

Se la Terra si muove ad altissima velocità e spicchiamo un salto in aria, perché cadiamo perpendicolarmente sullo stesso punto?

La Relatività Classica dedotta dal Principio d’Inerzia

Luca Nicotra*

DOI:10.30449/AS.v13n25.217

Ricevuto 11-06-2026 Approvato 21-06-2026 Pubblicato 30-06-2026



Sunto: *La Terra si muove ad altissima velocità. Allora, se noi spicchiamo un salto verticale in alto, dovremmo vedere la Terra muoversi sotto i nostri piedi e cadere in un punto situato ad occidente rispetto al punto da cui abbiamo spiccato il salto, proprio come obiettava Aristotele, poiché la Terra ruota da occidente verso oriente. Ma questo non accade: ricadiamo nello stesso punto di partenza. Perché? La risposta “secca” è semplice: per il Principio di Inerzia. Ma per comprenderlo ci sono voluti molti secoli e molto coraggio per contrastare vecchie e radicate convinzioni. E dal Principio d’Inerzia è derivabile il cosiddetto Principio di Relatività Classica di Galilei, che pertanto è in realtà una legge fisica e non un principio.*

Parole Chiave: Movimenti della Terra, Principio d’Inerzia, Relatività classica

Abstract: *The Earth is moving at very high speed . If we make a vertical leap upward, we should see the Earth move beneath our feet and fall to a point west of where we jumped, just as Aristotle objected, since the Earth rotates from west to east. But this doesn’t happen: we fall back to the same starting point. Why? The short answer is simple: the Principle of Inertia. But understanding it took many centuries and a great deal of courage to challenge old and deeply rooted beliefs. And from the Principle of Inertia, Galileo’s so-called Principle of Classical Relativity can be derived, which is therefore actually a physical law*

*Direttore responsabile di «ArteScienza», «ArteScienza_magazine», del «Bollettino di Filosofia delle Scienze Umane» e del «Periodico di Matematica». Ingegnere e giornalista, Presidente dell’A.P.S. “Arte e Scienza”, accademico onorario della “Nuova Accademia Piceno Aprutina dei Velati” (APAV) e dell’Accademia di Filosofia delle Scienze Umane (AFSU); luca.nicotra1949@gmail.com.

and not a principle.

Keywords: Earth's movements, Principle of inertia, Classical relativity

Citazione: Nicotra L., *Se la Terra si muove ad altissima velocità e spicchiamo un salto in aria, perché cadiamo perpendicolarmente sullo stesso punto?*, «ArteScienza», Anno XIII, giugno 2026, N. 25, pp. 5-26, DOI:10.30449/AS.v13n25.217.

1 - Aristotele: la Terra è immobile

Nel II libro dell'opera *Del Cielo*, dopo minuziose analisi delle diverse opinioni dei filosofi sulla forma sferica o piatta della Terra e sulla sua immobilità o mobilità, Aristotele concorda sulla forma sferica, ma afferma categoricamente la sua immobilità:

È chiaro dunque che la Terra si trova necessariamente posta al centro [del Tutto¹], ed è immobile, e non solo per le ragioni già esposte, ma anche perché i corpi gravi scagliati a forza verso l'alto ricadono perpendicolarmente nello stesso punto, e questo accadrebbe anche se la forza che li scaglia li proiettasse infinitamente lontano. (Aristotele, 2008; *Del Cielo* (II) 14, 296b, 21.)

Come fa Aristotele ad essere sicuro che il grave ricadrebbe perpendicolarmente nello stesso punto anche se la forza lo scagliasse infinitamente lontano? La prima affermazione è validata dall'esperienza, ma la seconda no.

2 - ...Eppur si muove

Noi oggi, invece, sappiamo con certezza che la Terra si muove, secondo vari moti, fra cui i più importanti sono il moto di rivoluzione attorno al Sole e il moto proprio di rotazione attorno all'asse terrestre.

Il nostro Pianeta si muove lungo la sua orbita attorno al Sole, poco ellittica e quasi circolare, a una velocità media di 29,789 Km/s pari a 108.000 Km/h, una velocità enorme, di cui non abbiamo al-

1 Ovvero dell'universo.

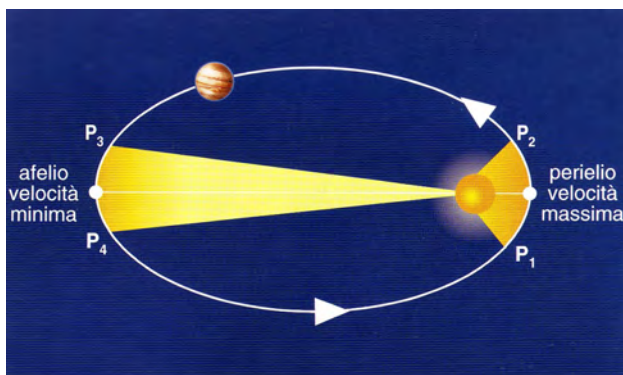


Fig. 1 - A illustrazione della Seconda legge di Keplero. Per ragioni didattiche è stata esagerata l'ellitticità dell'orbita terrestre, per mettere in evidenza le differenze di velocità della Terra, all'afelio e al perielio.

cuna percezione.

