

176. Il pendolo di Foucault

Michele T. Mazzucato
mazzucatomichele@tiscali.it

Abstract

The French physicist Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868) and his experiments with the pendulum. The visual and practical demonstration of the Earth rotation.

Vous êtes invités à venir voir tourner la Terre
Léon Foucault, Parigi 1851

Jean Bernard Léon Foucault

Nel marzo del 1851 venne inaugurato un celebre esperimento pubblico che permise di dimostrare, prima volta nella storia, la rotazione della Terra attorno al proprio asse polare attraverso l'effetto della forza apparente di Coriolis senza ricorrere a osservazioni astronomiche. All'interno del Panthéon parigino venne sospeso alla cupola centrale un pendolo costituito da una sfera metallica dal peso di 28 chilogrammi mediante un cavo d'acciaio lungo 67 metri e 1,4 millimetri di diametro. Sotto al pendolo, per una superficie circolare di 3 metri di raggio, venne sistemato uno strato uniforme di sabbia sul quale una punta fissata sulla sfera lasciava una traccia visiva ad ogni oscillazione. Era il cosiddetto pendolo di Foucault dal nome di uno dei più noti fisici sperimentali francesi suo ideatore: Jean Bernard Léon Foucault.



Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868).



Emissione filatelica francese in occasione del primo centenario della morte di Léon Foucault (1968).

Foucault nacque a Parigi il sabato 18 settembre 1819. Intraprese studi medici che lasciò per approfondire quelli fisici. Lavorò anche presso l'Osservatorio Astronomico di Parigi. Si occupò di elettromagnetismo, di ottica e di geofisica. Insieme a Hippolyte Louis Armand Fizeau (1819-1896) effettuò esperimenti sulla fotografia solare e apportò miglioramenti delle tecniche di dagherrotipia (il primo procedimento fotografico per lo sviluppo delle immagini) e scoprendo il difetto di reciprocità. Misurò con grande precisione la velocità della luce con il dispositivo degli specchi rotanti (1862) e dimostrò che essa è inversamente proporzionale all'indice di rifrazione del mezzo che attraversa (1850). Nel 1851 effettuò la celebre esperienza pubblica, oggetto di questo scritto, sulla proprietà di invarianza del piano di oscillazione del pendolo. Ideò il giroscopio (1852), un polarizzatore per la luce (1857) e apportò miglioramenti agli strumenti ottici in particolare ai metodi di lavorazione degli specchi utilizzati nei telescopi (ancora oggi per definire la qualità di lenti e specchi si esegue un metodo da lui sviluppato e denominato *test di Foucault*). Scoprì le correnti elettriche parassite (1855), denominate anche *correnti di Foucault*, generate nei conduttori dai campi magnetici.

Membro straniero alla Royal Society di Londra (1864), membro del Bureau des Longitudes (1862), membro fondatore della Société Française de Photographie (1854), ottenne numerosi riconoscimenti fra cui il cavalierato della Legione d'onore francese (1850) e la medaglia Copley (1855). Morì a Parigi martedì 11 febbraio 1868 all'età di quarantanove anni a seguito di una paralisi progressiva (oggi nota anche come morbo di Lou Gehrig) le cui prime acute manifestazioni si presentarono già nel luglio 1867.

A Foucault è dedicato un cratere selenico (50.4° N / 39.7° W; 23 chilometri di diametro e 2100 metri di altezza) e l'asteroide (5668) *Foucault* scoperto nel marzo 1984 dall'astronomo Antonín Mrkos (1918-1996). Il nome Foucault (n. 46 sul lato École Militaire) è compreso nella lista dei settantadue nominativi di personalità francesi scelti dallo stesso Alexandre Gustave Eiffel (1832-1923) che volle incidervi (diciotto per lato) ai quattro lati esterni (Trocadéro, Grenelle, École Militaire e La Boudonnais-Paris) del primo piano della Torre Eiffel (1889) ad una altezza di circa 60 metri dal suolo. A lato la tomba di Léon Foucault nel cimitero di Montmartre a Parigi.



