questi concetti furono sviluppati nella teoria dell'*impeto*, di Juan Buridan, italianizzato in Giovanni Buridano (c. 1300-1361), che fu rettore a Parigi. L'impeto iniziale di un proiettile non si riduce spontaneamente, ma a causa del mezzo esterno, la resistenza dell'aria. Il proiettile una volta lanciato, scrive, continua a muoversi

fino a che il suo impeto rimane più forte della resistenza, e continuerebbe all'infinito se non fosse diminuito e corrotto da una forza contraria resistente o da qualche agente che lo costringesse ad un moto contrario [16].

⁽¹⁾ Per tutte le citazioni di Galilei mi riferirò a *Le Opere di Galileo Galilei*, a cura di A. FAVERO, edizione Nazionale (Barbera, Firenze) 1890-1909, indicando con E. N., n. Vol, n. pag. In rete a <http://gallica.bnf.fr/services/engine/search/sru?operation=searchRetrieve&version=1.2&collapsing=disabled&rk=85837;2&query=%28gallica%20all%20%22galileo%22%29%20and%20dc.relation%20all%20%22cb304760526%22>.

Però né Buridan né la sua scuola si allontanarono dalla fisica aristotelica, limitandosi a un tentativo di superarne le più evidenti contraddizioni con i fatti.

Thomas Digges (1546-1595) fu matematico, astronomo e comandante militare inglese. Fu uno dei primi sostenitori del modello Pitagorico-Copernicano ⁽²⁾. Egli fu apparentemente il primo a parlare, nel 1576, della caduta verticale di un peso dall'albero di una nave, ma il suo ragionamento è viziato, dal concetto ancora aristotelico, di moto misto.

E quanto alle cose che ascendono o discendono relativamente al mondo [*cioè la Terra*], dobbiamo ammettere abbiano un moto misto, di rettilineo e circolare, benché sembri a noi dritto, non altrimenti che se in una nave a vela un uomo lasciasse cadere un piombo lungo l'albero giù sino al ponte. Questo piombo, muovendosi sempre dritto lungo l'albero, sembra anche cadere in linea retta, ma una volta analizzato dalla ragione, il suo moto è un giusto misto di dritto e circolare [17].

5. Copernico, Brahe, Kepler

I grandi astronomi che crearono l'astronomia moderna, aprendo la via alla meccanica di Galilei e Newton, non contribuirono alla legge di inerzia. Mi limito a brevi cenni.

Nikolaj Kopernik (1473-1543), col suo modello, ripropose la mobilità della Terra, che era stata sì dei Pitagorici, di Aristarco ed altri, ma da secoli considerata in contrasto col dogma dominante aristotelico. Tuttavia, il suo modello è un sistema di sfere rigide che trasportano i pianeti, come per Aristotele, con centro nei pressi del Sole invece che sulla Terra. Apoditticamente afferma che: *il moto dei corpi celesti è circolare, poiché il moto appropriato ad una sfera è il girare circolarmente*. È molto lontano dalla fisica.

Tycho Brahe (1546-1601) fece un balzo in avanti migliorando di un ordine di grandezza la precisione delle misure, elemento che sarà necessario a Kepler per scoprire che le orbite sono ellittiche. La sua misura delle traiettorie delle comete distrusse le sfere di Aristotele, quella della parallasse di Marte il modello di Tolomeo. Brahe però rifiutò anche la mobilità della Terra (oltre che per evitare problemi con i luterani ⁽³⁾), perché ritenne che i diametri delle stelle viste ad occhio nudo fossero reali, invece che, come sono, un'illusione ottica. Non avendo osservato alcuna precessione annuale concluse che, se la Terra si fosse mossa, le stelle sarebbero tanto lontane da dover essere enormi, troppo grandi perché potesse essere vero.

⁽²⁾ Al link in [17] si noti la figura del suo modello del cosmo. Per la prima volta la sfera delle fisse è dissolta nelle stelle a diverse distanze.

⁽³⁾ La condanna di Copernico da parte di Lutero fu immediata, nel 1537, addirittura prima della pubblicazione del *De Revolutionibus*, seguita a breve da quella del libro da parte di Calvino; quella cattolica fu molto posteriore, del 1616.

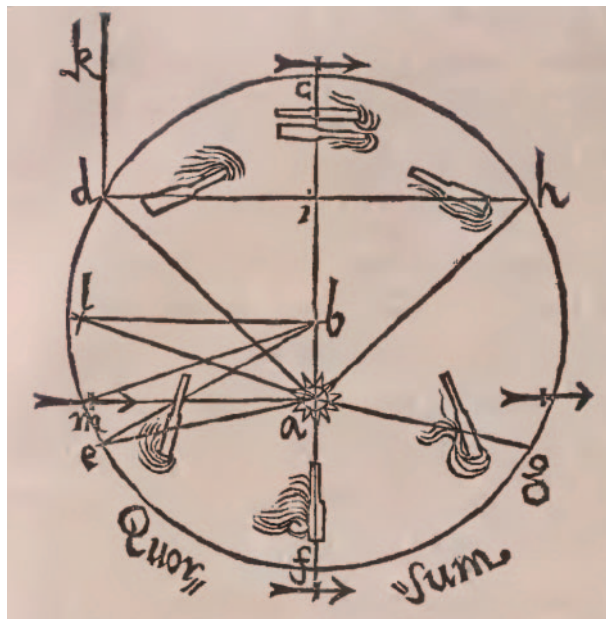


Fig. 2. – Modello di Kepler delle forze su Marte.

Johannes Kepler (1571-1630) non sviluppò una sua meccanica, ma rimase nella visione aristotelica in cui la velocità è proporzionale alla forza. Per calcolare l'orbita di Marte sentì il bisogno di essere guidato da un modello fisico. Immaginò che fosse un'azione magnetica del Sole a spingere, come fossero raggi di una ruota, i pianeti lungo le loro orbite. In aggiunta, i pianeti contribuivano ad aggiustare la traiettoria, un po' come fa con il timone chi governa una barca trasportata da una corrente. La fig. 2 mostra un suo disegno [18]. Fu come la brutta impalcatura usata per costruire una cattedrale, che poi si butta.

