

# Galileo a Livorno

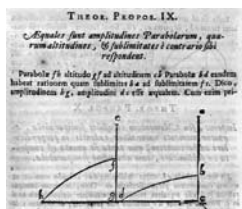
## Geometrie e Isocronie

### *Gli Studi di Galileo sul moto dei proiettili e del pendolo*

*L'Assemblea Generale delle Nazioni Unite (ONU) - accogliendo la risoluzione proposta dal Governo Italiano nel 2003 e avanzata dall'UNESCO nel dicembre 2005 - ha proclamato il 2009 Anno Internazionale dell'Astronomia, a memoria dei 400 anni (1609) dall'utilizzazione astronomica da parte di Galileo Galilei (1564 -1642) del cannocchiale, che comportò la scoperta dell'esistenza di nuovi fenomeni e corpi celesti, contribuendo all'affermazione di una nuova concezione dell'universo.*

*In occasione delle celebrazioni galileiane 2009, la Regione Toscana ha definito, con la collaborazione di Comuni, Università, Enti e Associazioni, un progetto, Sotto il segno di Galileo - Luoghi della scienza in Toscana, per valorizzare i luoghi della scienza toscani. Dalla Fortezza Vecchia di Livorno, dove Galileo e gli scienziati dell'Accademia del Cimento realizzarono importanti osservazioni ed esperimenti sul pendolo ed il moto dei proiettili, passando per la Vigna delle Veneri di Vaiano, che produceva il vino che veniva regalato allo scienziato da Giovanfrancesco Buonamici, fino ad arrivare a Pisa, città dove Galileo nacque e studiò, si snoda un itinerario che in tutta la Toscana segue il pensiero di Galileo, mettendo in risalto il valore dell'osservazione e dello sperimentare, le pratiche del sapere scientifico. Serata inaugurale il 25 settembre 2009, in varie sedi della nostra regione: un programma di osservazioni del cielo con il telescopio, durante le quali il pubblico, con la guida di astronomi esperti, ha potuto vivere l'emozione "galileiana" di scoprire i segreti del firmamento. L'appuntamento a Livorno, organizzato con la collaborazione dell'Associazione Livornese Scienze Astronomiche (A.L.S.A.), è stato in Fortezza Vecchia.*

*Nel pomeriggio, alla presenza dell'Assessore alle Culture del Comune di Livorno Mario Tredici, è stata inaugurata la mostra permanente didattica dedicata a Galileo e il pendolo e Galileo e il moto dei proiettili, pensata per far scoprire al grande pubblico, ed in particolare ai giovani, lo stretto rapporto fra arte e scienza; inoltre, nell'area dimostrativa delle sperimentazioni di Galileo, è stato effettuato il tiro con simulatore, a cura dell'Unione Italiana Tiro a Segno (U.I.T.S.).*



**Sopra:**  
Figura estratta da una  
pagina dei Discorsi

Nel 2009 ricorre il quarto centenario delle prime osservazioni astronomiche fatte con il cannocchiale da Galileo Galilei. In occasione di tale ricorrenza la Regione Toscana ha finanziato il progetto “Sotto il segno di Galileo. Luoghi della Scienza in Toscana” allo scopo di promuovere la diffusione della cultura scientifica e la conoscenza dei luoghi legati all’attività del grande scienziato.

Il Comune di Livorno, grazie al finanziamento, ha realizzato presso la Fortezza Vecchia una mostra didattica permanente in cui vengono illustrate, tramite pannelli esplicativi, alcune esperienze di Galileo e dei suoi discepoli dell’Accademia del Cimento, società scientifica nata a Firenze poco dopo la sua morte.

La città di Livorno, infatti, può a ragione essere annoverata tra i luoghi della Toscana legati all’attività di ricerca svolta da Galileo e dai suoi seguaci.

Il Porto Mediceo è associato al nome di Galileo perché si ritiene che, tra il 1590 e il 1592, Giovanni de’ Medici abbia progettato una macchina per vuotare la darsena di Livorno, riguardo alla quale Galileo espresse un giudizio negativo.