L'esperimento di Foucault del 1851

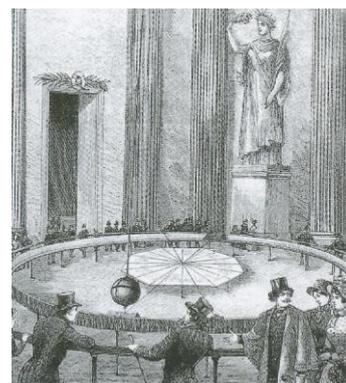
L'esperimento pubblico del Panthéon seguì i due precedenti effettuati dallo stesso Foucault. Il primo, nel gennaio 1851, utilizzando un pendolo di circa 2 metri nella cantina della sua casa in rue d'Assas e il secondo, nel febbraio 1851, con un pendolo di circa 11 metri nella Sala Meridiana presso l'Osservatorio Astronomico di Parigi, dove stava lavorando proprio alla sistemazione di un pendolo conico necessario a orientare un telescopio rilevandone appunto dei movimenti anomali nel suo moto e cercando quindi di capirne le cause.

A firma di François Jean Dominique Arago (1786-1853), allora direttore dell'Osservatorio di Parigi, il biglietto di invito recitava: “*Siete inviati a venire a vedere la Terra girare...*”.

Di questa sua scoperta Foucault scriveva: “Il fenomeno si sviluppa con calma: è fatale, irreversibile... Si sente, vedendolo nascere e intensificarsi, che non è possibile per lo sperimentatore affrontarne o ritardarne la manifestazione... Ogni uomo davanti ad un tale fatto... per qualche istante rimane pensoso e silenzioso e si ritira quindi recando in sé il senso pressante e vivissimo del nostro incessante movimento nello spazio”.

L'esperimento del Panthéon nel 1851, sotto la guida di Foucault e dell'ingegnere Paul Gustave Froment (1815-1865), ebbe enorme successo e risonanza nella pubblica opinione che venne replicato e riprodotto in moltissime località del mondo.

Sempre al Panthéon di Parigi venne effettuato un altro esperimento nel 1902, in occasione del cinquantenario della famosa esperienza di Foucault, sotto la guida di Nicolas Camille Flammarion (1842-1925) e dell'ingegnere Alphonse Berget (1860-1934) e dal 1995, la cui installazione è stata affidata all'ingegnere Jacques Foiret, è possibile ammirarne una terza fedele ricostruzione. Oggi il pendolo di Foucault viene replicato in molti istituti, musei e luoghi di scienza e conoscenza pressoché a scopi prettamente didattici ma d'allora oggetto di fascino e di riflessioni.

