

Il principio d'inerzia negli ultimi scritti di Galilei

Roberto Vergara Caffarelli*

The present paper discusses the Law of Inertia, along the lines of the last Galileo's work: *Added Day: On the Force of Percussion*. In that work Galileo explicitly assumes the Law of Inertia to be true and verifies it with some experiments. A reconstruction of his experiment is carried out with success.

Este trabajo estudia la Ley de la Inercia de acuerdo con el último trabajo de Galileo: Jornada añadida: Della forza della percossa. En ese trabajo Galileo asume explícitamente la verdad de esa ley y la verifica con algunos experimentos. Se presenta una reconstrucción de sus experimentos desarrollada con éxito.

Il principio d'inerzia di Galilei

È OPINIONE LARGAMENTE CONDIVISA che Galileo scrisse il *De motu* negli anni in cui fu professore a Pisa tra il 1589 e il 1592. Uno dei capitoli è dedicato al piano inclinato, dove vi sono due contributi originali di rilievo:

- 1) la dimostrazione che la forza di gravità lungo il piano è proporzionale al seno dell'angolo. Si tratta di un fattore moltiplicativo che è misurabile direttamente, con la bilancia o con una carrucola e un contrappeso. La prima legge del piano inclinato non dipende dalla relazione che Galileo troverà più tardi a Padova con gli esperimenti: lo spazio percorso cresce con il quadrato del tempo ($s \approx kt^2$), ma è fondamentale per tutti i suoi successivi studi.¹
- 2) la prima formulazione del principio d'inerzia.

Ritroviamo i due contributi, espressi in forma pressoché immutata, nei suoi scritti più importanti e nell'ultima giornata dei *Discorsi sopra due nuove scienze*, quella dedicata alla forza della percossa, rimasta sconosciuta fino al 1718.²

Con rare eccezioni, gli storici della scienza ritengono che a Galileo non spetti la piena paternità del principio d'inerzia, fondamentale per la comprensione della meccanica e della cosmologia, la prima legge che lo

* Dipartimento di Fisica Enrico Fermi - Università di Pisa. Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Sezione di Pisa. Largo Bruno Pontecorvo n° 3, 56127 Pisa, Italia.

¹ La seconda legge del piano inclinato è quella che assegna uguale velocità finale a corpi che scendono lungo piani inclinati di uguale altezza, anche se di diversa inclinazione.

² Galilei (1718): «Giornata sesta del Galileo, Della forza della percossa. Da aggiugnersi a i Discorsi e alle Dimostrazioni matematiche intorno alle due nuove scienze appartenenti alle meccaniche ed a i movimenti locali».

stesso Newton gli attribuisce. Il più influente studioso di questo partito è Alexandre Koyré, che ha dedicato metà dei suoi *Studi galileiani* a discutere l'argomento, dai suoi presupposti fino alle conseguenze cosmologiche.³ I punti essenziali del suo giudizio sono i seguenti:

a) per Galileo la persistenza del movimento è una situazione privilegiata esclusiva del moto circolare; il moto rettilineo, possibile solo nella caduta, non è un moto inerziale:

«La via che conduce al principio d'inerzia era, per Galileo, sbarrata dall'esperienza astronomica del moto circolare dei pianeti».⁴

b) Il piano orizzontale *reale* è una superficie sferica: Galileo non può fare astrazione della pesantezza, qualità naturale dei gravi.

c) Un movimento rettilineo dei gravi è una cosa impossibile:

«...se la dinamica di Galileo è, nella sua più profonda sostanza, archimedeica e interamente fondata sulla nozione della pesantezza, è evidente che Galileo non poteva formulare il principio d'inerzia. Infatti, non l'ha mai formulato».

La conclusione di Koyré è questa:

«...In linea di principio, il carattere privilegiato del moto circolare è energeticamente combattuto: è il movimento in quanto tale che si conserva, e non il moto circolare. In linea di principio. Ma, in realtà, il Dialogo non si spinge oltre. E checché se ne sia detto, non giungiamo mai, né mai giungeremo, fino al principio d'inerzia. Mai, nei Discorsi come nel Dialogo, Galileo affermerà la conservazione del moto rettilineo. Ciò per la semplice ragione che un tale movimento rettilineo dei gravi è una cosa impossibile, e che –per Galileo– dei corpi non gravi cesserebbero di esser corpi e non potrebbero muoversi affatto».⁵

Un elemento essenziale della discussione di Koyré è la negazione degli esperimenti. Un primo esempio lo troviamo quando negli *Studi galileiani* discute l'argomento principe contro il moto della terra, quello della pietra lasciata cadere dall'alto dell'albero di una nave. All'osservazione di Salviati: «Nessuno ha mai fatto questa esperienza», in una nota, Koyré scrive,

«Galileo ha ragione: nessuno ha mai fatto questa esperienza [...] In realtà, l'esperienza della nave non fu realizzata che nel 1641; da Gassendi. Essa ebbe una grandissima risonanza».⁶

Koyré, nello scrivere così, ha dimenticato che nella *Lettera a Francesco Ingoli in risposta alla disputatio de situ et quiete terrae* Galileo aveva scritto (il grassetto del periodo è mio):

³ Koyré, (1976), pp.161-350.

⁴ Koyré, (1976), p. 263

⁵ Koyré, (1976), pp.242-243

⁶ Koyré, (1976), pp.228.

«Ed una di tali esperienze è appunto questa del sasso cadente dalla sommità dell'albero nella nave, il quale va sempre a terminare e a ferire nell'istesso luogo, tanto quando la nave è in quiete quanto mentre ella velocemente cammina, e non va, come essi 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, al dir quello ch'è il contrario in effetto, hanno anco aggiunto la bugia, dicendo d'aver ciò veduto dall'esperienza, **ed io ne ho fatto l'esperienza**, avanti la quale il natural discorso mi aveva molto fermamente persuaso che l'effetto doveva succedere come appunto succede: né mi fu difficil cosa il conoscer l'inganno loro, i quali, figurandosi uno che stando ferma la nave, fusse in cima all'albero, e così, stando il tutto in quiete, di lì lasciasse cadere un sasso, non avvertirno poi, che quando la nave era in moto, il sasso non si partiva più dalla quiete, atteso che e l'albero e l'uomo in cima e la sua mano e 'l sasso ancora si moveano con la medesima velocità che tutto il vassello». ⁷

Galileo, dunque, veramente ha fatto l'esperienza sulla nave. Era per lui una necessità, perché il classico argomento contro il moto della terra doveva essere reso innocuo. Dal punto di vista teorico è con la meccanica che ne mostra l'inefficacia.

Possiamo dedurre quanto è antica la sua esperienza da un passo di una lettera di Mario Guiducci, datata Roma 13 settembre 1624:

«Scrissi a V.S. la settimana passata, e le diedi conto delle visite fattemi dal P. Grasso. (...) Ieri, essendo io stato invitato da un Padre mio amico, maestro di retorica, a sentire una sua Orazione, ed essendovi andato, subito il Sarsi venne alla volta mia, nè mi lasciò sino a che mi partii del Collegio. I nostri ragionamenti furon tutti sopra una proposizione di V.S., la quale egli diceva essergli stata detta da un Padre Andrea Greco, persona principalissima nella sua religione, il quale diceva di averla già sentita da V.S. in Padova, cioè che un corpo lasciato cadere perpendicolarmente da una gaggia di nave cadeva rasente e a piè dell'albero, tanto se si movesse come se stesse ferma la nave».

Il Padre Andrea Greco è certamente Eudaemon Joannes Andreas, nato a Creta nel 1566, gesuita, che si trovò ad insegnare a Padova fin dal 1599 e che lasciò quella città probabilmente intorno al 1604.⁸

In una pagina successiva Koyré è definitivamente più esplicito:

«Una fisica archimedeica vuol dire una fisica matematica deduttiva e astratta: tale sarà la fisica che Galileo svilupperà a Padova. Fisica

⁷ Galilei (1968), vol. V, pp. 545-546.