Inoltre nel 1617, sopra una navetta dentro del molo, Galileo fu a Livorno per fare delle prove con il suo celatone, un dispositivo concepito per utilizzare il

cannocchiale in navigazione.

Alcune fonti attestano che Galileo svolse esperimenti per la messa a punto del cannocchiale proprio sul Fanale dei Pisani.

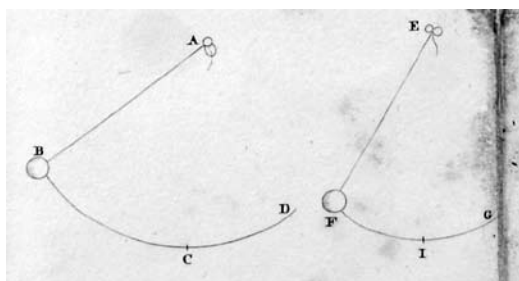
Fra la fine del 1657 e gli inizi del 1658, dopo la morte di Galileo, gli accademici del Cimento fecero a Livorno alcune esperienze sugli *agghiacciamenti*, cioè sul congelamento dei liquidi.

Infine, nel 1662, la Fortezza Vecchia fu teatro di osservazioni sul moto dei proiettili fatte anch’esse dagli Accademici del Cimento per confermare sperimentalmente alcune conclusioni del Maestro.

La mostra, intitolata “Geometrie e isocronie. Gli studi di Galileo sul moto dei proiettili e del pendolo”, affronta in particolare due temi cari allo scienziato.

Galileo mostrò infatti che il moto di un proiettile può essere considerato come la composizione di un moto orizzontale uniforme ed uno verticale uniformemente accelerato, analogo a quello della caduta di un grave, e che la composizione di questi due moti dà luogo al moto del proiettile lungo un arco di parabola. Vent’anni dopo la morte del Maestro, gli Accademici del Cimento svolsero proprio a Livorno alcuni esperimenti sul moto dei proiettili. Nella mostra viene esposta anche un’antica spingarda da braga, pezzo di artiglieria di piccolo calibro in uso dalla fine del XVI secolo.

Galileo osservò, inoltre, che il tempo di oscillazione di un pendolo non dipende né dall’ampiezza di oscillazione né dalla massa, ma solo dalla lunghezza. Un pendolo



**Sotto:**  
Figura estratta da una lettera  
di Galileo a Guidubaldo  
del Monte

può quindi essere usato come strumento per misurare con precisione gli intervalli di tempo. Nel 1641, Galileo propose l'utilizzo del pendolo come meccanismo regolatore degli orologi, e ne abbozzò un progetto, che però non fece in tempo a realizzare. Nella mostra sono esposti un orologio a pendolo e antichi cronometri da marina provenienti dall'Osservatorio Meteorologico "Pietro Monte" di Livorno.

### Galileo Galilei e il moto dei proiettili

Sin dai tempi di Aristotele il moto dei proiettili ha rappresentato un problema molto importante, non solo per le sue applicazioni militari, ma soprattutto perché è un caso molto particolare di moto, non facilmente spiegabile nell'ambito della dottrina aristotelica.

Il moto dei proiettili è stato perciò uno degli argomenti fondamentali che hanno permesso a Galileo Galilei di rivoluzionare la fisica del moto e di dare un forte contributo alla nascita della fisica moderna.

Egli affrontò in modo nuovo il problema del moto dei proiettili, al quale dedicò una parte consistente del suo libro *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*.

Galileo suppose infatti che la traiettoria di un proiettile derivi dalla composizione simultanea e senza interferenza di un moto orizzontale ed uno verticale, e non più dalla successione di un moto violento ed uno naturale, come nella fisica aristotelica.

Il moto orizzontale è equivalente a quello di un corpo non soggetto a forze e lo

spazio percorso è proporzionale al tempo impiegato a percorrerlo. Il moto verticale è equivalente a quello di un corpo in caduta libera e lo spazio percorso è proporzionale al quadrato del tempo impiegato a percorrerlo.

Quindi questi due tipi di moto si differenziano per la quantità di spazio percorso, ma non per la loro natura, come invece avviene per il moto violento e quello naturale della fisica di Aristotele.