6. Giordano Bruno

Giordano Bruno (1548-1600) scrisse chiaramente dell'esperimento concettuale della caduta di una pietra dall'albero di una nave che viaggi velocemente, come prova della falsità dell'argomento aristotelico contro la mobilità della Terra, ne *La cena delle ceneri*, pubblicata a Londra, dove si trovava, nel 1584. Vi espone la sua filosofia dell'universo, in forma di dialoghi, cinque in totale, avvenuti la sera del giorno delle ceneri, tra parecchi invitati. Oltre a Bruno medesimo, ci sono Teofilo che ne espone le tesi, Smitho, inglese intelligente privo di pregiudizi, Prudenziio, Torquato e Nundinio, accademici conservatori, e infine Frulla, uomo di poco conto che fa battute per alleggerire

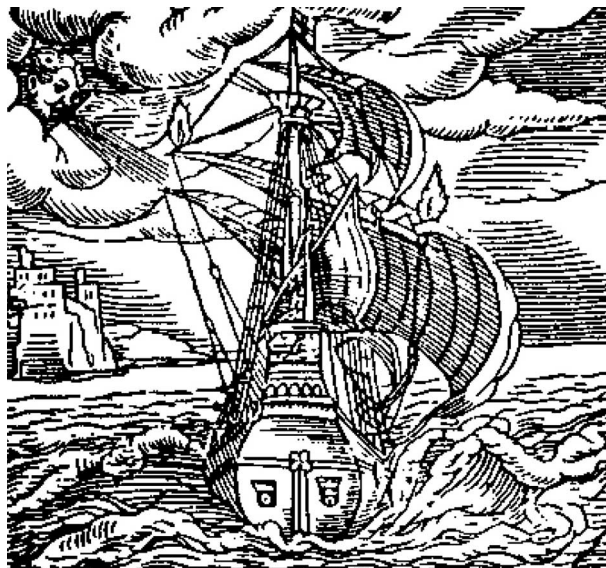


Fig. 3. — La nave di Bruno. Illustrazione da *La cena delle ceneri* [18].

la narrazione. I contenuti sono puramente filosofici e non ci interesserebbero gran che, se non perché nel dialogo terzo scrive ⁽⁴⁾:

SMI. ... Da quel che rispondete a l'argomento tolto da' venti e nuvole, si prende ancora la risposta de l'altro che nel secondo libro *Del cielo e mondo* apportò Aristotele; dove dice, che sarebbe impossibile che una pietra gittata a l'alto potesse per medesima rettitudine perpendicolare tornare al basso; ma sarebbe necessario che il velocissimo moto della terra se la lasciasse molto a dietro verso l'occidente. Perché, essendo questa proiezione dentro la terra, è necessario che col moto di quella si venga a mutar ogni relazione di rettitudine ed obliquità: perché è differenza tra il moto della nave e moto de quelle cose che sono nella nave. Il che se non fusse vero, seguitarrebbe che, quando la nave corre per il mare, giamai alcuno potrebbe trarre per dritto qualche cosa da un canto di quella a l'altro, e non sarebbe possibile che un potesse far un salto e ritornare co' piè onde le tolse [19].

Questa edizione della *Cena* contiene anche il disegno del veliero di fig. 3.

Galilei scriverà una magnifica, e notissima, pagina nel *Dialogo*, nella quale descrivendo un numero di esperimenti fatti *nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio* introdurrà il principio di relatività.

Nella risposta che segue, Teofilo-Bruno dice dell'esperimento dall'albero della nave. TEO ... Ma posto alcuno sopra l'arbore di detta nave, che corra quanto si voglia veloce, non fallirà punto il suo tratto di sorte che per dritto dal punto

⁽⁴⁾ Ringrazio per avermelo segnalato, molti anni fa, Nicola Cabibbo.

E, che è nella cima de l'arbore o nella gabbia, al punto D che è nella radice de l'arbore, o altra parte del ventre e corpo di detta nave, la pietra o altra cosa grave gittata non venga. Cossì, se dal punto D al punto E alcuno che è dentro la nave, gitta per dritto una pietra, quella per la medesima linea ritornerà a basso, muovasi quantosivoglia la nave, pur che non faccia degl'inchini.

E, subito dopo si avvicina alla legge di inerzia, ma l'enunciato è puramente descrittivo e non c'è alcuna teoria fisica.

TEO. Or per tornare al proposito: se dunque saranno dui, de quali l'uno si trova dentro la nave che corre, e l'altro fuori di quella, de quali tanto l'uno quanto l'altro abbia la mano circa il medesimo punto de l'aria; e da quel medesimo loco nel medesimo tempo ancora, l'uno lascie scorrere una pietra, e l'altro un'altra, senza che gli donino spinta alcuna: quella del primo senza perdere punto né deviar da la sua linea, verrà al prefisso loco; e quella del secondo si troverà tralasciata a dietro. Il che non procede da altro, eccetto che la pietra che esce dalla mano del uno che è sustentato da la nave, e per conseguenza si muove secondo il moto di quella, ha tal virtù impressa quale non ha l'altra che procede da la mano di quello che n'è di fuori, benché le pietre abbino medesima gravità, medesimo aria tramezzante, si partano (se possibil fia) dal medesimo punto, e patiscano la medesima spinta. Della qual diversità non possiamo apportar altra ragione, eccetto che le cose che hanno fissione o simili appartenenze nella nave, si moveno con quella: e la una pietra porta seco la virtù del motore, il quale si muove con la nave; l'altra di quello che non ha detta partecipazione.