⁸ In ogni caso questi esperimenti di Galileo devono essere stati fatti prima della espulsione dei gesuiti dalla Repubblica di Venezia, che avvenne nel 1606. Su Eudaemon-Ioannis vedere: Wallace (1984), pp. 269-271. Baldini (1992), vol. II, parte II, pp. 37-37.

dell'ipotesi matematica; fisica nella quale le leggi del movimento, la legge della caduta dei gravi sono dedotte "astrattamente", senza ricorrere alla nozione di forza, senza ricorrere all'esperienza sui corpi reali. Le "esperienze" a cui si richiama –o si richiamerà più tardi– Galileo, anche quelle che realmente esegue, non sono, e non saranno mai, che esperienze di pensiero [...].⁹

Qui è giunto al massimo di negare a Galileo il valore di prova efficace agli esperimenti che fa, che non sono autonomi –secondo lui rispetto alla teoria! Questa è diventata quasi un'ossessione per Koyré e tutte le volte che Galileo si rifà all'esperienza, ecco pronta la smentita.

In alcuni fogli di Galileo risalenti al periodo in cui ha scritto la sua *Mecchanica*, a proposito dei gravi che passano attraverso tutti i gradi di tardità, si legge:

«Questo sembra certamente strano, o piuttosto assurdo: tuttavia, per quanto a prima vista stupefacente, ciò non è affatto falso; l'esperienza, appena inferiore alla dimostrazione, può dimostrarlo a chiunque».¹⁰

Koyré subito aggiunge:

«L'esperienza –è necessario ricordare che si tratta, come quasi sempre in Galileo, di un'esperienza del suo pensiero– consiste nell'immaginarsi un palo conficcato in terra e sul quale si lascia cadere un peso...».¹¹

Conosco almeno cinque redazioni del principio d'inerzia, nel *De motu*,¹² nelle *Mecchaniche*,¹³ nella *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari*,¹⁴ nel *Dialogo sopra i massimi sistemi*¹⁵ e nella sesta giornata dei *Discorsi*¹⁶ dedicata alla forza della percossa. Leggiamole tre in successione, lasciando le altre due in appendice.

Nel *De motu* Galileo osserva per primo che un percorso per essere sempre perpendicolare alla gravità, deve avvenire su una superficie sferica.

De motu (circa 1590):

«Se un piano è inclinato, anche di pochissimo, sotto il piano orizzontale, un mobile sopra, per natura scende se non è applicata nessuna forza dall'esterno; come è palese con l'acqua: e allo stesso modo un mobile non

⁹ Koyré, (1976), p.75.

¹⁰ Galilei (1968), vol. II, *In quo agitur de motu accelerato*, p.263: «Quod profecto mirum, seu potius absurdum videtur: verumtamen, licet primo intuitu mirum, falsum tamen non esse neque absurdum, experientia, qualibet demonstratione haud infirmior, quemlibet admonere potest».

¹¹ Koyré (1979), p.139.

¹² Galilei (1968), vol. I, p.301. [traduzione dell'originale latino]

¹³ Galilei (1968), vol. II, pp.179-180.

¹⁴ Galilei (1968), pp.134-135.

¹⁵ Galilei (1968), vol VII, pp.172-173.

¹⁶ Galilei (1968), vol. VIII, pp.321-346.

sale se non per forza sopra un piano per quanto poco elevato al di sopra del piano orizzontale: dunque rimane fermo sopra un piano orizzontale perché non si muove né per natura né per forza. [...] E queste cose che abbiamo dimostrato, come anche abbiamo detto prima, devono essere intese per mobili immuni da qualsiasi resistenza esterna: il che essendo forse impossibile trovare nella materia, non si meravigli taluno, che faccia prove del genere, se rimanga deluso dall'esperienza, ed una grande sfera, anche sul piano orizzontale, non possa essere mossa da una minima forza. Poiché, alle cause già dette si aggiunge anche questa: che non può in realtà esservi un piano equidistante dall'orizzonte. Infatti, la superficie della terra è sferica e da essa non può equidistare un piano, tangente in un solo punto ad una sfera, se ci allontaniamo da questo punto sarà necessario ascendere; onde ben a ragione da tale punto la sfera non potrà essere spostata da qualunque minima forza».

Nella redazione successiva, che si legge nel piccolo e importante trattato delle *Mecaniche*, l'accenno alla superficie sferica non è più presente, ma è ancora sottintesa, quando indica una superficie ghiacciata di un lago come buona per far muovere senza impedimenti avventizi una sfera perfettamente tonda.

«Non è dubbio alcuno, tale essere la costituzione della natura circa i movimenti delle cose gravi, che qualunque corpo, che in sé ritenga gravità, ha propensione di moversi, essendo libero, verso il centro; e non solamente per la linea retta perpendicolare, ma ancora, quando altrimenti far non possa, per ogni altra linea, la quale, avendo qualche inclinazione verso il centro, vadi a poco a poco abbassandosi. E così veggiamo, esempligrizia, l'acqua non solamente cadere a basso a perpendicolo da qualche luogo eminente, ma ancora discorrer intorno alla superficie della terra sopra linee, benché pochissimo, inchinate; come nel corso dei fiumi si accorge, dei quali, purché il letto abbia qualche poco di pendenza, le acque vanno liberamente declinando al basso: il quale medesimo effetto, siccome si scorge in tutti i corpi fluidi, apparirebbe ancora nei corpi duri, purché e la lor figura e li altri impedimenti accidentarii ed esterni non lo divietassero. Sì che, avendo noi una superficie molto ben tersa e polita, quale saria quella di uno specchio, ed una palla perfettamente rotonda e liscia, o di marmo, o di vetro, o di simile materia atta a pulirsi, questa, collocata sopra la detta superficie, anderà movendosi, purché quella abbia un poco d'inclinazione, ancorché minima, e solamente si fermerà sopra quella superficie, la quale sia esattamente livellata, ed equidistante al piano dell'orizzonte; quale, per esempio, saria la superficie di un lago o stagno agghiacciato, sopra la quale il detto corpo sferico staria fermo, ma con disposizione di essere da ogni picciolissima forza mosso. Perché avendo noi inteso come, se tale piano inclinasse solamente quanto è un capello, la detta palla vi si moverebbe

spontaneamente verso la parte declive, e, per l'opposito, averebbe resistenza, né si potria muovere senza qualche violenza, verso la parte acclive o ascendente; resta per necessità cosa chiara, che nella superficie esattamente equilibrata detta palla resti come indifferente e dubbia tra il moto e la quiete, sì che ogni minima forza sia bastante a muoverla, siccome, all'incontro, ogni pochissima resistenza, e quale è quella sola dell'aria che la circonda, potente a tenerla ferma».

Dal che possiamo prendere, come per assioma indubitato, questa conclusione: che i corpi gravi, rimossi tutti l'impedimenti esterni ed adventizii, possono esser mossi nel piano dell'orizzonte da qualunque minima forza».¹⁷

Nella sesta giornata dei *Discorsi* vi è un cambiamento importante nella formulazione del principio d'inerzia: questa volta la velocità uniforme è ottenuta con un dispositivo meccanico che permette il moto verticale. Leggo come lo descrive Galileo:

«...voglio che ci figuriamo un solido grave, per esempio di mille libbre¹⁸ di peso, 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; e stando sollevati, senza che sopra alcuno sottoposto sostegno si appoggino, staranno fermi, né scenderà questo secondo grave alzando il primo, salvo che quando egli abbia qualche eccesso di gravità».¹⁹

Ed ecco la nuova formulazione del principio di inerzia, che all'inizio sembra seguire la solita argomentazione:

«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 quel-

¹⁷ Galilei (1968), vol. II, pp.179-180.

¹⁸ In seguito parlerà sempre di 100 libbre, che sembra un peso più ragionevole. Infatti 100 libbre = 33,95 kg. La libbra toscana era divisa in 12 once; l'oncia era divisa in 24 denari; il denaro in 24 grani.