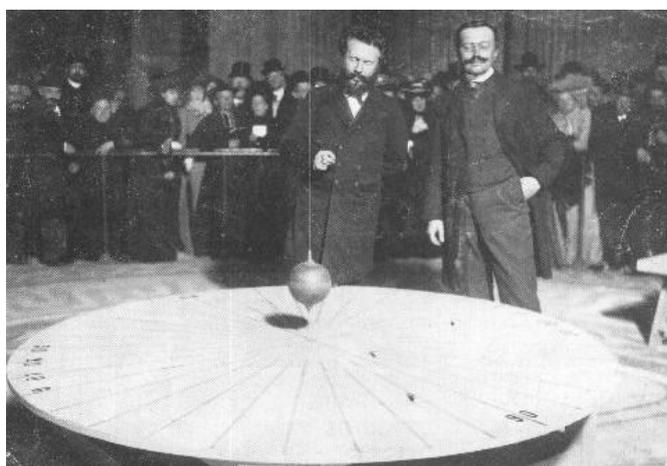


Dati dell'esperimento del Panthéon 1851

| | | |
|--|-------------------------|-----------------------|
| giorno siderale | 23.93h = 23h 56m 04.91s | ts |
| accelerazione di gravità | 9.81 m/s ² | g |
| peso sfera | 28 kg | |
| diametro sfera | 38 cm | |
| lunghezza cavo | 67 m | L |
| durata doppia oscillazione | 16.4 s | $2\pi(L/g)^{0.5}$ |
| spostamento lineare ogni doppia oscillazione | 2.5 mm verso est | |
| latitudine del luogo | 48.87° = 48° 52' Nord | φ |
| tempo di rotazione completa del piano (in ore) | 31.78h = 31h 46m 41s | ts/sen φ |
| tempo di rotazione completa del piano (in gradi) | 477.97° | 360/sen φ |
| componente verticale (gradi/ora) | 11.33° = 11° 19' 43'' | (360/ts)sen φ |
| componente orizzontale (gradi/ora) | 9.89° = 9° 53' 39'' | (360/ts)cos φ |

L'esperimento di Flammarion del 1902

In omaggio a Foucault e al suo esperimento del 1851 Flammarion, nel prologo del suo discorso inaugurale del 22 ottobre, disse: *“Era la dimostrazione pratica, evidente, maestosa, del movimento di rotazione del nostro globo e l'affermazione grammaticale del titolo di pianeta, o ‘astro mobile’, per il mondo che abitiamo”*.



Il giornale francese *Le Petit Parisien* (1876-1944) nel *Supplément Littéraire Illustré* di domenica 2 novembre 1902 riporta l'esperimento di Flammarion.

Che il periodo dipendesse dalla sua lunghezza e dal valore dell'accelerazione di gravità del luogo erano proprietà caratteristiche del moto di un pendolo già conosciute alla fine del XVI secolo, Foucault studiò e aggiunse quella della rotazione apparente del suo piano di oscillazione.

L'oscillazione del pendolo è indipendente dalla rotazione che la Terra compie ruotando, da ovest verso est, intorno al proprio asse polare in 23 ore 56 minuti 04.91 secondi (86164.91 secondi corrispondenti all'intervallo di tempo, denominato giorno siderale, che intercorre tra due passaggi consecutivi di una stella, supposta fissa nella sfera celeste, sullo stesso meridiano del luogo di osservazione) rispetto alle stelle fisse (sistema di riferimento inerziale). Il piano di oscillazione del pendolo mantiene invariata la direzione rispetto alle stelle fisse, ma l'osservatore che ruota assieme alla Terra (sistema di riferimento non inerziale), vedrà tale piano ruotare lentamente di un angolo dipendente dalla latitudine del luogo.

Una completa rotazione apparente del piano di oscillazione del pendolo (giorno pendolare) avviene in un giorno siderale di 23.93 ore ($360/23.93 = 15.041^\circ$ ogni ora) al Polo Nord (in senso orario) e al Polo Sud (in senso antiorario). A latitudini intermedie, procedendo dai poli all'equatore, la rotazione rallenta sempre più fino ad arrestarsi.

**Rotazione completa del piano di oscillazione del pendolo
e relativa velocità angolare alle varie latitudini geografiche**

| latitudine | rotazione completa in | velocità angolare di |
|------------|-----------------------|----------------------|
| ± 90° | 23.93 ore | 15.04° /ora |
| ± 80° | 24.30 ore | 14.81° /ora |
| ± 70° | 25.47 ore | 14.13° /ora |
| ± 60° | 27.63 ore | 13.03° /ora |
| ± 50° | 31.24 ore | 11.52° /ora |
| ± 40° | 37.24 ore | 9.67° /ora |
| ± 30° | 47.87 ore | 7.52° /ora |
| ± 20° | 69.98 ore | 5.14° /ora |
| ± 10° | 137.83 ore | 2.61° /ora |
| ± 0° | 0.00 ore | 0.00° /ora |

rot. compl. = 23.93ore/senφ [in ore] vel. ang. = (360°/23.93ore)senφ [in gradi/ora]