7. Galileo Galilei

Il giovane Galilei (1564-1642), nel periodo pisano, cercò di comprendere il moto nel quadro della teoria dell'impeto, ma già distaccandosi maggiormente dai dogmi aristotelici, e considerando la possibilità del moto nel vuoto. La svolta fu quando si convinse che Copernico aveva ragione. Avvenne quando ormai era a Padova, presumibilmente nei primi anni 1590. Scriveva infatti il 4 agosto 1597 a Kepler.

Da molti anni sono venuto nell'opinione di Copernico, e da tale posizione ho scoperto le cause di molti effetti naturali, che sono senza dubbio inspiegabili con le ipotesi comuni. Ho scritto molte ragioni e refutazioni di argomenti contrari, ma non ho sinora osato portarle in luce, messo in guardia dalla sorte di Copernico stesso, il nostro maestro, che si procurò fama immortale tra alcuni, ma presso infiniti (tanto è infatti il numero degli stupidi), fu deriso e respinto. Oserei pubblicare i miei pensieri se come te ce ne fossero molti: ma, dato che non ce ne sono, soprassedero [20].

Divenuto copernicano, egli doveva comprendere il moto dei gravi sulla Terra in movimento, non già ferma. Non solo quelle di Aristotele, ma tutte le teorie formulate nel passato dovevano essere abbandonate. La fisica, quella vera, andava costruita,

umilmente, dalle fondamenta, senza i pregiudizi della naturalezza e dell'autorità dei libri.

Galilei non usa formule né espressioni formali, ma presenta i risultati dei suoi esperimenti ed elaborazioni teoriche in forma discorsiva, anzi, nelle sue opere maggiori, dialogica, il *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* [21], per brevità *Dialogo*, pubblicato nel 1632, e i *Discorsi e dimostrazioni circa due nuove scienze* [22], in breve *Le nuove scienze*, pubblicato nel 1638.

Nella seconda giornata del *Dialogo*, Salviati, portavoce di Galilei, dimostra come gli argomenti di Aristotele a prova della stazionarietà della Terra siano falsi. I tre amici discutono, tra l'altro, dell'esperimento dell'albero della nave. Il dialogo tra i tre è qui altamente drammatizzato. Se la nave cammina veloce, colpisce il sasso il tavolato alla base dell'albero o lontano da questa verso poppa? Cadrebbe ai piedi dell'albero, sostiene Salviati, sia che la nave stia ferma sia che si muova. Ma gli aristotelici sostengono, e Simplicio con loro, che invece, nel secondo caso, la pietra cada verso la poppa. Ma hai mai fatto l'esperimento? gli chiede Salviati. No, Simplicio risponde, ma se lo affermano, l'esperienza l'avranno certo fatta. E Salviati lo pressa.

SALV. Or ditemi: se la pietra lasciata dalla cima dell'albero, quando la nave cammina con gran velocità, cadesse precisamente nel medesimo luogo della nave nel quale casca quando la nave sta ferma, qual servizio vi presterebbero queste cadute circa l'assicurarvi se 'l vassello sta fermo o pur se cammina? E Simplicio deve ammettere che se così fosse, non potrebbe sapere se la nave si muove o no. Ma improvvisamente si accorge che anche Salviati l'esperienza potrebbe non averla fatta.

SIMP. Che dunque voi non n'avete fatte cento, non che una prova, e l'affermate così francamente per sicura? Io ritorno nella mia incredulità, e nella medesima sicurezza che l'esperienza sia stata fatta da gli autori principali che se ne servono.

Salviati lo ammette, ma non molla.

SALV. Io senza esperienza son sicuro che l'effetto seguirà come vi dico, perché così è necessario che segua; e più v'aggiungo che voi stesso ancora sapete che non può seguire altrimenti, se ben fingete, o simulate di fingere, di non lo sapere. Ma io son tanto buon cozzon di cervelli, che ve lo farò confessare a viva forza.

L'inventore del metodo sperimentale lo abbandona? Non lo si può dire. Egli invece, qui preferisce un alto strumento, l'esperimento mentale. Galilei vuole sconfiggere Aristotele sul suo stesso terreno, ritenendo di aver trovato paralogismi nella sua costruzione. Egli quindi costringe Simplicio a considerare cosa accadrebbe in certe condizioni e lo conduce a conclusioni contraddittorie, e a dover finalmente ammettere che le sue, di Galilei, convinzioni non possono invece che essere corrette, in quanto conseguenze di comune esperienza pregressa.

Il moto su di un piano declive, cioè in discesa, è accelerato dalla gravità. Il moto su un piano acclive, in salita, è decelerato dalla stessa forza. E se il piano non è né acclive né declive, ma orizzontale, e gli attriti sono ridotti quanto possibile, che succede?

SALV. una superficie piana, pulitissima come uno specchio e di materia dura come l'acciaio e ... una palla perfettamente sferica di materia grave e durissima, come, verbigrazia, di bronzo.

SIMP ... Non vi essendo declività, non vi può essere inclinazione naturale al moto, e non vi essendo acclività, non vi può esser resistenza all'esser mosso, talché verrebbe ad essere indifferente tra la propensione e la resistenza al moto: parmi dunque che e' dovrebbe restarvi naturalmente fermo

SALV. Così credo, quando altri ve lo posasse fermo; ma se gli fusse dato impeto verso qualche parte, che seguirebbe?

SIMP. Seguirebbe il muoversi verso quella parte.

SALV. Ma di che sorte di movimento? di continuamente accelerato, come ne' piani declivi, o di successivamente ritardato, come negli acclivi?

SIMP. Io non ci so scorgere causa di accelerazione né di ritardamento, non vi essendo né declività né acclività.

SALV. Sì. Ma se non vi fusse causa di ritardamento, molto meno vi dovrebbe esser di quiete: quanto dunque vorreste voi che il mobile durasse a muoversi?