¹⁹ Galilei (1968) vol. VIII, pp.332-333.

la 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»:

Ma qui interviene la novità

«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,²⁰ 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».²¹

Galileo è un fisico teorico e insieme sperimentale, dunque vediamo adesso come ha potuto fare l'esperienza del moto verticale inerziale.

La macchina di Galileo e l'esperienza del moto inerziale

La forza della percossa è l'ultimo argomento studiato dal grande scienziato pisano e riguarda la dinamica degli urti, che Galileo studia con una installazione in cui due masse uguali sospese ad una carrucola si equilibrano. È possibile individuare quattro esperimenti nel procedere del suo discorso:

- a) si dà una spinta a un peso: i due pesi si muovono insieme in moto uniforme con la velocità impressa con la spinta. Così Galileo dimostra la validità sperimentale del principio d'inerzia anche quando il moto è verticale, perché –spiega– è nulla la somma delle forze agenti su ogni massa.
- b) Si appoggia uno dei due pesi uguali sopra un banchetto, si solleva l'altro ad un'altezza prefissata e poi lo si lascia cadere: quando la corda diventa tesa, si ha –come la chiama Galileo– una *strappata*. L'altro peso, tirato dalla corda, impedisce al primo di continuare il moto accelerato. I due pesi, insieme, procedono con moto uniforme, come nell'esperimento precedente.
- c) Si aggiunge un peso alla massa di quello appoggiato, si solleva l'altro peso e lo si lascia cadere, come prima: quando la corda diventa tesa, il peso maggiore sale fino ad un'altezza, che dipende dal peso aggiunto e dalla velocità massima raggiunta in caduta libera dal peso sollevato. Il loro moto, dopo la *strappata*, è uniformemente ritardato, fino all'altezza massima, e poi accelerato in senso inverso.

²⁰ Si noti che Galileo dice "all'in giù" perché in tal modo il peso spinto in giù tira su l'altro, rimanendo sempre nulla la risultante della forza di gravità. Qui la corda ha solo il compito di comunicare istantaneamente "l'impeto" all'altro peso.

²¹ Galilei, (1968) vol. VIII, p.336.

Calcolando la velocità raggiunta dal peso che cade, immediatamente prima della *strappata*, e misurando la velocità dei due pesi, subito dopo la *strappata*, si può verificare la conservazione della quantità di moto. Galileo non riuscì a dimostrare questa legge, che pure è ricordata spesso nei suoi scritti in varie maniere, perché, non potendo misurare la velocità massima raggiunta prima della *strappata*, fa ricorso ad un risultato teorico, che non è valido in quella situazione.²²

- d) Galileo aggiunge una piccola massa ad una delle due, porta questa massa in alto e la lascia cadere. Osserva un moto accelerato, ma molto lento perché c'è solo il peso della massa aggiunta a muovere tutte le masse: prima chiara evidenza della differenza tra massa inerziale e massa gravitazionale.

In quest'ultimo esperimento Galileo, forse, è riuscito a determinare il valore della costante dell'accelerazione di gravità.

Questa macchina è simile a quella, costruita 150 anni dopo, che è conosciuta con il nome di Macchina di Atwood.²³

Per molto tempo questi studi rimasero occulti. Vincenzo Viviani poté copiare un manoscritto sulla forza della percossa, posseduto dal figlio di Galileo, in cui riconobbe la mano del padre Ambrogetti,²⁴ ma non ritenne di inserirlo nella raccolta delle *Opere*²⁵ che, con il suo aiuto, l'editore Carlo Manolesi²⁶ fece stampare a Bologna nel 1655-56. Viviani non aveva sottovalutato l'importanza dello scritto;²⁷ aveva parlato addirittura di una Nuova Scienza da aggiungere alle due dei *Discorsi*, ma

²² In uno lavoro più ampio, che sto scrivendo, mostrerò che Galileo aveva tutte le nozioni necessarie ad arrivare al risultato corretto.

²³ George Atwood (1745-1807) studiò a Cambridge. Nel 1773 divenne insegnante al Trinity College dove tenne conferenze molto frequentate e nel 1776 fu accolto nella Royal Society. Nella sua opera più importante, *A Treatise on the Rectilinear Motion and Rotation of Bodies* (Cambridge 1784), descrisse una macchina per lo studio del moto uniformemente accelerato, poi costruita da Adams. Nello stesso anno scrisse anche: *Analysis of a Course of Lectures on the Principles of Natural Philosophy*.

²⁴ Marco Ambrogetti, sacerdote fiorentino, che Galileo tenne presso di sé in Arcetri dal 1° giugno 1637 al 25 gennaio 1639, valendosi di lui per dettargli le lettere, delle quali abbiamo buon numero anche oggi, scritte di su mano, e per la traduzione latina del *Saggiatore*, delle *lettere sulle macchie solari* e del *Discorso sulle galleggianti*, la quale egli intendeva mandare agli Elzeviri per l'edizione completa delle sue opere che disegnavano di fare. E anche posteriormente al gennaio 1639 l'Ambrogetti tornò in Arcetri, servendo a Galileo da amanuense. [notizia tratta da: Galilei (1968), vol. XX, p.369.

²⁵ Galilei (1655).

²⁶ Galluzzi (1984) riporta il suo carteggio con Vincenzo Viviani, riguardante l'edizione delle opere di Galileo.

²⁷ Galilei (1968) vol. XIX, p.623, *Racconto storico della vita del Sig.r. Galileo Galilei*, redatto in forma di lettera per Leopoldo de' Medici: Viviani aveva scritto: «...finalmente nell'ultima Giornata promuovere un'altra nuova scienza, trattando con progresso geometrico della mirabil forza della percossa, dove egli stesso diceva d'aver scoperto e poter dimostrare acutissime e recondite conclusioni, che superavano di gran lunga tutte l'altre sue speculazioni già pubblicate. [...] Di queste [opere] rimasero solo appresso il figliuolo e nipoti alcuni pochi fragmenti per introdursi nella contemplazione della forza della percossa...».

esitò a far conoscere uno scritto che riteneva incompiuto e che forse desiderava completare. È anche possibile che abbia avuto altri motivi, sui quali è inutile adesso speculare: sono illustrate in altro luogo le vicende per le quali gli scritti sulla percossa rimasero nascosti per ottanta anni.²⁸

Basti dire che solo nell'edizione fiorentina delle *Opere* di Galileo (1718) venne aggiunta nei *Discorsi intorno a due Nuove Scienze* una sesta giornata con il titolo *Della forza della percossa*, unica testimonianza delle sue ricerche, senza che sia pervenuto il manoscritto da cui era tratta, forse una copia di quello del Viviani o forse no. Non possiamo neppure sapere se l'incompletezza di questa *giornata aggiunta* sia dovuta a Galileo o alla perdita della versione finale.²⁹

L'installazione è stata costruita per la realizzazione di esperimenti in un'area aperta al pubblico, area che abbiamo chiamato «Il Laboratorio di Galileo Galilei».

È una macchina di grandi proporzioni (è alta circa 3 metri), consistente in una struttura piramidale a base quadrata, i cui lati sono realizzati con tubi di acciaio inox, opportunamente collegati (**Fig. 1**). Una ruota di bicicletta dal diametro 42 cm è sorretta da un telaio fissato sopra la struttura piramidale. La ruota è stata modificata, creando una scanalatura.

Due pesi,³⁰ M_1 (a sinistra) e M_2 (a destra) di massa uguale a 20,732 kg, sono uniti tra loro con un cavo di acciaio di diametro 4 mm. Il cavo passa nella scanalatura della ruota ed ha lunghezza giusta per permettere la massima corsa al sistema dei pesi accoppiati. Ad entrambi i pesi, che all'incirca sono a forma di parallelepipedo, sono stati praticati due fori perché scorrano lungo due tubi d'acciaio paralleli che fanno da guida.

Al centro della macchina vi è un'asta verticale, su cui è fissata una scala con divisioni millimetriche, lunga 2,6 metri, che serve per misurare lo spazio percorso da M_2 . Alla base di M_2 è stata fissata un'asticella, sporgente verso la scala millimetrica, per la lettura esatta della sua posizione (**Fig. 2**).