Secondo le parole di Galileo:

*[...] supponendo cioè che il moto trasversale si mantenga sempre equabile, e che il naturale deorsum parimente mantenga il suo tenore, d'andarsi sempre accelerando secondo la proporzione duplicata de i tempi, e che tali moti e loro velocità, nel mescolarsi, non si alterino perturbino ed impedischino [...] (Discorsi, IV giornata)*

Sulla base delle sue supposizioni Galileo dimostrò anche che la traiettoria descritta da un proiettile è una parabola:

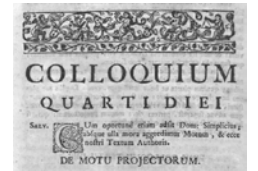
*Un proietto, mentre si muove di moto composto di un moto orizzontale equabile e di un moto deorsum naturalmente accelerato, descrive nel suo movimento una linea semiparabolica. (Discorsi, IV giornata).*

Galileo dimostrò infine che, a parità di velocità iniziale, il valore della gittata, ovvero della distanza fra il



**Sopra:**

Carta intestata dell'Osservatorio Meteorologico di Livorno con l'anno di fondazione

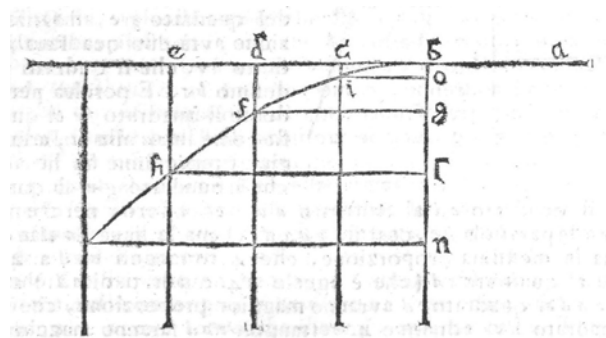


**Sopra:**

Pagina dei Discorsi

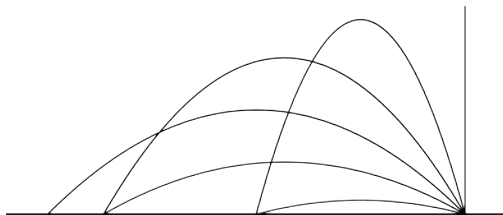
**Sotto:**

Traiettoria semiparabolica di un proiettile sparato orizzontalmente tratta dai Discorsi



**A lato:**

Traiettorie paraboliche con  
differenti angoli di lancio



punto di lancio e quello di atterraggio, è lo stesso con angoli di lancio  $\alpha$  e  $90^\circ - \alpha$ :

*Le ampiezze delle parabole descritte da proiettili, lanciati con un medesimo impeto e secondo elevazioni che superano o mancano per angoli eguali dall'angolo semiretto, sono tra di loro eguali. (Discorsi, IV giornata).*

**Sotto:**

Frontespizio dell'edizione  
del 1691 dei Saggi di  
Naturali Esperienze  
conservata nella Biblioteca  
Labronica di Livorno



Il 2 aprile 1662, vent'anni dopo la morte di Galileo Galilei, in su la torre della Fortezza Vecchia di Livorno, gli accademici del Cimento svolsero alcune osservazioni per confermare sperimentalmente le conclusioni del Maestro sul moto dei proiettili. I risultati degli esperimenti furono presentati nei *Saggi di Naturali Esperienze*.

Galileo aveva infatti ipotizzato che, trascurando la resistenza dell'aria, un proiettile sparato di punto in bianco, cioè in orizzontale, cada a terra nello stesso tempo di uno in caduta libera.

Dal Mastio di Matilde della Fortezza Vecchia di Livorno, gli Accademici del Cimento fecero degli esperimenti per verificare questa teoria, sparando dei proiettili in di-

rezione del mare. Il tempo veniva misurato contando le oscillazioni di un pendolo:

*[...] si fecero più tiri di punto in bianco verso la marina con palle fasciate, e quelle si videro dar sull'acqua in distanza di circa due terzi di miglio in tempo di vibrazioni quattro, e mezzo, l'andare, e 'l ritorno di ciascuna delle quali importava un mezzo minuto secondo. Osservata poi la caduta perpendicolare d'altre palle uguali dalla suddetta altezza di braccia cinquanta, si trovò farsi in numero quattro delle medesime vibrazioni. (Saggi di Naturali Esperienze)*

Questi esperimenti confermarono quindi, con buona approssimazione, le ipotesi di Galileo.