A latitudini intermedie la frequenza di rotazione polare, $\omega = 360^\circ/23,93h$, viene scomposta nelle due componenti orizzontale, $\omega_o = (360^\circ/23,93h)\cos\varphi$, tangente alla superficie terrestre e astronomicamente vista come la velocità angolare di transito delle stelle allo zenit del luogo e verticale, $\omega_v = (360^\circ/23,93h)\sin\varphi$, perpendicolare al punto di latitudine φ e astronomicamente vista come velocità angolare di transito delle stelle all'orizzonte. La prima ha influenza sul moto verticale degli oggetti (deviazione verso est dei corpi in caduta libera) ma non sul moto del pendolo. Mentre è la seconda componente a influenzare in maniera macroscopica la rotazione apparente del piano di oscillazione del pendolo.

La scoperta degli effetti della componente verticale della rotazione terrestre è dovuta agli studi di Siméon Denis Poisson (1781-1840) e del suo allievo Gustave Gaspard de Coriolis (1792-1843) nei lavori *Mémoire sur le mouvement des projectiles dans l'air, en ayant égard à la rotation de la Terre* (1837) e *Sur les équations du mouvement relatif des systèmes de corps* (1835) mentre Foucault rese visibili tali effetti, il suo scritto è *Démonstration du Mouvement de Rotation de la Terre au moyen du Pendule* (1851).

Un quarto e ultimo pendolo, anch'esso di 11 metri come quello dell'Osservatorio Astronomico, venne realizzato ed esposto nel Palazzo dell'Industria (demolito nel 1900) da Foucault per la prima Esposizione Universale tenutasi a Parigi nel maggio-novembre 1855.

Sicuramente il migliore tra quelli realizzati da Foucault in quanto beneficiante dell'esperienza acquisita dai precedenti. Nell'occasione Foucault era membro della giuria della classe 9 *Impiego economico del calore, della luce e dell'elettricità* (come lo sarà per la seconda Esposizione Universale parigina del 1867 però per la classe 12 *Strumenti di precisione e materiale didattico*) pertanto il fisico scozzese David Brewster (1781-1868) in qualità di presidente e gli altri membri della giuria mista nel loro rapporto scriveranno: "*Le Jury, qui aurait décerné la plus haute distinction à M. Foucault, s'il n'avait pas été hors de concours comme juré, a décidé que sa belle découverte serait mentionnée de la manière la plus honorable*". Il pendolo dell'Esposizione e il suo nuovo sistema di guida furono donati, nel 1869, al Conservatoire Impérial des Arts et Métiers.

L'opera completa di Foucault *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault* (2 volumi, 1878) è stata curata da Aimée Nicole Lepetit (1793-1880), madre di Foucault, e da Charles Marie Gariel (1841-1924), professore di fisica e marito di Marguerite (1846-1928), nipote di Foucault figlia della sorella Aimée Alexandrine Fortunée (1823-1904) con il primo marito.

A lato l'interno del Panthéon, opera dell'architetto Jacques Germain Soufflot (1713-1780), con l'esposizione del pendolo di Foucault installato dal 1995.



Bibliografia

Aczel, D. Amir, Pendulum. Léon Foucault e il trionfo della scienza, Il Saggiatore, Milano 2006

Tobin, William, *Léon Foucault*, EDP Sciences 2002

Receuil des travaux scientifiques de Léon Foucault (2 volumi, 1878) online (University of Strasbourg)

<http://imgbase-scd-ulp.u-strasbg.fr/displayimage.php?album=627&pos=3> vol. I

<http://imgbase-scd-ulp.u-strasbg.fr/displayimage.php?album=648&pos=1> vol. II

Simulazione dell'esperimento di Foucault a cura di Massimo Fantin, 2005

<http://digilander.libero.it/fantinma/foucault/foucault.htm>

Simulazione dell'esperimento di Foucault (Università di Nantes)

<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/Meca/RefTerre/Foucault0.html>