SIMP. Tanto quanto durasse la lunghezza di quella superficie né erta né china [23].

Galilei aveva qui esercitato la sua *vis polemica* sino a mentire, perché l'esperimento dall'albero della nave l'aveva ben fatto. Nel 1624 aveva scritto in una lettera ad Ingoli.

Ed una di tali esperienze è appunto questa del sasso cadente dalla sommità dell'albero nella nave, il quale va sempre a terminare e ferire lo stesso luogo, tanto quando la nave è in quiete quanto mentre ella velocemente cammina, e non va, come essi [*gli arisotelici*] credevano (scorrendo via la nave mentre la pietra per aria vien a basso), a ferir lontano dal piede verso la poppa; nella quale io sono stato doppiamente miglior filosofo di loro, perché loro, a dir quello ch'è il contrario effetto, hanno aggiunto la bugia, dicendo d'aver ciò veduto dall'esperienza, ed io ne ho fatta l'esperienza, avanti la quale il natural discorso mi aveva molto fortemente persuaso che l'effetto doveva succedere come appunto succede [24].

Un'ovvia variante dell'esperimento consiste nel lanciare un oggetto in alto verticalmente e controllare dove va a cadere. Francesco Stelluti, racconta in una sua lettera dl 8 gennaio 1633 (l'anno dopo la pubblicazione del *Dialogo*).

Andando con il Sig. Galileo a Piediluco, per il lago con una barca da sei remi che andava assai veloce, e sedendo lui da una parte et io dall'altra mi domandò se haveva qualcosa di grave, li dissi di haver la chiave della mia camera; la prese e, mentre la barca andava velocemente, trasse in alto la chiave in modo che io la credevo perduta nell'acqua; ma quella, se bene la barca era trascorsa per otto o dieci braccia avanti, con tutto ciò cadde la chiave tra lui e me, perché, oltre l'andare in alto, haveva del moto della barca acquistato l'altro andare col movimento di essa e seguitarla come fece [25].

Stelluti aggiunge di aver saputo da Annibale Brancadoro da Fermo, capitano di una delle navi da guerra del Granduca, di aver fatto l'esperimento. Su quella galera che

viaggiava a tutta velocità aveva sparato un colpo di mortaio verso l'alto. La palla era ricaduta nella bocca del mortaio.

Per completezza, va infine citata la lettera a Galilei del 16 settembre 1639 di G. B. Baiati, nella quale questi riferisce di aver lasciato cadere ripetutamente una palla di moschetto dalla cima dell'albero di una galera che andava velocemente, che ogni volta cadeva ai piedi dell'albero, quando la palla stava "*per aria più di tre minuti secondi, nel qual tempo la galea camminava sicuramente almeno sedici braccia*" [26].

Ma torniamo al *Dialogo*. Su qualsiasi oggetto in moto qui sulla Terra agiscono comunque due forze, gli attriti e il peso. Galilei aveva ridotto quanto possibile le resistenze passive lavorando con piani inclinati ben levigati e palline dure e perfettamente sferiche. Se il piano è orizzontale anche l'effetto del peso è cancellato. Ma questo solo localmente. Se estendiamo mentalmente il piano su dimensioni confrontabili col raggio terrestre il peso non è più diretto normalmente al piano in tutti i suoi punti. In altre parole, muovendoci lungo il piano ci allontaniamo dal centro della Terra. Anche in assenza di attriti una pallina in moto sul piano rallenta. Il dialogo di cui ho riportato sopra qualche battuta più avanti recita.

SALV. Adunque una superficie che dovesse esser non declive e non acclive, bisognerebbe che in tutte le sue parti fusse egualmente distante dal centro. Ma di tali superficie ve n'è egli alcuna al mondo?

SIMP. Non ve ne mancano: èccì quella del nostro globo terrestre, se però ella fusse ben pulita, e non, quale ella è, scabrosa e montuosa; ma vi è quella dell'acqua, mentre è placida e tranquilla.

SALV. Adunque una nave che vadia movendosi per la bonaccia del mare, è un di quei mobili che scorrono per una di quelle superficie che non sono né declivi né acclivi, e però disposta, quando le fusser rimossi tutti gli ostacoli accidentarii ed esterni, a muoversi, con l'impulso concepito una volta, incessabilmente e uniformemente.

Il che è corretto, ovviamente, e simile a quanto scriverà anche Newton. Ma questo è sufficiente ai critici per affermare che per Galilei il moto di un corpo non soggetto a forze è uniforme, ma circolare, non rettilineo. Ma questi critici non leggono Galilei abbastanza. Anzitutto gli argomenti vanno contestualizzati, e qui si sta discutendo della falsità delle prove aristoteliche contro la mobilità della Terra. Nello stesso *Dialogo*, discutendo, invece, del moto dei proiettili, Salvati dice.

SALV. Sin qui avete per voi stesso saputo che il moto circolare del proiciente imprime nel proietto impeto di muoversi (quando avviene ch'e' si separino) per la retta tangente il cerchio del moto nel punto della separazione, e, continuando per essa il moto, vien sempre allontanandosi dal proiciente; ed avete detto che per tal linea retta continuerebbe il proietto di muoversi, quando dal proprio peso non gli fusse aggiunta inclinazione all'ingiù, dalla quale deriva l'incurvazione della linea del moto.

Galilei non sa, e sa bene di non saperlo, cosa sia la gravità, ma comprende benissimo che questa misteriosa forza è un secondo impedimento, oltre agli attriti, al moto rettilineo uniforme.

Nelle *Due nuove scienze*, che riguardano la fisica degli oggetti terreni, la legge

di inerzia appare nella sua completezza. La giornata quarta è dedicata al *moto dei proietti*. I moti sono descritti a partire dalle due leggi della meccanica che aveva scoperte, la legge di inerzia e la legge del moto accelerato. La giornata inizia quindi con l'enunciato della prima legge, in forma discorsiva, come suo costume.