Lungo l'asta verticale sono sistemati sette ponticelli scorrevoli in ottone che sostengono i traguardi in carta pergaminata: servono a evidenziare il passaggio della massa M_2 (**Fig. 3**) nell'esperimento del principio d'inerzia.

²⁸ Le vicende dei manoscritti e gli esperimenti con le macchine di Galileo sono descritti in un mio libro in preparazione dal titolo *Galileo e la forza della percossa*.

²⁹ Nel primo frammento prende il posto di Semplicio Paolo Aproino, che morì nel marzo del 1638. Galileo non può aver scritto il testo in cui appare questo personaggio prima questo avvenimento.

³⁰ Le due masse utilizzate nella macchina erano in origine due pesi omologati di 20 kg, in uso per le grandi bilance commerciali. Le modifiche e le aggiunte per le finalità della macchina le hanno portate ad avere la massa finale qui indicata, che sono state misurate dall'isp. Luigi Gattinari dell'Ufficio Metrico (C.C.I.A.A) di Pisa.

Sempre lungo l'asta centrale vi sono altri otto ponticelli segnati con un bollino rosso, a distanze crescenti. Servono per la misura dell'accelerazione.

Una massa di piombo m_p (0.884 kg) scorre lungo il tubo esterno di guida della massa M_2 ed è tenuta ferma in alto con un filo, che passa in una piccola carrucola e si aggancia ad un fermo della struttura laterale. Serve per imprimere una opportuna velocità iniziale ad M_2 nell'esperimento sul principio di inerzia (**Fig. 4 e 5**). Il filo permette al sovrappeso di scendere per 24 cm.

Nella parte frontale della struttura è stato applicato un pendolo, che intercetta un traguardo di carta pergamenata. Il pendolo, ricavato da un filo a piombo, compie attualmente una oscillazione completa in circa un secondo (40 oscillazioni in 41,3 secondi).

Un sensore vicino alla ruota si attiva al passaggio dei raggi e permette di misurare velocità ed accelerazione dei pesi nei vari esperimenti, in funzione della distanza percorsa (**Fig. 6**). Il sensore è collegato ad un computer.

In alcuni esperimenti si utilizzano due elettromagneti (fissati nella parte destra del telaio che sostiene la ruota), situati proprio sopra il peso M_2 che viene sospeso ad essi all'inizio dell'esperimento (**Fig. 7**).

Operazione di messa a punto

L'esperimento ha inizio con M_1 in basso e M_2 in alto, nella posizione di inizio corsa; essi sono in equilibrio. Se si dà una lieve spinta, i pesi di mettono in moto ma dopo un po' si fermano, a causa dell'attrito.

Aggiungendo per tentativi un sovrappeso m_a ad una delle masse, per esempio a M_2 , possiamo controbilanciare l'attrito. Questa scelta obbliga ad usare la macchina solamente nel verso che fa scendere M_2 .

Ricordo alcuni particolari dell'esperimento.

Operazioni

- 1) si libera il filo che tiene in alto m_p che si fa scendere fino a poggiare sopra la massa M_2
- 2) Si attivano gli elettromagneti e si attacca ad essi M_2
- 3) Si dà una spinta al pendolo, che comincia ad oscillare.
- 4) In coincidenza con un passaggio del pendolo sul traguardo si disattivano gli elettromagneti, in modo che M_2 è lasciato andare.
- 5) Il sistema acquista velocità crescente, durante il primo tratto di discesa di M_2 , fino al momento in cui la cordicella si tende e m_p si stacca da

M_2 (**Fig. 8**), dopo quel momento la velocità diventa costante. Si può così imprimere sempre la stessa velocità al sistema, e studiare il moto della massa M_2 , su cui è nulla la risultante delle forze, lungo tutto il percorso ancora disponibile.

- 6) Si regola la lunghezza del filo che trattiene m_p per fare in modo che il suo distacco avvenga esattamente dopo una oscillazione del pendolo. Lo spazio percorso con il pendolo attuale (periodo $T = 1,03$ s) è di 24 cm.
- 7) Si trova la posizione del ponticello seguente per tentativi fino a che l'asticella di M_2 vi passa in coincidenza con il successivo passaggio del pendolo nel proprio traguardo:
- 8) Si legge sull'asta la posizione del primo e del secondo ponticello: la loro distanza è di 0,335 m; tutti gli altri ponticelli saranno messi in modo che tra loro vi sia questa distanza.
- 9) Si osserva che i passaggi di M_2 per i successivi traguardi si compiono in sincronia con le oscillazioni successive del pendolo (**Fig. 3**).

Un osservatore utilizza un martelletto incernierato ad una traversa, contro la quale batte ad ogni passaggio del pendolo nel traguardo. Un secondo martelletto, identico al primo ma posto davanti, è usato da un altro osservatore che segnala il passaggio della massa M_2 ad ogni traguardo lungo il percorso. I colpi sono praticamente in coincidenza.

L'esperimento può essere fatto, meno comodamente, senza gli elettromagneti, sostituendo 2) e 4) con le seguenti operazioni.

- 2) Si porta ad un traguardo in alto il peso M_2 che ha sopra di sé il peso m_p .
- 4) In coincidenza con un passaggio del pendolo sul suo traguardo si lascia libero M_2 , e si trova la distanza percorsa in una oscillazione, spostando un ponticello fino ad ottenere una perfetta coincidenza. Questa sarà la distanza a cui devono essere messi gli altri traguardi lungo l'asta.

Risultato

In un primo esperimento vi sono cinque traguardi. Il pendolo compie 5 oscillazioni, e il tempo misurato con un cronometro è $t = 5 \times 41,3 / 40 = 5,16$ s. Lo spazio percorso è $0,335 \times 5 = 1,675$ m e si può calcolare la velocità, che è $v = 0,32$ m/s. Il controllo elettronico dà una velocità media $v = 0,33$ m/s e una accelerazione media $a = 0,00$ m/s².

Si ripete, dopo qualche giorno, l'esperimento con 7 traguardi. Questa volta³¹ occorre metterli distanti 0,325 m. Il percorso è di conseguenza

³¹ La costanza dei risultati degli esperimenti dipende soprattutto dalla messa a punto, pulizia e lubrificazione dei tubi che fanno da guida. Galileo non aveva problemi di sicurezza e gli attriti nei suoi esperimenti erano certamente più costanti e, probabilmente minori.

di 2,275 m e quindi il moto avviene in sette oscillazioni del pendolo: la velocità è di 0,31 m/s mentre il controllo elettronico ha dato una velocità media $v = 0,27$ m/s e accelerazione $0,01 \text{ ms}^{-2}$.

Galileo ha potuto farlo?

L'esperimento procede con la stessa metodologia già seguita da Galileo (prima del 1604) sul piano inclinato, quando ha provato la legge dei numeri dispari; in questo caso si deve verificare la legge d'inerzia. Non si può sapere se Galileo abbia realizzato l'esperimento in questa maniera, ma ritengo che in qualche modo abbia controllato la veridicità di questa legge fondamentale che proclama con decisione: «*se ad uno si darà impeto all'in giù, quello si andrà conservando equabile sempre*». ³²

Risulta da quanto mette in bocca a Sagredo che Galileo si è accorto anche dell'attrito:

«Dirò dunque (però sempre dubitando) che è vero che il peso, e.g., delle 100 libbre, del grave discendente basta per alzare l'altro, che pure pesi 100 libbre, infino allo equilibrio, senza che quello venga instrutto e fornito d'altra velocità e basterà solo l'eccesso di mezza oncia, ma vo considerando che questa equilibrabazione verrà fatta con gran tardità ...». ³³

Galileo dopo l'aggiunta di mezza oncia che corrispondevano a 14 grammi dice di aver osservato un processo di "equilibrabazione", cioè una lentissima discesa che terminava nell'equilibrio, nella quiete. Questa sua osservazione ha un interesse notevole, perché assicura che l'attrito presente nella "sua macchina" non era molto minore dall'attrito osservato nella macchina odierna, che riesce completamente annullato con un incremento di peso di 155 grammi.