Gli Accademici del Cimento indagarono anche su alcuni effetti della resistenza dell'aria, utilizzando tipi diversi di proiettile:

*Con colubrinetta da quattordici libbre di palla similmente di ferro, e libbre dieci di polvere fina le palle fasciate arrivarono su l'acqua in cinque delle suddette vibrazioni, e le ignude in cinque, e mezzo, e parve che dessero alquanto più lontano delle fasciate. (Saggi di Naturali Esperienze).*

Gli esperimenti sulla resistenza dell'aria non si esaurirono con quelli fatti dal Mastio di Matilde, ma tutti risultarono in accordo con le previsioni di Galileo:

*Onde alcuni si confermarono sempre più in quest'opinione del medesimo Galileo, che l'aria detragga non poco all'impeto de' gravi, che la fendono, e più sensibilmente ai corpi più leggeri. (Saggi di Naturali Esperienze).*

## Galileo Galilei e il pendolo

Il pendolo descritto da Galileo Galilei è uno dei più semplici sistemi fisici esistenti, ma ha avuto un ruolo centrale nella nascita e nello sviluppo della scienza moderna, nella misura del tempo, nella navigazione e nella cultura.

Il pendolo semplice è costituito da una massa appesa ad un sottile filo con l'estremità superiore fissata ad un supporto. Il pendolo si trova in equilibrio quando il filo è nella posizione verticale con la massa verso il basso. Se spostato di un certo angolo dalla sua posizione di equilibrio e quindi lasciato libero, il pendolo oscilla a causa del suo peso.

Galileo osservò che il tempo di un'oscillazione completa, andata e ritorno, di un pendolo semplice non dipende né dall'ampiezza dell'angolo di oscillazione né dalla massa del corpo che oscilla, ma solo dalla lunghezza del filo.

L'indipendenza dei tempi di oscillazione dall'ampiezza è detta legge dell'isocronismo del pendolo. Il termine isocrono si riferisce infatti a fenomeni che hanno uguale durata. Nel caso del pendolo l'isocronismo non è affatto ovvio: il senso comune porterebbe a credere che le oscillazioni più ampie debbano durare più a lungo. Galileo notò invece che quando l'ampiezza è più grande il moto del pendolo è più veloce, cosicché il tempo necessario per completare l'oscillazione è lo stesso. Di conseguenza un pendolo può essere usato come strumento per misurare con precisione gli intervalli di tempo. In realtà, il pendolo

semplice è strettamente isocrono soltanto se le sue oscillazioni sono di piccola ampiezza, come fu scoperto successivamente da Marin Mersenne (1588 - 1648).

Si narra che Galileo, non ancora ventenne, intuì la legge dell'isocronismo del pendolo osservando il dondolio di una lampada nel Duomo di Pisa. Come racconta il suo discepolo Vincenzio Viviani (1622 - 1703):

*[...] con la sagacità del suo ingegno inventò quella semplicissima e regolata misura del tempo per mezzo del pendolo, non prima da alcun altro avvertita, pigliando occasione d'osservarla dal moto d'una lampada, mentre era un giorno nel Duomo di Pisa; e facendone esperienze esattissime, si accertò dell'egualità delle sue vibrazioni [...]*

Non esistono prove certe che questo evento, riportato dal Viviani in più occasioni, sia vero. In realtà, la lampada attualmente sospesa nel Duomo è successiva all'epoca di tali osservazioni, ma a quel tempo era probabilmente presente un'altra lampada, oggi conservata nel Camposanto Monumentale di Pisa.