Si tratta però di una velocità media, perché in realtà la velocità della Terra lungo la sua orbita è variabile fra il valore minimo che raggiunge nell'afelio (dove è più lontana dal Sole) e il valore massimo che raggiunge nel perielio (dove è più vicina al Sole). Infatti, la seconda legge di Keplero sulle orbite planetarie afferma che la velocità areolare della Terra attorno al Sole² è costante, vale a dire il raggio vettore che congiunge il Sole con la Terra ricopre aree uguali in tempi uguali. Ma poiché l'orbita della Terra è leggermente ellittica, con il Sole che occupa uno dei due fuochi, le aree spazzate dal raggio vettore in tempi eguali all'afelio e al perielio risultano uguali ma sono evidentemente sottese da archi di ellisse di diversa lunghezza: minore all'afelio e maggiore al perielio (figura 1). Pertanto la Terra all'afelio, dovendo percorrere un tratto di orbita di minor lunghezza rispetto a quello coperto nello stesso tempo al perielio, deve diminuire la sua velocità lineare rispetto a quella che ha al perielio. La velocità poi cambia con continuità lungo il percorso dall'afelio al perielio e viceversa. Dunque non è mai

² È la velocità con cui il raggio vettore che va dal Sole alla Terra ricopre le aree delimitate dall'orbita ellittica della Terra (figura 1).

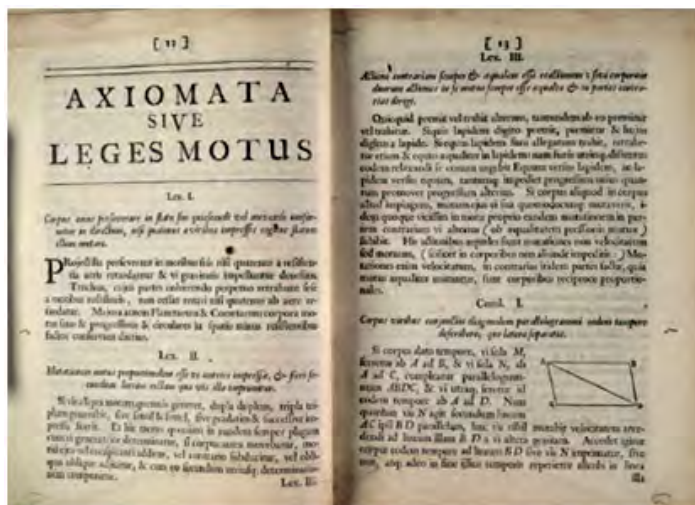


Fig. 2 – Il capitolo “Assiomi o leggi del moto” in *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* di Isaac Newton (1687).

costante.

Il Sole, a sua volta, si muove, assieme a tutto il Sistema solare, con una velocità anch'essa enorme (circa $217 \text{ Km/s} = 781.200 \text{ Km/h}$) lungo la sua orbita ellittica attorno al centro di massa della Via Lattea,³ con una direzione apparente (valutando il moto rispetto alle stelle vicine) verso il cosiddetto *apice solare*, un punto situato a sud-ovest della stella Vega nella costellazione della Lira, a una velocità, in tale direzione, di circa $20 \text{ Km/s} = 72.000 \text{ Km/h}$.

Di conseguenza, il moto galattico della Terra, rispetto alla via Lattea, è la composizione del suo moto ellittico (quasi circolare) attorno al Sole e del moto apparente traslatorio del Sole verso Vega. Pertanto si può dire che la Terra si avvita nello spazio galattico approssimativamente lungo un'elica, avente l'asse nella direzione apparente del moto del Sole verso Vega.

Ma c'è un altro moto della Terra che si potrebbe pensare di poter percepire compiendo un salto verticale: la sua rotazione attorno al proprio asse.

³ Il Sole completa la sua orbita galattica in 225-250 milioni di anni.

La velocità angolare ω del nostro Pianeta attorno all'asse terrestre è costante: $\omega = 360^\circ/24 \text{ h} = 15^\circ/\text{h} = 0,261799 \text{ rad/h} \sim 0,2618 \text{ rad/h}$. La velocità lineare v della Terra attorno al proprio asse è il prodotto fra la sua velocità angolare e il raggio di rotazione $v = \omega r$, e di conseguenza varia sia con la latitudine sia con l'altitudine, variando il raggio terrestre. Essa, quindi, è nulla ai poli ($r = 0$) e massima all'equatore (circa 1670 Km/h, essendo $r = 6378,137 \text{ Km}$). Inoltre, alla stessa latitudine, la velocità lineare v della Terra aumenta con l'altezza sul livello del mare, perché aumenta il raggio di rotazione r . A quota zero, la velocità lineare della Terra attorno al proprio asse, in un punto di latitudine φ , si può calcolare anche moltiplicando la velocità lineare del moto di rotazione terrestre all'equatore (circa 1670 km/h) per il coseno della latitudine φ del punto considerato: $v = v_{\text{eq}} \cos \varphi = 1670 \cos \varphi \text{ Km/h}$. Così, a Roma, alla latitudine di $41^\circ 53' 35'' = 41,89^\circ$ essendo $\cos 41,89^\circ \sim 0,744428$, la velocità lineare del moto di rotazione terrestre in un punto situato a quota zero è di $1670 \times 0,744428 = 1.243,19476 \text{ Km/h} \sim 1.243 \text{ Km/h}$.

Dunque ci muoviamo nello spazio a velocità veramente impressionanti! Allora, se la Terra si muove ad altissima velocità e noi spicchiamo un salto verticale in alto, dovremmo vedere la Terra muoversi sotto i nostri piedi e cadere in un punto situato ad occidente rispetto al punto da cui abbiamo spiccato il salto, proprio come obiettava Aristotele, poiché la Terra ruota da occidente verso oriente. Ma questo non accade: ricadiamo nello stesso punto di partenza. Perché?

La risposta "secca" è semplice: per il Principio di Inerzia. Ma per comprenderlo ci sono voluti molti secoli e molto coraggio per contrastare vecchie e radicate convinzioni.