Immagino di avere un mobile lanciato su un piano orizzontale, rimosso ogni impedimento: già sappiamo, per quello che abbiamo detto più diffusamente altrove, che il suo moto si svolgerà equabile e perpetuo sul medesimo piano, qualora questo si estenda all'infinito; se invece intendiamo [questo piano] limitato e posto in alto, il mobile, che immagino dotato di gravità, giunto all'estremo del piano e continuando la sua corsa, aggiungerà al precedente movimento equabile e indelebile quella propensione all'ingiù dovuta alla propria gravità: ne nasce un moto composto di un moto orizzontale equabile e di un moto verso il basso naturalmente accelerato.

Ma Galilei andò oltre. Le *Nuove Scienze* furono pubblicate nel 1638, quando era agli arresti domiciliari, vecchio, pieno di acciacchi e ormai cieco. Ma ancora lavorava a due ulteriori giornate da aggiungere. Ce ne sono rimaste le bozze che riuscì a scrivere o a dettare e quanto ci dice Viviani. La “sesta giornata”, com'è chiamata, riguarda la *Forza della percossa*. Possiamo leggerla nel Volume VIII dell'Edizione Nazionale, ma per lungo tempo non ci si accorse che in essa Galilei ci dice come riuscì ad eliminare il secondo impedimento al moto rettilineo uniforme, quello del peso. Dobbiamo a Roberto Vergara Caffarelli l'aver attirato l'attenzione su questo passaggio. Trovate tutto descritto, inclusa la “macchina di Galilei” che ha costruito a Pisa e gli esperimenti che vi fece, nella sua monografia *Galileo Galilei and motion* [27], pubblicata dalla SIF con Springer.

Il dispositivo di Galilei ⁽⁵⁾ è molto semplice: una carrucola, una corda e due pesi attaccati ai due estremi, come in fig. 4. La userà per i suoi esperimenti sulla “strappata” con pesi sia diversi sia uguali. In questo caso

SALV ... voglio che ci figuriamo un solido grave, per esempio di mille libbre di peso [più avanti parlerà di 100 libbre, peso più ragionevole], il quale posi sopra un piano che lo sostenti; voglio poi che intendiamo una corda a cotal solido legata, la quale cavalchi sopra una carrucola fermata in alto, per buono spazio, sopra detto solido. Qui è manifesto, che aggiungendo forza traente in giù all'altro capo della corda, nel sollevar quel peso si averà sempre una egualissima resistenza, cioè il contrasto di mille libbre di gravità; e quando da quest'altro capo si sospenda un altro solido egualmente pesante come il primo, verrà da essi fatto equilibrio [28].

Se i due pesi sono esattamente uguali, una minima “strappata” data ad uno dei due farà sì che l'altro si muova verso l'alto rettilineo uniforme, così come accade nel moto orizzontale facendo rotolare una sfera su un piano orizzontale.

⁽⁵⁾ Il dispositivo comunemente è chiamato “macchina di Atwood”, il quale la propose più di un secolo più tardi, nel 1747.

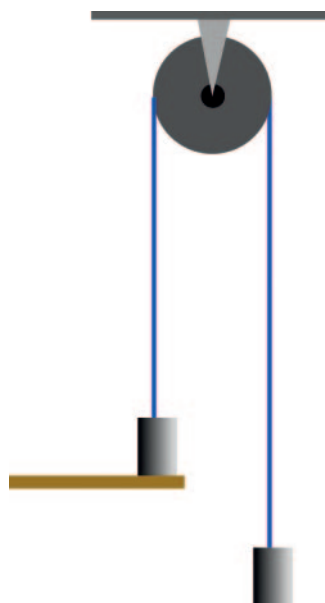


Fig. 4. – Dispositivo di Galilei per lo studio della “strappata”.

SALV. E qui mi pare che accada per appunto quello che accade ad un mobile grave e perfettamente rotondo, il quale, se si porrà sopra un piano pulitissimo ed alquanto inclinato, da per sé stesso naturalmente vi scenderà, acquistando sempre velocità maggiore; ma se, per l'opposito, dalla parte bassa si vorrà quello cacciare in su, ci bisognerà conferirgli impeto, il quale si andrà sempre diminuendo e finalmente annichilando; ma se il piano non sarà inclinato, ma orizzontale, tal solido rotondo, postovi sopra, farà quello che piacerà a noi, cioè, se ve lo metteremo in quiete, in quiete si conserverà, e dandogli impeto verso qualche parte, verso quella si moverà, conservando sempre l'istessa velocità che dalla nostra mano averà ricevuta, non avendo azione né di accrescerla né di scemarla, non essendo in tal piano né declività né acclività: et in simile guisa i due pesi eguali, pendenti da' due capi della corda, ponendogliene in bilancio, si quieteranno, e se ad uno si darà impeto all'in giù, quello si andrà conservando equabile sempre. E qui si dee avvertire che tutte queste cose seguirebbero quando si movessero tutti gli esterni ed accidentari impedimenti, dico di asprezza e gravità di corda, di girelle e di stropicciamenti nel volgersi intorno al suo asse, ed altri che ve ne potessero essere [29].

Eliminati i due impedimenti, la legge di inerzia è completamente dimostrata; essa vale in ogni circostanza in cui, diciamo oggi, la risultante delle forze esterne è nulla.



Fig. 5. — Parte di un disegno di Pierre Puget, *Vaisseaux dans la rade de Mareseille* (1655-60), Musée de beaux arts, Marseille.

8. Pierre Gassendi

Dopo aver costruito l'idea dell'inerzia circolare contro Galilei, A. Koyré attribuisce la scoperta della legge di inerzia, guarda caso, a due francesi, in ordine storico, Pierre Gassendi e René Descartes. Molti storici lo seguirono. Conviene leggere direttamente le fonti per capire se abbiano qualche ragione.