Giudizi di storici della scienza

In un libro del biografo di Newton, Richard Samuel Westfall, *Force in Newton's Physics* trovo una conclusione deludente, quando afferma che per progredire ulteriormente ci voleva Descartes!:

«In effetti, egli [Galileo] si è impantanato in una palude filosofica. Per progredire ulteriormente, la meccanica avrà bisogno del saldo punto di appoggio di una coerente filosofia della natura e di un riesame del moto.

³² Galilei (1968), vol. VIII, p. 337.

³³ Galilei (1968), vol. VIII, p. 334.

In una parola, avrà bisogno dell'opera di un Descartes, nella cui filosofia i moti naturali saranno eliminati e tutti i movimenti, in quanto movimenti, saranno posti sul medesimo piano metafisico. In questo contesto, ci sarà almeno la possibilità di vedere l'accelerazione uniforme della caduta libera come un esempio della classe più ampia delle accelerazioni in generale [...].

Non avendo un chiaro concetto di massa, a Galileo mancano i mezzi per generalizzare la sua analisi della caduta libera alle accelerazioni su piano orizzontali». ³⁴

Alfred Rupert Hall, un altro storico che si è interessato anche di Galileo, sembra non aver letto la sesta giornata, quando afferma categoricamente alcune opinioni sconcertanti nel suo libro *Da Galileo a Newton 1630-1720*:

«[...] La tradizione secondo la quale Galileo fu un grande scienziato sperimentale non regge a una critica seria. È vero che egli possedeva qualità di sperimentatore, che era pronto a prendere in considerazione idee nuove e a indagare la possibilità di nuovi mezzi per aumentare la conoscenza della natura, ma si tratta di una cosa diversa. [...] egli preferiva sempre l'analisi teorica piuttosto che ulteriori indagini sperimentali. Di Galileo si ricordano pochi esperimenti originali, e in tutte le sue lettere troviamo solo pochi accenni a esperimenti realmente compiuti. [...] L'essere giunto al concetto di inerzia, pur con le imperfezioni della sua formulazione, fu un'impresa grandiosa. Quanto alla sua verifica sperimentale, Galileo la ignorò, considerandola irrilevante. ³⁵

[...] senza dubbio (al pari di Sagredo) considerò il principio di conservazione della quantità di moto come evidente di per sé. Egli non riuscì però a dimostrarlo direttamente, così come non aveva potuto dimostrare il principio di inerzia.» ³⁶

I. B. Cohen in una nota di un suo articolo scrive:

«È mio convincimento che Galileo veramente non conosce la legge d'inerzia; io ho esposto questo argomento estensivamente in *The Birth of a New Physics* (New York, 1960; London, 1962), *Les origines de la physique moderne* (Paris, 1962), un mio articolo su «Galileo and Newton» che apparirà quest'anno nei *Saggi [Raccolta di Saggi su Galileo Galilei, Roma 1965]*. La discussione più eloquente di questo punto di vista si trova in «Galilée et la loi de l'inertie» di Alexandre Koyré, parte III, dei brillanti e epocali *Etudes Galiléennes*. ³⁷

³⁴ Westfall (1982), pp. 63-74.

³⁵ Rupert Hall (1973), p. 47.

³⁶ Idem, p. 56.

³⁷ Cohen (1967), p. XXVII (nota 7).

La sua opinione è che Galileo non ha generalizzato la sua analisi ad ogni tipo di forza, oltre alla forza peso, come invece ha fatto Newton.

«Galileo distingue tra moto accelerato che è causato da una forza e moto non accelerato che occorre quando non c'è una forza che agisce, e quindi ha compreso che una forza tende a produrre un'accelerazione –non soltanto un movimento– e che la direzione vettoriale della forza è identica alla direzione dell'accelerazione che produce: tuttavia lo ha fatto solo per una forza, il peso, e quindi solo per un'accelerazione g , che ha trovato essere una costante, e non ha mai generalizzato il suo risultato in una regola generale per forze differenti, o un'affermazione che connette forza con l'andamento della variazione di velocità.³⁸

Ma quali erano le altre forze in Newton, se non l'attrito nelle sue varie forme?

Conclusione

Nessuno storico ha valutato l'importanza degli esperimenti di inerzia verticale e hanno considerato negativamente l'osservazione di Galileo, che il moto si conserva sulla superficie sferica della terra. Si tratta della conservazione del momento angolare, ossia del momento della quantità di moto, uno dei principi basilari della fisica classica e quantistica!

La conservazione vettoriale della quantità di moto in presenza di masse è sempre una approssimazione, non è vera esattamente. Galileo è per noi più un fisico che non un filosofo.

APPENDICE

A) Il Principio d'inerzia nella *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti*.³⁹

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 movimen-

³⁸ Cohen (1967), p. XXVII.

³⁹ Galilei (1968), pp. 134-135.

ti 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 a i 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. [...] Ora il Sole, corpo di figura sferica, sospeso e librato circa il proprio centro, non può non secondare il moto del suo ambiente, non avendo egli a tal conversione intrinseca repugnanza, né impedimento esteriore ...»

B) Il principio d'inerzia nei Dialogo sopra i due massimi sistemi.

SALV. Io non desidero che voi diciate o rispondiate di saper niente altro che quello che voi sicuramente sapete. Però ditemi: quando voi avete una superficie piana, pulitissima come uno specchio e di materia dura come l'acciaio, e che fusse non parallela all'orizzonte, ma alquanto inclinata, e che sopra di essa voi poneste una palla perfettamente sferica e di materia grave e durissima, come, verbigratia, di bronzo, lasciata in sua libertà che credete voi che ella facesse? non credete voi (sí come credo io) che ella stesse ferma?

SIMP. Se quella superficie fusse inclinata?

SALV. Sí, ché cosí già ho supposto.

SIMP. Io non credo che ella si fermasse altrimenti, anzi pur son sicuro ch'ella si moverebbe verso il declive spontaneamente.

SALV. Avvertite bene a quel che voi dite, signor Simplicio, perché io son sicuro ch'ella si fermerebbe in qualunque luogo voi la posaste.

SIMP. Come voi, signor Salviati, vi servite di questa sorte di supposizioni, io comincerò a non mi maravigliar che voi concludiate conclusioni falsissime.

SALV. Avete dunque per sicurissimo ch'ella si moverebbe verso il declive spontaneamente?

SIMP. Che dubbio?

SALV. E questo lo tenete per fermo, non perché io ve l'abbia insegnato (perché io cercavo di persuadervi il contrario), ma per voi stesso e per il vostro giudizio naturale.

SIMP. Ora intendo il vostro artificio: voi dicevi così per tentarmi e (come si dice dal vulgo) per iscalzarmi, ma non che in quella guisa credeste veramente.

SALV. Così sta. E quanto durerebbe a muoversi quella palla, e con che velocità? E avvertite che io ho nominata una palla perfettissimamente rotonda ed un piano esquisitamente pulito, per rimuovere tutti gli impedimenti esterni ed accidentarii: e così voglio che voi astragghiate dall'impedimento dell'aria, mediante la sua resistenza all'essere aperta, e tutti gli altri ostacoli accidentarii, se altri ve ne potessero essere.

SIMP. Ho compreso il tutto benissimo: e quanto alla vostra domanda, rispondo che ella continuerebbe a muoversi in infinito, se tanto durasse la inclinazione del piano, e con movimento accelerato continuamente; ché tale è la natura de i mobili gravi, che *vires acquirant eundo*: e quanto maggior fusse la declività, maggior sarebbe la velocità.

SALV. Ma quand'altri volesse che quella palla si movesse all'insù sopra quella medesima superficie, credete voi che ella vi andasse?

SIMP. Spontaneamente no, ma ben strascinatavi o con violenza gettatavi.

SALV. E quando da qualche impeto violentemente impressole ella fusse spinta, quale e quanto sarebbe il suo moto?