3 - La forza apparente di Coriolis

In realtà, per effetto della forza di Coriolis, non ricadiamo nello stesso punto di partenza ma in un punto leggermente a oriente rispetto ad esso.

Cos'è la forza di Coriolis?

I sistemi di riferimento in quiete oppure in moto rettilineo uni-

forme (velocità costante) rispetto al sistema di riferimento universale solidale con le stelle "fisse" sono detti inerziali, in quanto per essi vale il Principio d'Inerzia. Tutti gli altri sistemi di riferimento in moto vario, rispetto a un qualunque sistema di riferimento inerziale, sono detti "non inerziali", in quanto in essi non vale il Principio d'inerzia, se si considerano soltanto le cosiddette "forze reali", ovvero le forze agenti in un sistema inerziale. Per estendere ai sistemi non inerziali il Principio d'Inerzia, e quindi la legge fondamentale della dinamica ($\underline{F} = m\underline{a}$), occorre considerare, oltre le forze reali, altre forze, dette "fittizie" o "apparenti" o "forze d'inerzia".

In particolare, nello studio del moto di un corpo rispetto a un sistema di riferimento non inerziale in moto rotatorio rispetto a un sistema inerziale, è necessario considerare la forza fittizia di Coriolis.⁴ Poiché la Terra ruota attorno al proprio asse, un qualunque sistema di riferimento solidale con la Terra è non inerziale. La forza di Coriolis, quindi, deve essere considerata nello studio della caduta libera di un grave, che è riferita alla Terra e non al sistema di riferimento delle stelle fisse.⁵

Il teorema di Coriolis stabilisce la relazione fra le grandezze cinematiche di un moto "assoluto" (il moto rispetto a un riferimento inerziale) e di un moto "relativo" (il moto rispetto a un riferimento non inerziale) in dipendenza dei simultanei valori delle corrispondenti grandezze cinematiche del moto del riferimento non inerziale rispetto al riferimento inerziale (moto di trascinamento). Il teorema di Coriolis si può enunciare nel seguente modo:

4 Gaspard Gustave de Coriolis (1792-1843), matematico, fisico e ingegnere meccanico francese.

5 Pertanto, alla forza peso devono essere aggiunte due forze fittizie: la forza centrifuga e la forza centrifuga composta o forza di Coriolis, per effetto delle quali il grave cade in un punto leggermente ad oriente e anche verso l'equatore (in entrambi gli emisferi). In prima approssimazione si può trascurare la deviazione verso l'equatore. Fin dai tempi di Newton sono state compiute numerose esperienze accurate (anche in pozzi di miniera) che hanno mostrato che un grave in caduta libera toccava il suolo in un punto leggermente ad est rispetto alla verticale. Celebre è rimasto l'esperimento ripetuto diverse volte nel 1791 dal fisico Giovanni Battista Guglielmini (1760-1817). Dalla sommità della Torre degli Asinelli a Bologna (alta 97 m) fece cadere delle sfere di piombo, che raggiunsero il suolo 1,7 centimetri ad oriente rispetto alla verticale stabilita con il filo a piombo. I calcoli invece danno come risultato 2,35 cm.

L'accelerazione assoluta $\underline{a}_a$ di un punto materiale P è uguale alla somma vettoriale delle accelerazioni relativa $\underline{a}_r$, di trascinamento $\underline{a}_t$ e di Coriolis $\underline{a}_c = 2\underline{\Omega}_t \wedge \underline{v}_r$, essendo $\underline{\Omega}_t$ la velocità angolare di trascinamento, ovvero la velocità angolare del sistema non inerziale rispetto a quello inerziale, $\underline{v}_r$ la velocità relativa di P rispetto al sistema non inerziale.

In formule:

$$\underline{a}_a = \underline{a}_r + \underline{a}_t + \underline{a}_c$$

L'accelerazione di Coriolis è nota anche con i nomi di accelerazione complementare e accelerazione centrifuga composta.

4 - Un serio ostacolo all'affermazione della teoria copernicana

Se consideriamo, per esempio, i punti della Terra che si trovano al 45° parallelo (che in Italia corrisponde circa alla latitudine di Torino e Milano), si calcola facilmente che essi si muovono da occidente verso oriente alla velocità di circa 1180 Km/h, pari a circa 328 m/s. Componendo il moto proprio di rotazione della Terra con quello di rivoluzione attorno al Sole, di circa 30 Km/s, seguendo il ragionamento di Aristotele, un uomo che spicasse un salto verticale, la cui durata complessiva di salita e discesa fosse di un secondo, dovrebbe “atterrare” in un punto più ad occidente, rispetto a quello da cui ha spiccato il salto, di ben 30 chilometri e 328 metri! Ma questo in realtà non accade e allora – concludeva Aristotele – abbiamo la prova che la Terra non si muove!

Copernico stesso, Giovanni Keplero e Tommaso Campanella non riuscirono a dare una risposta a tale argomentazione, a danno della piena affermazione della teoria eliocentrica.

5 - La soluzione del problema: il Principio d'Inerzia

Il merito di riuscire definitivamente a controbattere l'obiezione aristotelica al moto della Terra, contenuta nel *Del Cielo*, spetta a

Giordano Bruno (1548-1600) e Galileo Galilei (1564-1642), ai quali si può attribuire la scoperta del Principio d’Inerzia e del conseguente Principio di Relatività Classica.