L'abate francese Pierre Gassend (1614-1655), detto Gassendi, fu filosofo, astronomo e scienziato. Contemporaneo e più giovane di Galilei, ne adottò il metodo sperimentale ed ebbe con lui una corrispondenza epistolare. Combatté i dogmi aristotelici e la pseudoscienza di Descartes. Studiò le macchie solari, il moto delle comete e osservò il passaggio di Mercurio sul Sole nel 1631, che Kepler aveva previsto ma non potuto osservare, essendo morto pochi mesi prima.

Il carteggio con Galilei lo convinse, da bravo sperimentale, a fare anche lui l'esperimento della nave. Non fu certo il primo, come abbiamo visto. Nel 1641, il suo nobile amico Louis de Valois (1596-1653), governatore della Provenza, gli mise a disposizione una galera militare, simile a quella della fig. 5. Gassendi ne scrive nella prima di due lettere a Pierre Dupuy, in *De motu impresso epistolae duo*. La nave era una trireme, che si muoveva alla notevole velocità di 16 nodi (a quanto dice) “*in mare aperto e tranquillo*”. Prove ripetute mostrarono che la pietra cadeva sempre lungo la linea verticale dell'albero [30]. Da un'altezza tipica di una ventina di metri, il tempo di caduta è di circa 2", nei quali la nave avrebbe percorso 14 m.

Sul piano teorico, Gassendi sviluppò una sua teoria sul moto dei proiettili, per interpretare i risultati sperimentali di Galilei, ma negando le leggi della meccanica

da lui scoperte. Sui corpi agirebbero due forze. La *vis impellens* è dovuta all'aria che spinge i corpi in moto da dietro precipitandosi negli spazi che hanno liberato avanzando, la *vis attraens* è dovuta alla Terra che emette particelle magnetiche che tirano in giù i corpi [31]. Nella sua analisi del moto della pietra dall'albero scrive:

se dei due moti, perpendicolare e orizzontale, che assieme producono quello obliquo, uno sia da considerare naturale, questo è certo quello orizzontale piuttosto di quello perpendicolare. Questo appare vero; perché sino a che il proiettile era parte del tutto [cioè viaggiava con la nave], che si muoveva lungo l'orizzonte, cioè circolarmente, di conseguenza esso, ad imitazione, si muove circolarmente e altrettanto naturalmente in avanti uniformemente; in maniera che, mentre il moto perpendicolare sempre aumenta, o diminuisce, quello orizzontale fluisce sempre con lo stesso valore (*tenor*) e procede invariabilmente

....

Sembra giusto ritenere che il moto orizzontale, qualunque ne sia la causa, sia per sua natura perpetuo, se non intervenga una causa a deviare il mobile e a disturbarne il moto [32].

L'ultima frase è la sua versione della "legge di inerzia". Ma, a parte l'assurdità della teoria in cui è inquadrata, il moto di un corpo libero è "orizzontale", che lui intende essere non rettilineo ma circolare. Poco oltre illustra ulteriormente, ponendosi idealmente in uno spazio vuoto in cui entrambe le sue forze, pensa, sono nulle.

Tu chiedi incidentalmente cosa accadrebbe a quella pietra che ho assunto si possa immaginare in spazi vuoti (*inanibus*) se fosse allontanata dal suo stato di quiete e spinta da qualche forza. Rispondo esser probabile che essa si muova uniformemente (*aequaliter*) e indefinitamente; e lentamente o velocemente a seconda che l'impeto impresso sia stato piccolo o grande. Desumo l'argomento dall'uniformità del moto orizzontale che ho già esposto; perché questo si vede non finire se non a causa di una mistura (*per admistione*) di moto perpendicolare; quindi, dato che in quegli spazi non c'è mistura di moto perpendicolare, in qualunque parte il moto sia iniziato, esso è orizzontale, e né accelera né rallenta, e quindi non finisce mai [33].

L'inerzia circolare attribuita erroneamente a Galilei c'è invece in Gassendi, per di più inserita in una teoria completamente errata.

9. René Descartes

René Descartes (1596-1644) fu matematico e filosofo. Il suo maggiore contributo alla fisica, diceva Feynman, sono le coordinate cartesiane. Nei testi francesi, e in qualcuno degli italiani (confesso di esserci caduto anch'io) la legge della rifrazione della luce è chiamata legge di Cartesio invece che di Snell. Ma questi l'aveva (ri)scoperta ⁽⁶⁾ nel 1621 e scritta nelle sue lezioni, che, anche se non pubblicate, circolavano in forma scritta diffusamente in Olanda. E in Olanda il filosofo prese dimora

(6) Nel mondo arabo era stata scoperta a Bagdad nel 984 da Ibn Sahal in *Sugli strumenti ustori*.

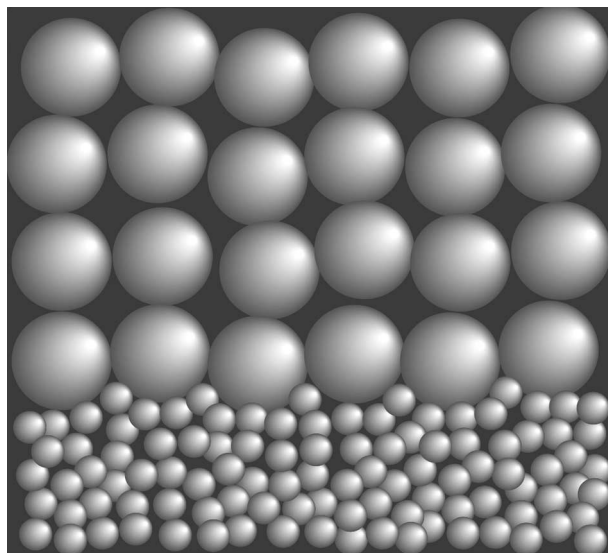


Fig. 6. – Microscopiche sferette rigide elastiche riempiono i mezzi. La luce si propaga circa, ma non esattamente, come farebbe un'onda sonora.