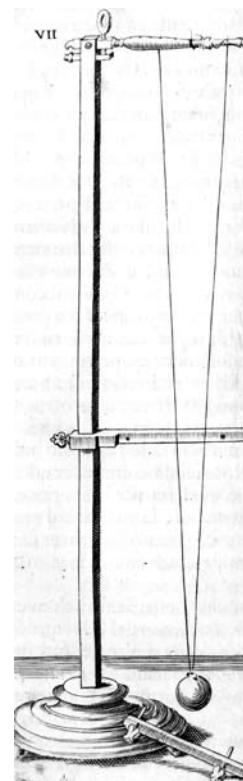
Gli studi di Galileo sul pendolo sono stati di fondamentale importanza, come testimonia il fatto che essi sono stati ripresi ed approfonditi da molti grandi scienziati. Alcuni sviluppi particolarmente significativi sono dovuti alle opere di Huygens, Newton e Foucault.

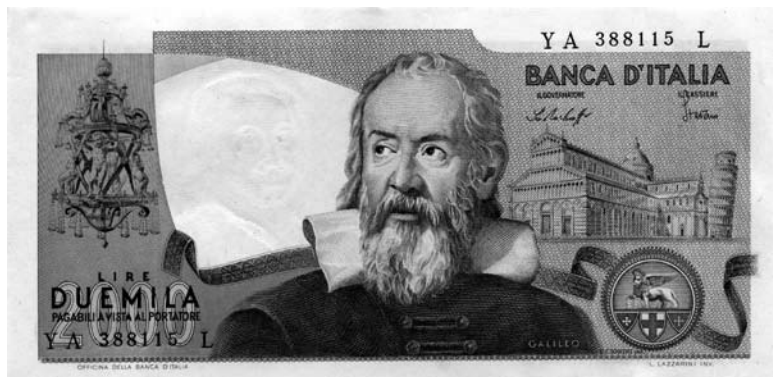
Christiaan Huygens (1629 - 1695) dimostrò in particolare che, mentre l'isocronismo del pendolo semplice vale solo per piccole oscillazioni, le oscillazioni di un altro tipo di pendolo, il pendolo cicloidale,



**Sopra:**  
Pendolo semplice

**Sotto:**  
Disegno del pendolo utilizzato dagli Accademici del Cimento





**Sopra:**  
Bancnote da duemila lire  
con raffigurati Galileo, il  
Duomo di Pisa e la lampada  
attualmente presente  
nel Duomo

sono sempre isocrone indipendentemente dalla loro ampiezza. Il pendolo cicloidale può essere realizzato sospendendo il filo del pendolo tra due archi di una particolare curva, la cicloide, in modo tale che durante l'oscillazione esso segua il loro profilo facendo percorrere anche alla massa attaccata una traiettoria cicloidale.

Huygens ottenne anche l'espressione matematica corretta del periodo del pendolo semplice per piccole oscillazioni, dove con periodo si intende il tempo che un pendolo impiega a compiere un'oscillazione completa, e la sua dipendenza dalla gravità.

Nonostante Galileo e Huygens avessero scoperto le leggi fondamentali del pendolo semplice, uno studio completo a partire da principi fondamentali della fisica si ebbe successivamente nell'ambito della teoria del moto sviluppata da Isaac Newton (1643 - 1727).

Nella fisica newtoniana le piccole oscillazioni di un pendolo rappresentano un primo esempio di moto armonico semplice, le cui leggi sono alla base di molte teorie moderne della fisica.

Le leggi del moto di Newton mostrano an-

che che, se un pendolo è posizionato su uno dei poli terrestri, il piano verticale in cui oscilla si mantiene fisso nello spazio. Un osservatore fermo rispetto alla Terra vede quindi tale piano ruotare di 360 gradi in 24 ore. Lontano dal polo il moto è più complesso, ma in parte il fenomeno si verifica ugualmente.

Sulla base di questo principio nel 1851, Jean Bernard Léon Foucault (1819 - 1868) fornì una prova della rotazione della Terra con un pendolo di 67 m di lunghezza sospeso alla cupola del Pantheon di Parigi.

Il pendolo ha anche consentito la costruzione di strumenti molto importanti per lo studio di fenomeni naturali, in particolare gli orologi a pendolo per la misura accurata del tempo e i sismografi a pendolo per l'osservazione dei terremoti.