A onor del vero, già nel 1440 in Niccolò Cusano era presente in maniera velata l’idea del Principio d’Inerzia quando, per dimostrare la relatività del moto, scriveva ricorrendo al classico esempio della nave, che sarà successivamente ripreso da Bruno e Galilei:

Se infatti uno, stando su una nave, non vedesse spiaggia, come mai potrebbe arguire che la nave si muove? (Cusano, 1440, XIII capitolo, II Libro).

La prima formulazione esplicita e inequivocabilmente chiara del Principio d’Inerzia, nella forma che noi oggi conosciamo, si trova nella monumentale opera *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, presentata alla Royal Society a Londra il 25 aprile 1685 da Isaac Newton (1642-1726), ‘che lo enuncia come la prima delle leggi fondamentali della dinamica (Newton, 1687, *Axiomata sive Leges Motus*, p. 12):

Ogni corpo persevera nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, se ad esso non viene applicata una forza in grado di mutarne lo stato.

Per una approfondita analisi dei prodromi del Principio di Inerzia si rimanda a (Nicotra, 2022a, pp. 91-101).

Il Principio d’Inerzia, in tutti i suoi elementi, è chiaramente applicato già da Giordano Bruno nel Dialogo Terzo de *La cena de le ceneri* dove, per dare una prova della falsità delle argomentazioni di Aristotele contro il moto della Terra, a sostegno invece del sistema copernicano, il filosofo di Nola escogita due esperimenti.

Nel primo immagina un uomo sulla Terra che lancia verticalmente in alto un sasso, come descritto da Aristotele nel *Del Cielo*.

Nel secondo, invece, costruisce un complesso doppio esperimento “mentale”, che comprende quello della nave già usato precedentemente in forme più semplici da Giovanni Buridano, Nicola

6 Ma stampata nel 1687.

d'Oresme e Niccolò Cusano: due uomini, uno sulla nave e uno sulla terraferma, lasciano cadere una stessa pietra nello stesso istante e dallo stesso punto. I risultati del doppio esperimento sono molto diversi se valutati nel sistema di riferimento "mobile" della nave oppure nel sistema di riferimento "fisso" della terraferma. Vediamo come si esprime in proposito Bruno per bocca di Smitho (Bruno, 1584):

(Smitho⁷) - M'avete sufficientissimamente soddisfatto, ed altamente aperto molti secreti de la natura, che sotto questa chiave sono ascosi. Da quel che respondete a l'argomento tolto da venti e nuvole, si prende ancora la risposta del 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.

Qual è la soluzione che per primo Giordano Bruno propone, per spiegare ciò che avviene in realtà? Eccola, sempre dal Dialogo Terzo de *La Cena de le ceneri* per bocca di Teofilo, che comincia subito a far notare, con l'analogia della nave, che il movimento della Terra non può essere rilevato dal movimento dei corpi che si trovano su di essa, perché il moto della Terra non altera i moti dei corpi ad essa appartenenti, in quanto essi partecipano dello stesso moto della Terra («Con la terra dunque si muovono tutte le cose che si trovano in terra»). Ciò equivale ad affermare il Principio di Inerzia e il conseguente Principio di Relatività classico: i fenomeni meccanici avvengono nello stesso modo in due riferimenti in moto rettilineo l'uno rispetto all'altro con velocità costante («muovasi quanto si voglia la nave, pur

7 Smitho (da Smith) rappresenta l'inglese colto, di mentalità aperta, animato da sincera curiosità e privo di pregiudizi accademici. Corrisponde all'intelligente interlocutore Sagredo del *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* di Galileo Galilei.

che non faccia degl'inchini»), Quindi da essi non si può arguire quale dei due riferimenti è fermo e quale si muove:

(Teofilo⁸) - Con la terra dunque si muovono tutte le cose che si trovano in terra. Se dunque dal loco extra la terra qualche cosa fusse gittata in terra, per il moto di quella perderebbe la retitudine. Come appare nella nave A B [fig. 6], la qual, passando per il fiume, se alcuno che se ritrova nella sponda di quello C venga a gittar per dritto un sasso, verrà fallito il suo tratto per quanto comporta la velocità del corso. 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 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 vegna. Cossi, 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 quanto si voglia la nave, pur che non faccia degl'inchini⁹ [ovvero purché il suo moto sia uniforme rettilineo].

(Smitho) - Dalla considerazione di questa differenza s'apre la porta a molti ed importantissimi secreti di natura e profonda filosofia; ...

Qui Bruno spiega in maniera più esplicita e chiara il doppio esperimento della caduta della pietra all'interno della nave e fuori di essa:

(Teofilo) - 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

8 Teofilo è l'alter ego di Giordano Bruno come Salviati è l'alter ego di Galileo Galilei nel suo *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*.

9 Nell'esperimento della nave il moto, per piccole distanze può essere ottimamente approssimato a rettilineo a velocità costante, pur muovendosi la nave sulla superficie sferica della Terra. Il percorso della nave, nel brevissimo tempo necessario per la caduta del sasso dalla cima dell'albero, si discosta infatti da quello rettilineo per quantità veramente trascurabili.

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 raggione, 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.**

In termini moderni, il doppio esperimento di caduta della stessa pietra, immaginato da Bruno, si traduce nel considerare lo stesso fenomeno di libera caduta di un grave rispetto a un sistema di riferimento considerato fermo (la terraferma) e rispetto a un altro sistema di riferimento in moto rispetto al primo (la nave). L'idea è semplice quanto geniale. Bruno, in maniera sottintesa, prende in considerazione il concetto di moto di trascinamento della moderna meccanica razionale, considerando simultaneamente due sistemi di riferimento: quello "assoluto e fermo" della spiaggia e quello "re-



Fig. 3 – La figura 6, menzionata nel dialogo terzo di La Cena de le ceneri di Giordano Bruno, ad illustrazione dell'esperimento della nave. Stranamente non figurano le lettere A, B, C, D, E menzionate nel testo.

lativo e mobile” della nave. Il moto di trascinamento è quello della nave rispetto alla spiaggia.