SIMP. Il moto andrebbe sempre languendo e ritardandosi, per esser contro a natura, e sarebbe piú lungo o piú breve secondo il maggiore o minore impulso e secondo la maggiore o minore acclività.

SALV. Parmi dunque sin qui che voi mi abbiate esplicati gli accidenti d'un mobile sopra due diversi piani; e che nel piano inclinato il mobile grave spontaneamente scende e va continuamente accelerandosi, e che a ritenervelo in quiete bisogna usarvi forza; ma sul piano ascendente ci vuol forza a spignervelo ed anco a fermarvelo, e che 'l moto impressogli va continuamente scemando, sí che finalmente si annichila. Dite ancora di piú che nell'un caso e nell'altro nasce diversità dall'esser la declività o acclività del piano, maggiore o minore; sí che alla maggiore inclinazione segue maggior velocità, e, per l'opposito, sopra 'l piano acclive il medesimo mobile cacciato dalla medesima forza in maggior distanza si muove quanto l'elevazione è minore. Ora ditemi quel che accaderebbe del medesimo mobile sopra una superficie che non fusse né acclive né declive.

SIMP. Qui bisogna ch'io pensi un poco alla risposta. 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. Ma io sono smemora-

to, perché non è molto che 'l signor Sagredo mi fece intender che così seguirebbe.

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.

SALV. Adunque se tale spazio fusse interminato, il moto in esso sarebbe parimente senza termine, cioè perpetuo?

SIMP. Parmi di sí, quando il mobile fusse di materia da durare.

SALV. Già questo si è supposto, mentre si è detto che si rimuovano tutti gl'impedimenti accidentarii ed esterni, e la fragilità del mobile, in questo fatto, è un degli impedimenti accidentarii. Ditemi ora: quale stimate voi la cagione del muoversi quella palla spontaneamente sul piano inclinato, e non, senza violenza, sopra l'elevato?

SIMP. Perché l'inclinazion de' corpi gravi è di muoversi verso 'l centro della Terra, e solo per violenza in su verso la circonferenza; e la superficie inclinata è quella che acquista vicinità al centro, e l'acclive discostamento.

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: ècci 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.

Bibliografia

BALDINI, U.; NAPOLITANI, P.D. (1992). Christoph Clavius. Corrispondenza, Pisa.

COHEN, I. B. (1967). Newton's attribution of the first two laws of motion to Galileo. In: *Atti del Symposium Internazionale di Storia, Metodologia, Logica e Filosofia della Scienza "Galileo nella Storia e nella Filosofia della Scienza"*, Firenze, pp. XXV- XLIV.

GALLUZZI, P.; TARRINI, M. (1984). *Le opere dei discepoli di Galileo Galilei. Carteggio 1649-1656*, vol. II, Firenze.

GALILEI, G. (1655-1656). *Opere*, Bologna.

– (1718) *Opere*, Firenze.

– (1968) *Le Opere*. Firenze.

KOYRÉ, A. (1976). *Studi galileiani*, Torino.

RUPERT HALL, A. (1963). *From Galileo to Newton 1630-1720*, London.

– (1973). *Da Galileo a Newton 1630-1720*, Milano.

WALLACE, W.W. (1984). *Galileo and his Sources. The Heritage of the Collegio Romano in Galileo's Science*, Princeton.

WESTFALL, R.S. (1971). *Force in Newton's Physics. The Science of Dynamics in the Seventeenth Century*, New York.

– (1982). *Newton e la dinamica del XVII secolo*, Bologna.

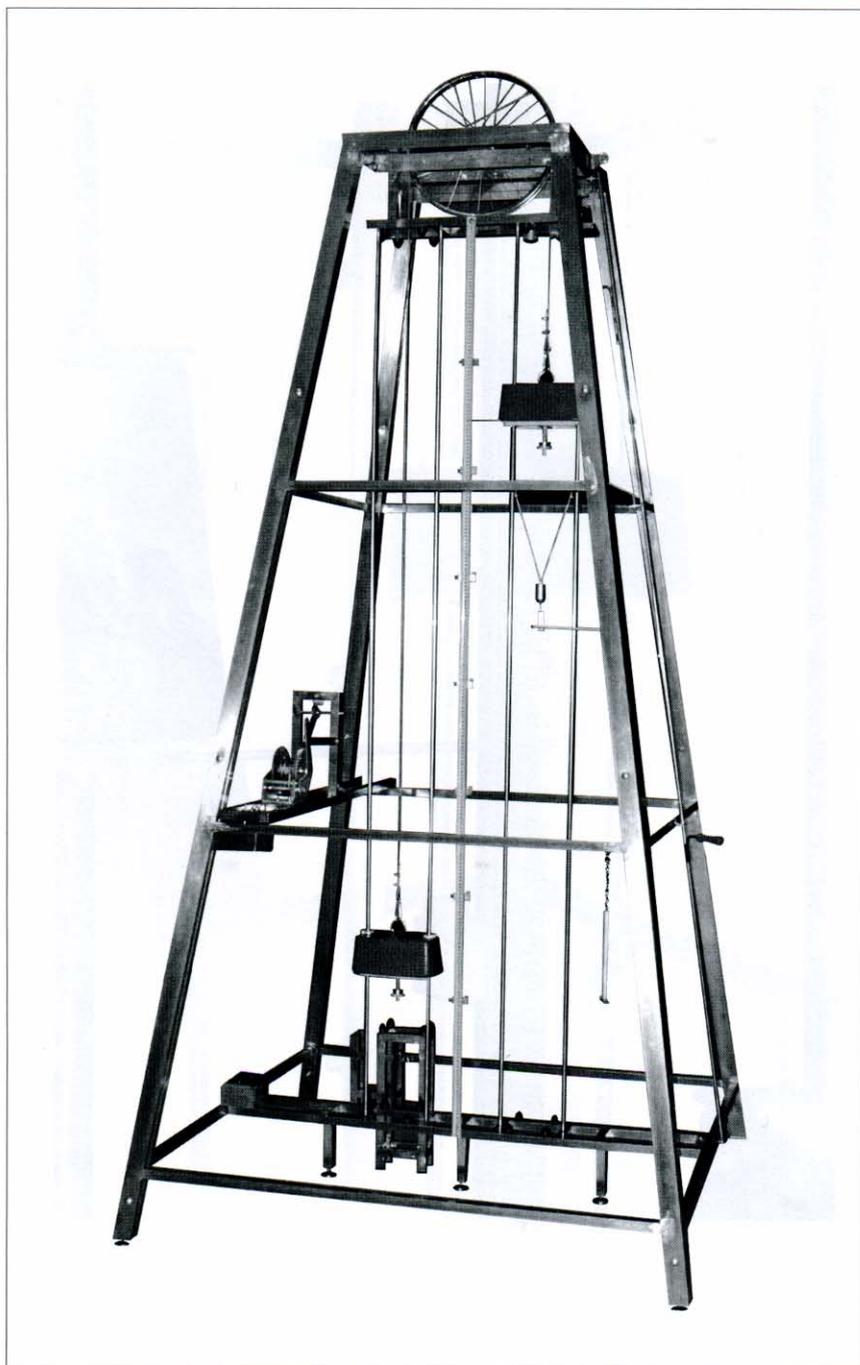


Fig. 1. La macchina di Galileo.