Galileo stesso ipotizzò l'applicazione del pendolo all'orologio, come meccanismo per regolarne il movimento:

*[...] siccome la fallacia degli orologi consiste principalmente nel non s'essere sin qui potuto fabbricare quello che noi chiamiamo il tempo dell'orologio, tanto aggiustatamente che faccia le sue vibrazioni eguali; così in questo mio pendolo semplicissimo, e non soggetto ad alterazione alcuna, si contiene il modo di mantenere sempre egualissime le misure del tempo [...] (Lettera a Lorenzo Realio, giugno 1637).*

L'allievo di Galileo, Vincenzo Viviani, in una lettera del 20 agosto 1659 al Principe Leopoldo de' Medici, descrive un orologio a pendolo progettato dal Maestro un anno prima della morte. Galileo non ebbe

**Sotto:**  
Riproduzione del  
sismografo di Bina  
(Osservatorio sismico  
"Andrea Bina", Perugia)



quindi modo di realizzare questo orologio, che fu solo parzialmente costruito dal figlio Vincenzo. È stato comunque successivamente dimostrato che il meccanismo avrebbe funzionato. La costruzione di un orologio a pendolo effettivamente funzionante avverrà però solo alcuni anni più tardi, nel 1657, per opera di Christiaan Huygens.

Esistono diversi tipi di sismografo, molti dei quali basati su un meccanismo a pendolo. L'idea di base è quella di utilizzare una pesante massa sospesa a un telaio saldamente fissato al suolo. Quando un'onda sismica raggiunge lo strumento, il suolo e il telaio iniziano a oscillare, mentre la massa sospesa tende a rimanere ferma a causa della sua inerzia. Se la massa è dotata di un dispositivo tracciante, per esempio una punta scrivente a contatto con un tamburo rotante fissato al suolo, si può registrare l'andamento delle oscillazioni. Nel 1751 il padre benedettino Andrea Bina (1724 - ?) propose il primo meccanismo capace di registrare i terremoti:

*Sospeso alla trave di una stanza [...] un mobilissimo pendolo nella cui inferiore estremità sia inserito un globo [...] di nobile peso, e in questo sia impiantato uno stilo di circa un pollice e mezzo di lunghezza, colla punta verso il pavimento; si riempia di finissima rena [...] una cassetta di legno [...] e la punta dello stilo sia un tantino intinta nell'arena [...] Dalli solchi che lo stilo vi scaverà, si potrà conoscere la qualità e l'impeto delle scosse. (Ragionamento sopra la Cagione de' Terremoti)*

Orologi e sismografi basati sul pendolo sono stati strumenti fondamentali nel campo delle ricerche geofisiche, in particolare negli osservatori meteorologici e sismici. È il caso di citare la presenza a Livorno di due antichi osservatori di questo tipo.

Nel 1856 il padre barnabita Pietro Monte (1823 – 1888) fondò infatti a Livorno un osservatorio meteorologico. La sede definitiva dell'osservatorio fu realizzata nel 1862 presso il Regio Liceo, l'attuale Liceo Classico. Le attività si interruppero nell'estate del 1943 a causa dei bombardamenti aerei, ma ripresero successivamente dal 1951 al 1997. La serie storica di dati dell'osservatorio meteorologico di Livorno è una delle più lunghe del mondo. Nel 1912 Giuseppe Schiavazzi (1868 – 1952) fondò invece a Livorno un osservatorio sismico, nei locali dell'attuale tribunale penale. In seguito l'osservatorio fu ampliato e perfezionato; nel 1916 il laboratorio era dotato di numerosi strumenti sismici, adatti soprattutto a registrare terremoti localizzati a grande distanza. Nel 1940 Schiavazzi interruppe le osservazioni a causa degli eventi bellici, ma l'attività dell'osservatorio riprese nel dopoguerra fino al 1995.

**Stefano Taddei, Francesco Primo Vaccari, Federica Zabini**  
Istituto di Biometeorologia  
del CNR - Firenze



**Sopra:**  
Modello dell'orologio di Galileo (IMSS, Firenze)

**Sotto:**  
Osservatorio meteorologico "Pietro Monte"