Bruno non specifica il tipo di moto della nave, ma si arguisce che lo intenda senz'altro rettilineo (*muovasi quanto si voglia la nave, pur che non faccia degl'inchini*) e probabilmente anche uniforme. Pur non specificando se la velocità è costante o se il moto è accelerato, le sue conclusioni sulla forma della traiettoria del grave in caduta libera sulla spiaggia, "vista dalla nave", sono valide in entrambi i casi, in quanto Bruno molto prudentialmente, senza sbilanciarsi nei particolari, la qualifica «*tralasciata a dietro*».

Dalla meccanica razionale sappiamo che la traiettoria è parabolica con concavità verso il basso o rettilinea inclinata verso la terraferma, rispettivamente nel caso di allontanamento della nave con moto rettilineo uniforme (velocità costante) o con moto uniformemente accelerato (accelerazione costante). Fisicamente il fenomeno è evidente: mano a mano che la pietra scende lungo la verticale nel sistema di riferimento fermo, la nave si allontana da questo e quindi da essa si “vedono” le successive posizioni della pietra durante la sua caduta arretrate orizzontalmente. E questo accade sia nel caso della traiettoria parabolica sia nel caso della traiettoria rettilinea inclinata. Il doppio esperimento di Bruno pone quindi in evidenza anche la relatività della traiettoria del moto di un corpo in dipendenza del sistema di riferimento considerato. Nell'Appendice è mostrato come ottenere la traiettoria del grave vista dalla nave nei due casi sopra accennati.

Le parole di Teofilo esprimono implicitamente e in maniera suggestiva il Principio d’Inerzia, anche se non nella forma esplicita odierna. La pietra lasciata cadere all’interno della nave cade perpendicolarmente rispetto a questa (tralasciando la correzione dovuta alla forza di Coriolis) perché, non essendo ad essa applicata nessuna forza orizzontale in grado di modificarne il moto nella direzione della rotta della nave, anche quando è in aria tende a mantenere il moto rettilineo uniforme che condivideva con la nave prima del lancio («... *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»).

Galilei riprende le argomentazioni di Bruno per dimostrare non che la Terra si muove, bensì la fallacia delle argomentazioni di Aristotele contro il moto della Terra, contenute nel *Del Cielo*. Lo fa ancora una volta con l'esempio della nave, che diventa il «*gran navilio*» della seconda giornata del *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, tolemaico e copernicano*, proponendo una serie di esperimenti. Rispetto a Bruno, Galilei è più preciso (per esempio sottolinea la ragione per cui le esperienze debbano compiersi sotto coperta e non sul ponte esterno della nave) e ricco di casi di movimenti all'interno della nave. Egli osserva esplicitamente che essi avvengono nella stessa maniera sia nella nave ferma sia nella nave in moto uniforme rettilineo, affermando pertanto il Principio di Relatività, poi detta classica o galileiana in suo onore, per distinguerla da quella di Einstein, che è poi una sua estensione dai fenomeni meccanici a quelli elettromagnetici. In tal modo Galilei dimostra che le argomentazioni aristoteliche contro il moto della Terra sono fallaci, in quanto nessun fenomeno meccanico (in particolare la caduta libera di un grave) che avviene all'interno della nave (generalizzando diremo all'interno di un sistema isolato) è in grado di rivelare lo stato di moto o di quiete della nave, avvenendo nello stesso modo in entrambi i casi.

Allora, per analogia si può sostituire la Terra alla nave e lo spazio siderale alla terraferma. Se la Terra si muove di moto rettilineo uniforme nello spazio,¹⁰ la pietra lanciata verticalmente in alto ricade verticalmente nello stesso punto da cui è stata lanciata, come nell'analogo caso della nave, per la stessa ragione: il Principio di Inerzia, ignorato da Aristotele, e quindi per il conseguente Principio di Relatività classica.

Ma sentiamo cosa dice Galilei:

E qui, per ultimo sigillo della nullità di tutte le esperienze addotte, mi par tempo e luogo di mostrar il modo di sperimentarle tutte facilissimamente. Riserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, quivi

10 Affermazione valida in intervalli di tempo trascurabili rispetto a quelli di rivoluzione completa della Terra attorno al Sole.

fate d'aver mosche, farfalle e simili animaletti volanti; siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; sospendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vadia versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso: e stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animaletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza; i pesci si vedranno andar notando indifferentemente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto; e voi, gettando all'amico alcuna cosa, non più gagliardamente la dovrete gettare verso quella parte che verso questa, quando le lontananze sieno eguali; e saltando voi, come si dice, a piè giunti, eguali spazii passerete verso tutte le parti. Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benché niun dubbio ci sia che mentre il vassello sta fermo non debbano succeder così, fate muover la nave con quanta si voglia velocità; ché (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina o pure sta ferma: voi saltando passerete nel tavolato i medesimi spazii che prima, né, perché la nave si muova velocissimamente, farete maggior salti verso la poppa che verso la prua, benché, nel tempo che voi state in aria, il tavolato sottopostovi scorra verso la parte contraria al vostro salto; e gettando alcuna cosa al compagno, non con più forza bisognerà tirarla, per arrivarlo, se egli sarà verso la prua e voi verso poppa, che se voi fuste situati per l'opposito; le goccioline cadranno come prima nel vaso inferiore, senza caderne pur una verso poppa, benché, mentre la gocciola è per aria, la nave scorra molti palmi; i pesci nella lor acqua non con più fatica noteranno verso la precedente che verso la susseguente parte del vaso, ma con pari agevolezza verranno al cibo posto su qualsivoglia luogo dell'orlo del vaso; e finalmente le farfalle e le mosche continueranno i lor voli indifferentemente verso tutte le parti, né mai accaderà che si riduchino verso la parete che riguarda la poppa, quasi che fussero stracche in tener dietro al veloce corso della nave, dalla quale per lungo tempo, trattenendosi per aria, saranno state separate; e se abbruciando alcuna lagrima d'incenso si farà un poco di fumo, vedrassi ascender in alto ed a guisa di nugoletta trattenervisi, e indifferentemente muoversi non più verso questa che quella parte (Favaro, 1890-1909, Vol. VII, *Dialogo*, pp. 212-213).