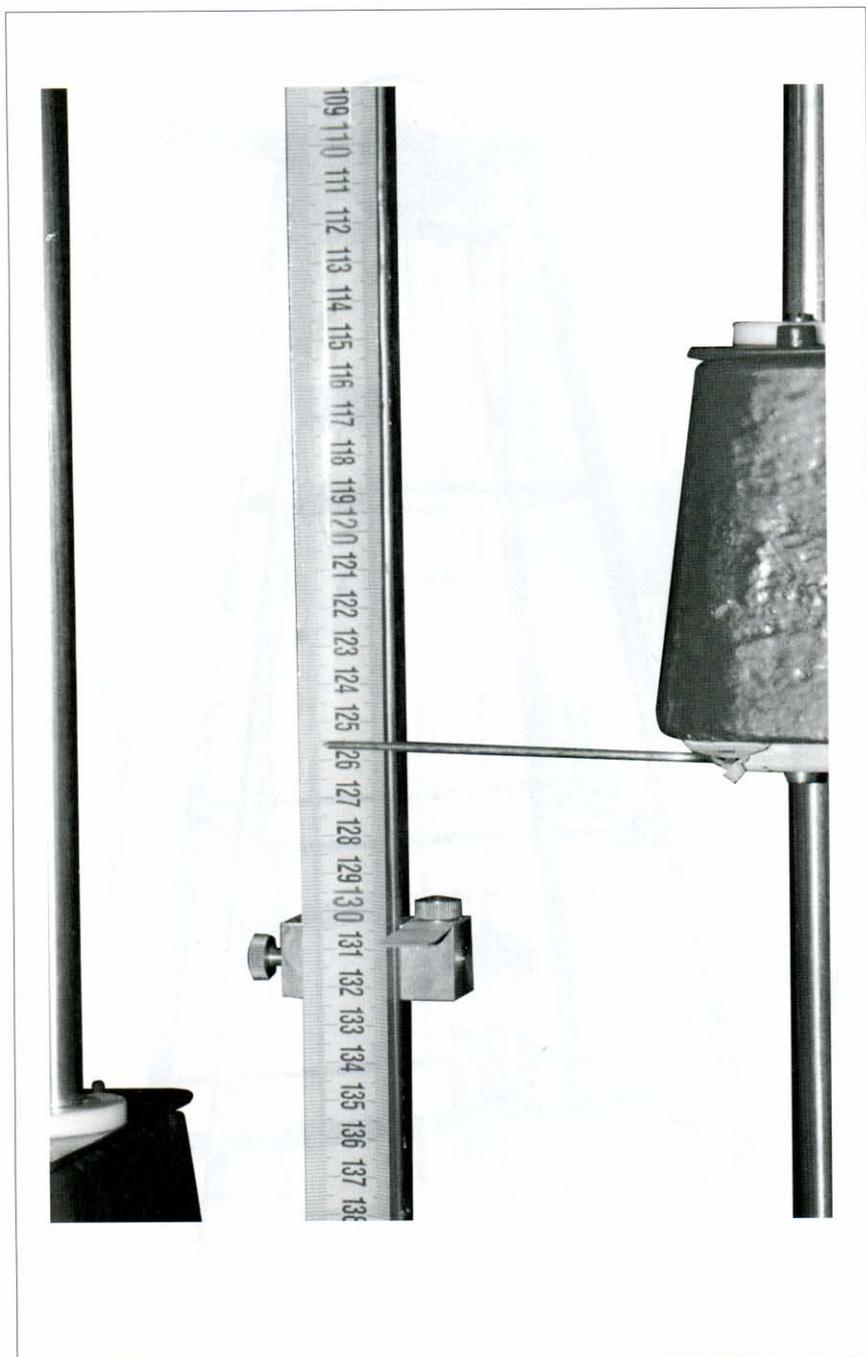


Fig. 2. L'asticella.



Fig. 3. I ponticelli ugualmente distanti.

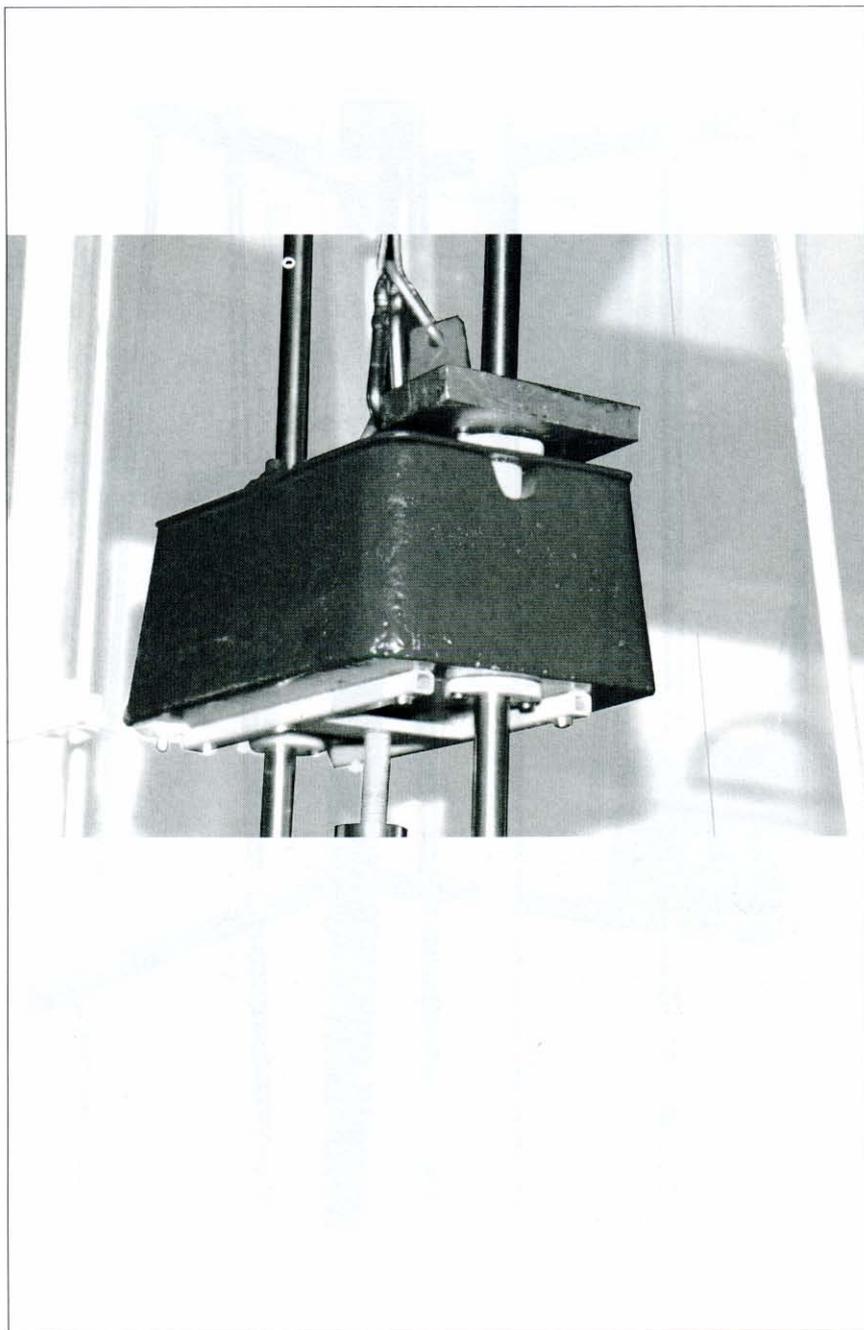


Fig. 4. Il soprappeso acceleratore.