nel 1628 e pubblicò la legge dei seni in *La dioptrique* nel 1637. Descartes partì dalla sua teoria del moto e al suo modello della materia, entrambi completamente irrealistici. Apoditticamente affermò che il vuoto non esiste. Ogni mezzo è composto di sferette rigide che si toccano, più grandi per i mezzi più densi. La fig. 6 mostra due mezzi a contatto in una mia elaborazione da un disegno in *Le monde ou Traité de la lumière* (1632-33) [34]. Dimostrò successivamente la legge dei seni, partendo da due ipotesi entrambe sbagliate, che si compensavano (forse non per merito della fortuna?): 1) la luce avanza più facilmente, quindi più velocemente, nei mezzi più densi; 2) alla superficie di separazione, la componente perpendicolare della velocità cambia e quella tangente no.

Descartes si oppose al metodo sperimentale. Le leggi della meccanica di Galilei, valide al limite in cui la resistenza dell'aria sia trascurabile e quindi, idealmente, nel vuoto, sono da rigettare, perché il vuoto non c'è. Non già con l'esperimento, ma con la sola speculazione mentale. In una lettera a Mersenne dell'11 ottobre 1638, Descartes attacca *Le nuove scienze* in generale per il metodo scientifico e specificamente su 27 punti, tra i quali:

Tutto quello che dice sulla velocità dei corpi che cadono nel vuoto, etc., è privo di fondamento, perché egli avrebbe dovuto prima determinare cos'è la pesantezza; e se avesse saputo la verità, avrebbe saputo che essa è nulla nel vuoto [35].

Nel 1644 Evangelista Torricelli dimostrò, con il famoso esperimento, l'esistenza del vuoto. Ma Descartes continuò a negarla nei *Principia philosophiae*, pubblicati lo stesso anno.

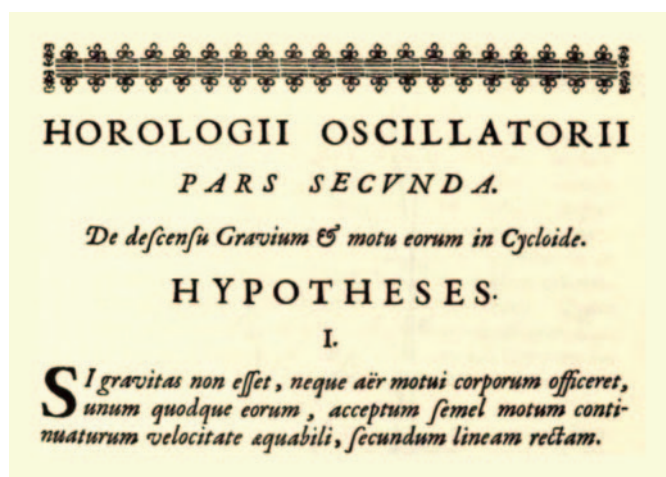


Fig. 7. – Da Huygens *Horologium oscillatorium*.

La scoperta della legge di inerzia di Descartes sarebbe contenuta nelle seguenti frasi dei suoi *Principia*.

La prima legge della natura: qualsiasi cosa, in quanto è tale, rimane sempre nello stesso stato, e quindi, una volta abbia iniziato a muoversi, per sempre si muove.

La seconda legge della natura: Ogni moto per sé è rettilineo, e quindi le cose che si muovono circolarmente tendono sempre a recedere dal centro del cerchio che percorrono [36].

Alla semplice lettura sembra sostanzialmente la legge di inerzia. Ma, ancora una volta, non lo è, perché è sì inquadrata in una struttura logica, ma questa è basta su “leggi” in buona parte false, come quelle ricordate sul “moto” della luce, e quelle degli urti. Inoltre, essa è costruita sul rifiuto del metodo sperimentale, su assunti metafisici. Nel caso specifico, la “legge di inerzia” è conseguenza dell’immutabilità divina.

È dalla stessa immutabilità di Dio, che si possono conoscere le regole, o leggi, di natura, che sono cause secondarie e particolari dei diversi moti, che avvertiamo nei singoli corpi [37].

Il balzo all’indietro è formidabile. Per spiegare i fenomeni serve invocare l’intervento diretto divino.

10. Christian Huygens

Per finire, un fisico vero, Christian Huygens (1629-1695), di 59 anni più giovane di Galilei e di 14 più vecchio di Newton, non solo formulò la prima teoria ondulatoria della luce, ma diede importanti contributi alla meccanica. Nel 1673 pubblicò *Horologium Oscillatorium*, dove sviluppò lo studio dei moti, sia liberi sia vincolati, sotto l’azione del peso e la fisica e l’ingegnerizzazione degli orologi. Usò le leggi di Galilei

esponendole in maniera formale. La trattazione parte con tre *ipotesi*, delle quali la prima è:

Se non ci fosse la gravità, né l'aria ostacolasse il moto dei corpi, qualsiasi di questi, una volta in moto continuerebbe con velocità uniforme secondo una linea retta [38].

L'espressione è quella definitiva, 13 anni prima dei *Principia*.

11. Dopo Newton

Come sappiamo, la meccanica di Galilei e Newton deve essere modificata, o meglio estesa, quando le velocità non sono piccolissime rispetto a quella della luce. La legge di inerzia, però, non necessita di alcuna modifica, anzi rimane essenziale per definire cosa sia un riferimento inerziale. Per completezza ricordo che la seconda legge, nella forma newtoniana, in scrittura moderna, $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$, rimane pure valida, ma l'espressione della quantità di moto (di un punto materiale di massa m) deve essere modificata in $\mathbf{p} = m\gamma\mathbf{v}$, dove $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ [39, 40]. Quanto alla terza legge, quella di azione e reazione, in presenza di un campo di forze, quello elettromagnetico ad esempio, non vale, perché nella conservazione della quantità di moto si deve includere quella del campo.