Galilei stesso "spiega" il Principio di Relatività proprio ricorrendo al Principio d'Inerzia, dal quale soltanto può derivare (Ibidem, p. 214):

E di tutta questa corrispondenza d'effetti ne è cagione l'esser il moto della nave comune a tutte le cose contenute in essa ed all'aria ancora, che per ciò dissi io che si stesse sotto coverta; ché quando si stesse di sopra e nell'aria aperta e non seguace del corso della nave, differenze più e men notabili si vedrebbero in alcuni de gli effetti nominati: e non è dubbio che il fumo resterebbe in dietro, quanto l'aria stessa; le mosche parimente e le farfalle, impedita dall'aria, non potrebbero seguir il moto della nave, quando da essa per spazio assai notevole si separassero; ma trattenendovisi vicine, perché la nave stessa, come di fabbrica anfrattuosa, porta seco parte dell'aria sua prossima, senza intoppo o fatica seguirebbon la nave, e per simil cagione veggiamo tal volta, nel correr la posta, le mosche importune e i tafani seguir i cavalli, volandogli ora in questa ed ora in quella parte del corpo; ma nelle gocciol cadenti pochissima sarebbe la differenza, e ne i salti e ne i proietti gravi, del tutto impercettibile (Favaro, 1890-1909, Vol. VII, *Dialogo*, p. 214).

Certamente la spiegazione data («E di tutta questa corrispondenza d'effetti ne è cagione l'esser il moto della nave comune a tutte le cose contenute in essa ed all'aria ancora») non è esplicitamente ricondotta al Principio d'Inerzia, ma lo è in maniera sottaciuta.¹¹ Oggi diremmo che

11 Molto esplicito, invece, il riferimento al Principio d'Inerzia nell'opera *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti* del 1613 (Favaro, 1890-1909, Vol. V, pp. 134-135):

«Imperò che mi par di osservare che i corpi naturali abbino naturale inclinazione a qualche moto, come i gravi al basso, il qual movimento vien da loro, per intrinseco principio e senza bisogno di particolar motore esterno, esercitato, qual volta non restino da qualche ostacolo impediti; a qualche altro movimento hanno ripugnanza, come i medesimi gravi al moto in su, e però già mai non si moveranno in cotal guisa, se non cacciati violentemente da motore esterno; finalmente, ad alcuni movimenti si trovano indifferenti, come pur gl'istessi gravi al movimento orizzontale, al quale non hanno inclinazione, poi che ei non è verso il centro della Terra, né repugnanza, non si allontanando dal medesimo centro: e però, rimossi tutti gl'impedimenti esterni, un grave nella superficie sferica, e concentrica alla Terra sarà indifferente alla quiete, ed ai movimenti verso qualunque parte dell'orizzonte; ed in quello stato si conserverà, nel qual una volta sarà stato posto; cioè se sarà messo in stato di quiete, quello conserverà, e se sarà posto in movimento, v.g. verso occidente, nell'istesso si manterrà: e così una nave per essemplio avendo una sol volta ricevuto qualche impeto per il mar tranquillo, si moverebbe continuamente intorno al nostro globo senza cessar mai, e postavi con quiete, perpetuamente quieterebbe, se nel primo caso si potessero rimuovere tutti gl'impedimenti estrinseci, e nel secondo qualche causa motrice esterna non gli sopraggiungesse».

«l'esser il moto della nave comune a tutte le cose contenute in essa» non è altro che una conseguenza del fatto che su tutto ciò che è contenuto all'"interno" della nave (Galileo lo specifica puntualmente: *«per ciò dissi io che si stesse sotto coverta»*) non agisce nessuna forza netta in grado di mutarne il moto rettilineo uniforme condiviso con la nave. Dunque, nessuna esperienza meccanica condotta all'interno della nave è in grado di distinguere se la nave sta ferma o si muove di moto rettilineo uniforme.

Galilei, dunque, con straordinaria ricchezza di esempi, illustra lo stesso Principio d'Inerzia già evidenziato da Bruno, ma va oltre, perché esprime esplicitamente anche una sua conseguenza fondamentale, il Principio di Relatività: *«voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti»*, (detto perciò Principio di Relatività classica o di Bruno-Galilei). In forma moderna: *nessuna esperienza meccanica eseguita all'interno di un sistema isolato (ovvero soggetto a forza risultante nulla e quindi per il Principio d'Inerzia in quiete o in moto rettilineo uniforme) può rivelarci se esso è fermo o si muove di moto rettilineo uniforme, ovvero le leggi della meccanica sono invarianti rispetto a sistemi quiescenti o in moto rettilineo uniforme*. Le parole di Galileo Galilei ci rivelano anche che, essendo derivabile dal Principio d'Inerzia, il Principio di Relatività classica non è, a rigore, un "principio", ma più correttamente una legge, essendo un corollario del Principio d'Inerzia.