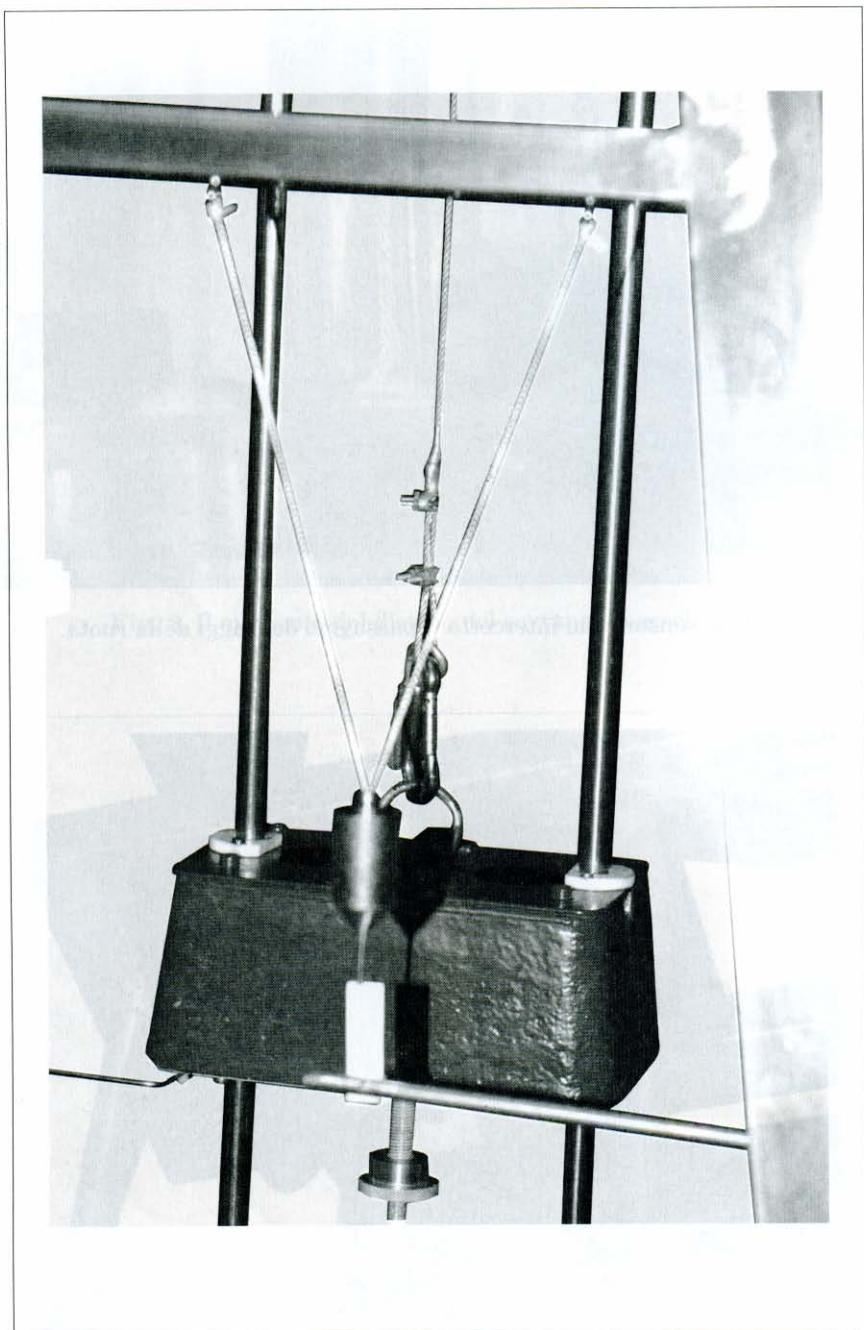


Fig. 5. Il pendolo.

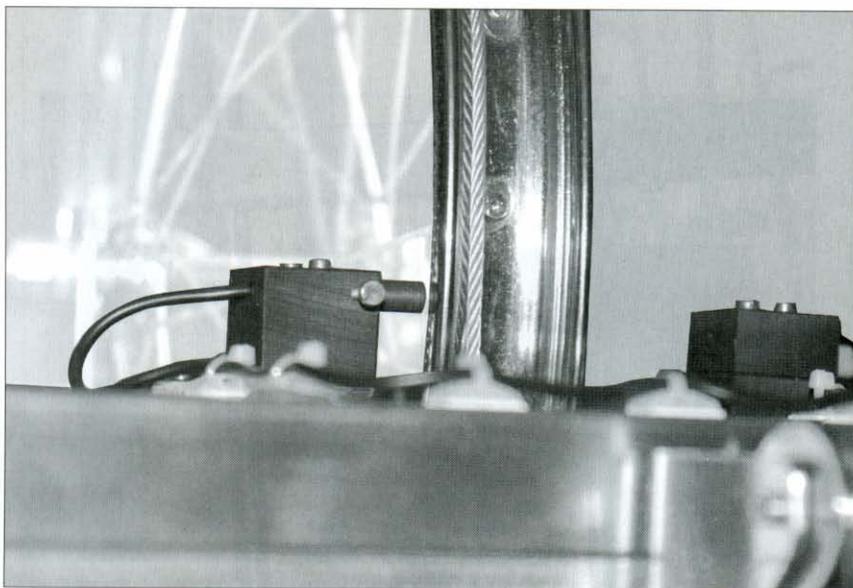


Fig. 6. Il sensore che intercetta il passaggio dei raggi della ruota.

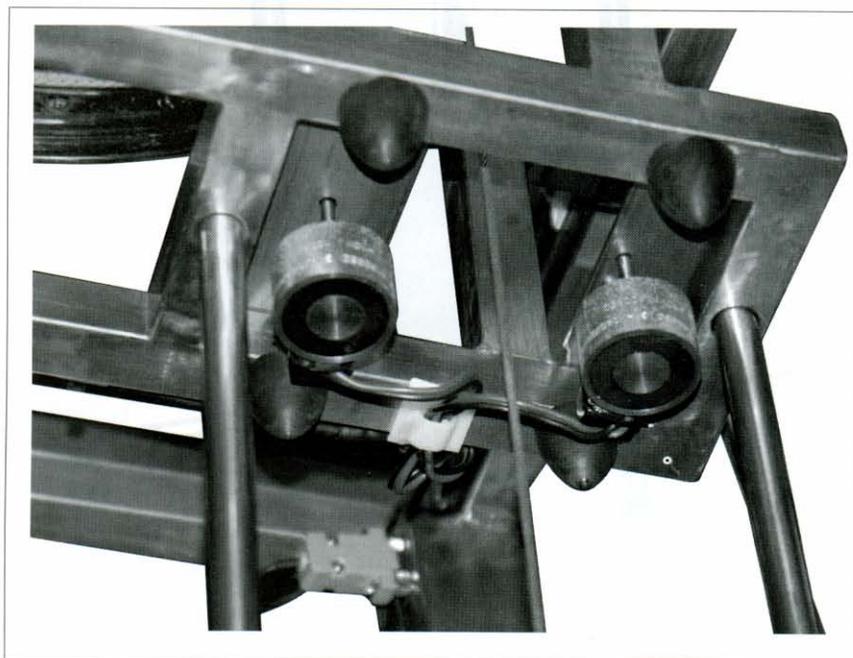


Fig. 7. Gli elettromagneti per sospendere il peso M_2 .

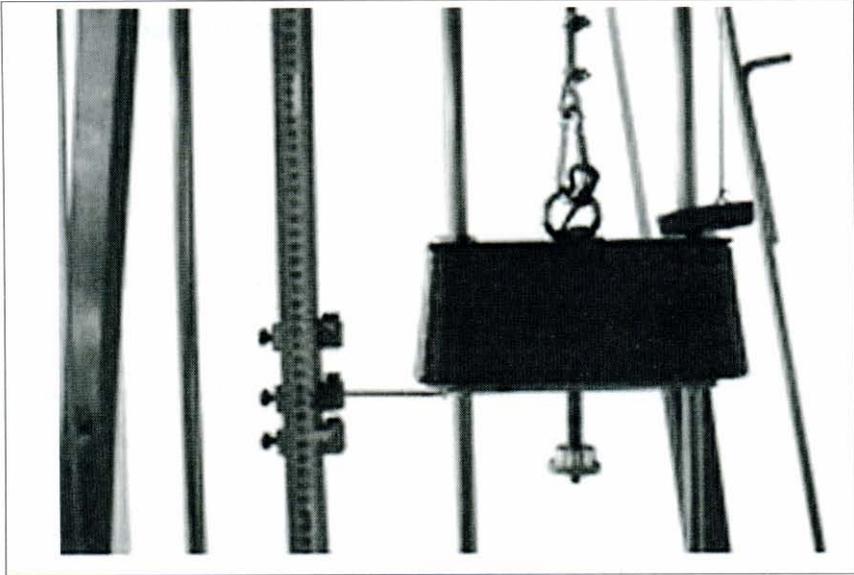


Fig. 8. Il momento del distacco del sovrappeso acceleratore.