* * *

Sono grato all'anonimo revisore per l'accurata lettura e gli utili suggerimenti.

Bibliografia

- [1] NEEDHAM J., *Science and Civilization in China*, Vol. 4 (Cambridge University Press) 1954, p. 55; tradotto in *Scienza e civiltà in Cina* (Giulio Einaudi Editore, Torino) 1981.
- [2] NEWTON I., *Philosophiae naturalis principia mathematica* (Jussu Societatis Regiae ac Typis J. Streater, Londra) 1687, p. 8.
- [3] NEWTON I., in [2], p. 16.
- [4] KOYRÉ A., *Etudes galiléennes* (Hermann, Paris) 1939.
- [5] NEWTON I., in [2], p. 21.
- [6] POINCARÉ H., "L'État actuel et l'avenir della Physique Mathématique", 24 settembre 1904; *Bull. des. Sc. Math.*, **28** (1904) 302.
- [7] POINCARÉ H., *La Théorie de Lorentz et le Principe de Réaction*, Archives Néerlandais de Sciences exactes et naturelles, 2a serie, t. 5, p. 252-278 (1900), riprodotto nelle "Oeuvres" t. IX, p. 464.
- [8] NEWTON I., *op. cit.*, p. 20.
- [9] Democrito di Abdera, fr. 9.
- [10] ARISTOTELE, *De gen. et corr.* A8, 3252a2.
- [11] AEZIO I., 12, 6.
- [12] GALILIEI G., *Discorso intorno alle cose che stanno su l'acqua e in quella si muovono*, E. N., IV (vedi nota a piè pagina (¹)).
- [13] GALILIEI G., *Il saggiaiore*, E. N., VI, p. 216 e seg.
- [14] GALILIEI G., *Discorsi e dimostrazioni intorno a due nuove scienze*, E. N., IV.
- [15] REDONDI P., *Galileo eretico* (G. Einaudi, Torino) 1983.
- [16] BURIDAN J., *Commenti sulla Metafisica di Aristotele*, XII. 9; 73 ra.
- [17] DIGGES T., *A Perfit Description of the Caelestial Orbes*, 1576 <https://math.dartmouth.edu/~matc/Readers/renaissance.astro/5.1.0rbs.html>.

- [18] KEPLER J., *Asrtronomia nova*, Cap. LVII.
- [19] BRUNO G., *La cena delle ceneri*, Dialogo terzo, edizione di riferimento a cura di Giovanni Aquivecchia (Einaudi, Torino) 1955.
- [20] GALILEI G., *Lettera a Kepler da Padova il 4 agosto 1597*, E. N., X, 68.
- [21] GALILEI G., E. N., VII.
- [22] GALILEI G., E. N., VIII.
- [23] GALILEI G., E. N., VII, 171 e 173.
- [24] GALILEI G., *Lettera a Francesco Ingoli* in risposta alla *Disputatio de situ et quiete terrae*, E. N. VI, 545.
- [25] CONTI L., “Francesco Stelluti, il copernicanesimo dei Lincei e la teoria galileiana delle maree”, in *Galileo e Copernico. Alle origini del pensiero scientifico moderno* (Edizioni Porziuncola, Perugia) 1990, p. 233–231.
- [26] *Lettera di G. Battista Baliani a Galilei*, n. 3919. E. N. XVIII, 79.
- [27] VERGARA CAFFARELLI R., *Galileo Galilei and Motion* (SIF, Bologna; Springer, Berlin, Heidelberg, New York) 2009.
- [28] GALILEI G., *Della forza della percossa*, E. N., VIII, 332-333.
- [29] GALILEI G., in [28] E. N. VIII, 336.
- [30] GASSENDI P., *De motu impresso a motore translato*, Capitolo I. Opera omnia III p. 479 http://libcoll.mpiwg-berlin.mpg.de/libview?url=/mpiwg/online/permanent/archimedes_repository/large/gasse.demot.027_la.1642/index.meta&start=61&pn=70&mode=txttool.
- [31] PALMERINO C. R., “Galileo’s theories of free fall and projectile motion as interpreted by Pierre Gasendi” in *The reception of the Galilean science of motion in s eventeen century in Europe* (Kluwer Academic Publisher, Dordrecht) 2004, pp. 137–173.
- [32] GASSENDI P., Capitolo X, in [31] III p. 489 a.
- [33] GASSENDI P., Capitolo XVI, in [31] III, p. 495 b.
- [34] DESCARTES R., *Le monde ou Traité de la lumière*, Traduzione in inglese a: <https://www.princeton.edu/~hos/mike/texts/descartes/world/worldfr.htm>.
- [35] DESCARTES R., *Oeuvres complètes* (Adam-Tannery, Paris) II, p. 385 <http://philosophyfaculty.ucsd.edu/faculty/ctolley/texts/descartes.html>.
- [36] DESCARTES R., *Principia philosophiae*, in [35], VIII, 62-63.
- [37] DESCARTES R., in [35], VIII, 62.
- [38] HUYGENS C., *Horologium oscillatorium* (F. Muguet, Parigi) 1673, p. 21 <https://archive.org/details/B-001-004-158/page/n1>.
- [39] POINCARÉ H., “Sur la dynamique de l’électron”, *Rend. Circ. Mat. Palermo*, **21** (1906) 129 (Eq. (5) del §7); tradotta in inglese e in formalismo moderno da SCHWARTZ H. M., *Am. J. Phys.*, **39** (1971) 1287; **40** (1972) 862, 1282.
- [40] PLANCK M., “Das Prinzip der Relativität und die Grundgleichungen der Mechanik”, *Verh. Deutsch. Phys. Ges.*, **8** (1906) 136 (Eq. 6) <https://archive.org/details/B-001-004-158/page/n111>.