6 - Conclusioni

Tuttavia, va detto che il caso del grave gettato verticalmente in alto che cade nello stesso punto di partenza, posto da Aristotele per provare l'immobilità della Terra, è molto interessante, perché l'accettazione *tout court* del risultato dell'esperienza conduce alle conclusio-

La formulazione più completa del Principio d'Inerzia da parte di Galilei è quella contenuta nell'incipit della Giornata Quarta dei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica ed i movimenti locali*, essendo chiaramente presenti i suoi due elementi caratteristici: la rettilineità del moto e la velocità costante (moto equabile e perpetuo) (Nicotra, 2022b, pp. 80-87).

ni errate di Aristotele poiché ignora l'esistenza e l'applicazione del Principio d'Inerzia. In fondo Aristotele, non conoscendo il Principio d'Inerzia, si comportava come un buon fisico sperimentatore dei giorni nostri, applicando il principio che è alla base della scienza moderna: la validazione sperimentale delle teorie scientifiche. Gli antichi, per conoscere il futuro o la verità di un fatto si rivolgevano agli dei negli oracoli (il più famoso era quello di Delo). La Scienza moderna, che superficialmente sembra aver eliminato l'idea di Dio, in realtà l'ha soltanto sostituita con una non metafisica e non mitologica: il *Deus sive Natura* di Spinoza. Per conoscere la verità, i fisici hanno moltiplicato e modernizzato gli antichi oracoli, che son diventati i loro laboratori, dove con gli esperimenti interrogano la Natura (il nuovo Dio della Scienza) per conoscere se le loro "ipotesi" possano assurgere al rango di "teorie" validate e certificate dai risultati sperimentali. Aristotele si è comportato come si sarebbe comportato un fisico sperimentale dei nostri tempi. Però ha tratto una conclusione errata da un esperimento che, in quanto responso del *Deus sive Natura*, non può che affermare il vero. Non l'esperimento è falso, bensì l'interpretazione del suo risultato, che sembra molto semplice e logica. Ma allora, le "nostre" conclusioni che si traggono dalle risposte della Natura, contenute nei "nostri" esperimenti, sono sempre affidabili e categoriche? Possono essere prese *tout court* come giudizi definitivi e veraci? O forse possono celare principi fisici e leggi ancora ignoti e trarci quindi in conclusioni errate, come nel caso di Aristotele? Ma quali strumenti abbiamo per smascherare tali inganni della Natura?

Il caso qui posto mostra chiaramente quanto errata fosse l'idea del positivismo di Comte, per il quale la scienza deve essere costituita soltanto da idee, ipotesi e teorie che non superano la realtà dei dati direttamente esperibili, affermando quindi l'oggettività assoluta del "fatto".

Werner Heisenberg anteponeva il pensiero filosofico a quello scientifico (per questo Ettore Majorana andava d'accordo con Heisenberg e non con Fermi, privo di mentalità filosofica):

Ogni lavoro scientifico si sviluppa, consciamente o inconsciamente, a partire da un'impostazione filosofica, da una determinata struttura mentale, che fornisce al pensiero un

fondamento stabile. Senza una simile impostazione, difficilmente i concetti e i nessi concettuali potrebbero conseguire quel grado di chiarezza e di univocità che è il presupposto di ogni lavoro scientifico. Quasi tutti i ricercatori sono pronti ad accogliere nuovi contenuti d'esperienza e a riconoscere nuovi risultati che rientrino nel quadro della loro impostazione filosofica (Heisenberg, 1974).

Tuttavia Heisenberg, poco oltre nello stesso scritto, si affretta anche a riconoscere il processo inverso, che vede modificare una certa impostazione filosofica in conseguenza di esperienze non altrimenti comprensibili:

...nel progresso della scienza può accadere però che un nuovo campo d'esperienza divenga pienamente comprensibile solo quando si compia l'enorme sforzo di ampliare questo quadro e di modificare la struttura stessa del pensiero.

È evidente l'allusione sia ai radicali mutamenti del pensiero filosofico riguardo i concetti di tempo e spazio, introdotti dalla Teoria della Relatività di Albert Einstein, sia alla rinuncia del concetto tradizionale di traiettoria per gli elettroni, da Heisenberg stesso proposta per interpretare correttamente i risultati sperimentali sulle radiazioni di corpo nero e che sarà un tratto distintivo della nuova meccanica quantistica.

Dunque, quanta cautela occorre per trattare correttamente il responso dei moderni oracoli della Scienza!

Appendice

L'esperimento di Bruno impostato con la meccanica razionale

La traiettoria del grave in caduta libera dipende dal sistema di riferimento al quale viene riferita.

Nel sistema di riferimento solidale con la terraferma (convenzionalmente assunto come "assoluto") la traiettoria è rettilinea: verticale se si trascura il moto di rotazione terrestre, inclinata verso est se invece se ne tiene conto, per effetto dell'accelerazione di Coriolis.

Nel sistema di riferimento solidale con la nave (convenzionalmente assunto come "relativo") la traiettoria è parabolica o rettilinea inclinata verso la terraferma, a seconda che la nave si muova di moto rettilineo uniforme (velocità costante) o di moto rettilineo uniformemente accelerato (accelerazione costante).

Per trovare qual è la traiettoria del grave vista dalla nave, ma lasciato cadere sulla terraferma, occorre applicare il teorema di Coriolis, ricordato nella nota 5, che stabilisce la relazione fra le accelerazioni del moto di un punto materiale P in due sistemi di riferimento: uno considerato "fisso" e convenzionalmente denominato "assoluto", e l'altro in moto rispetto al primo e perciò denominato "mobile" e convenzionalmente denominato "relativo":

$$(1) \quad \underline{a}_a = \underline{a}_r + \underline{a}_t + \underline{a}_c$$

Trascurando il moto di rotazione terrestre, e quindi l'accelerazione di Coriolis, dalla (1) si ha:

$$(1)' \quad \underline{a}_r = \underline{a}_a - \underline{a}_t$$

e ancora, essendo l'accelerazione assoluta l'accelerazione di gravità g :

$$\underline{a}_r = \underline{g} - \underline{a}_t$$

da cui, integrando fra 0 e t , tenendo conto che la velocità iniziale del grave è nulla:

$$(2) \quad \underline{v}_r = \underline{g}t - \underline{v}_t$$

Distinguiamo due casi principali:

1. moto orizzontale di allontanamento della nave a velocità costante pari alla velocità di trascinamento $\underline{v}_t$;
2. moto orizzontale di allontanamento della nave con accelerazione costante pari all'accelerazione di trascinamento $\underline{a}_t$.

Consideriamo, per semplicità, il problema piano.

Sia XOY il sistema di riferimento fisso, solidale con la terraferma, avente l'asse X orizzontale orientato nel verso di allontanamento

della nave, l'asse Y verticale orientato verso il basso e l'origine O nel punto da cui inizia la caduta libera del grave.

Sia $\xi\Omega\eta$ il sistema di riferimento mobile, solidale con la nave, avente l'asse ξ coincidente con l'asse X, l'asse η verticale orientato verso il basso e l'origine Ω sull'orizzontale passante per O.

1° caso ($\underline{v}_t = \text{costante}$)

Proiettando la (2) sugli assi coordinati ξ e η :

$$v_{r\xi} = -v_t, \quad v_{r\eta} = gt$$

da cui, integrando fra 0 e t:

$$(3) \quad \xi = -v_t t, \quad \eta = (1/2)gt^2$$

dalle quali, eliminando il tempo, si ottiene la traiettoria del grave vista dalla nave:

$$(4) \quad \eta = (g/2v_t^2)\xi^2$$

che è l'equazione di una parabola con la concavità nel verso positivo dell'asse η , ovvero verso il basso.

2° caso ($\underline{a}_t = \text{costante}$)

Il moto della nave è uniformemente accelerato.

Pertanto $\underline{v}_t = \underline{a}_t t$ e la (2) diventa:

$$(2)' \quad \underline{v}_r = \underline{g}t - \underline{a}_t t$$

Proiettando la (2)' sugli assi coordinati ξ e η :

$$v_{r\xi} = -a_t t, \quad v_{r\eta} = gt$$

da cui, integrando fra 0 e t:

$$(4) \quad \xi = -(1/2) a_t t^2, \quad \eta = (1/2) g t^2$$

dalle quali, eliminando il tempo, si ottiene la traiettoria del grave vista dal sistema di riferimento mobile, solidale con la nave:

$$(5) \quad \eta = - (g/a) \xi$$

che è l'equazione di una retta di coefficiente angolare g/a inclinata verso la terraferma.

Bibliografia

ARISTOTELE (2008). *Aristotele*, volume primo, "I classici del pensiero", Milano: Mondadori, p.374; *Del Cielo* (II) 14 296b 21.

BRUNO Giordano (1584). *Cena de le ceneri*. Anche online: https://www.liberliber.it/mediateca/libri/b/bruno/cena_de_le_ceneri/pdf/cena_d_p.pdf.

CUSANO Niccolò (1440). *De Docta Ignorantia*.

Favaro Antonio (cur.) (1890-1909). *Le Opere di Galileo Galilei. Edizione Nazionale, 1890-1909*, Voll. 20. Ristampe: 1929-1939 e 1964-1968. Firenze: Barbera.

HEISENBERG Werner (1974). "Introduzione". In Albert Einstein, Hedwig Born, Max Born, *Scienza e vita, carteggio 1916-1955 fra Albert Einstein e Max Born*. Torino: Einaudi.

NEWTON Isaac (1687). *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. Londini: Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

NICOTRA Luca (2022a). "The authorship of the Principle of Inertia". Part I. In «*Science & Philosophy*» Volume 10(1), 2022.

NICOTRA Luca (2022b). "The authorship of the Principle of Inertia". Part II. In «*Science & Philosophy*» Volume 10(2), 2022.

70 anni di Intelligenza Artificiale

Cos'è - Come funziona - Limiti - Rischi

a cura di
Luca Nicotra



Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence, 1956.

Contributi di:

Luca Nicotra, Pierluigi Assogna, Paolo Severino Manca,
Luigi Campanella, Giordano Bruno, Ezio Sciarra,
DUILIO Carpitella, Armando Guidoni, Leonardo Maria Rocca,
Carmela Silvia Messina, Mariangela Vanalli, Andrea Manzo,
Vincenzo Luca Messina, Violetta Chiarini.

numero
16

in riga
edizioni 
Tecnologia
e innovazione

ArteScienza

Rivista telematica semestrale

<http://www.assculturale-arte-scienza.it>

Direttore Responsabile: Luca Nicotra

Direttori onorari: Giordano Bruno, Pietro Nastasi

Redazione: Angela Ales Bello, Gian Italo Bischì, Luigi Campanella,

Isabella De Paz, Franco Eugeni, Maurizio Lopa, Paolo Severino Manca, Ezio Sciarra

Registrazione n.194/2014 del 23 luglio 2014 Tribunale di Roma - ISSN on-line 2385-1961