

Comune di Padova

Il Pendolo di Foucault
a
Palazzo della Ragione

The Foucault Pendulum
in
the "Salone"



On 24 October 2021, at the Palazzo della Ragione, the Lions Club Padova Host, with the contribution of all the Lions of Padua and its Province, presented the completed restoration of the PENDULUM DÌ FOUCAULT.
The project, started in the context of the "Day of Light" wanted as a service by the then President of the L.C. Padova Host, prof. ANTONIO BIANCHINI, emeritus professor of Astronomy at the University of Padua, was completed on the 800th anniversary of the foundation of our University and this event meant the great collaboration with the Institutions and in particular with the Municipal Administration in the figure of the Mayor SERGIO GIORDANI.
We have delivered to the city a piece of the cultural beauties that, grouped under the name of URBS PICTA, have included Padua in the UNESCO World Heritage list.

Dr. Riccardo Bastianello
President
Lions Club Padova Host

More than a decade after its installation, Foucault's pendulum is now part of the hall environment. Strongly desired by the then mayor Flavio Zanonato and carried out with the collaboration of the Physics Department of the University, it repeats with the addition of modern electronic technologies an experiment that still today arouses an extraordinary suggestion: it demonstrates a fundamental rule of physics and motion of the our planet.
The Salone itself is, as defined in this small but precious publication, "a medieval astronomical machine": its frescoes are inspired by the thought of Pietro d'Abano, strongly characterized by astrological and kabbalistic symbols.
This makes the positioning of this device even more meaningful, simple in its basic rules but complex in its operation, to the point of requiring a restoration of the electronic part carried out through a collaboration between the Municipality of Padua, the Lions Clubs of the province of Padua, the District 108TA3 Foundation. To these goes a sincere thanks for having brought this little gem back to its full functioning, wanted and maintained among the many scientific dissemination initiatives organized by our city.

Sergio Giordani
Sindaco

The construction of this machine is motivated by the belief that the knowledge of a society thrives on the development of research as well as on the education of making research, and the hope is that of bringing the university world closer to citizens, offering an important scientific work to the city's heritage.

Giacomo Torzo
Università degli Studi di Padova. LabTrek

Padova 2022

Il 24 ottobre 2021, presso il Palazzo della Ragione, il Lions Club Padova Host ,con il contributo di tutti i Lions di Padova e Provincia, ha presentato il restauro ultimato del PENDOLO DÌ FOUCAULT.
Il progetto, iniziato nel contesto della "Giornata della Luce" voluta come service dall'allora Presidente del L.C. Padova Host, prof. ANTONIO BIANCHINI, professore emerito di Astronomia presso l'Ateneo Patavino, è stato portato a compimento nella ricorrenza degli 800 anni dalla fondazione della nostra Università e questo evento havoluto significare la grande collaborazione con le Istituzioni e in particolar modo con l'Amm nistazione Comunale nella figura del Sindaco SERGIO GIORDANI .
Abbiamo consegnato alla Città un pezzo delle bellezze culturali che raggruppate sotto il nome di URBS PICTA, hanno inserito Padova nella lista del Patrimonio Mondiale dell'UNESCO

.

Dr. Riccardo Bastianello
Presidente
Lions Club Padova Host

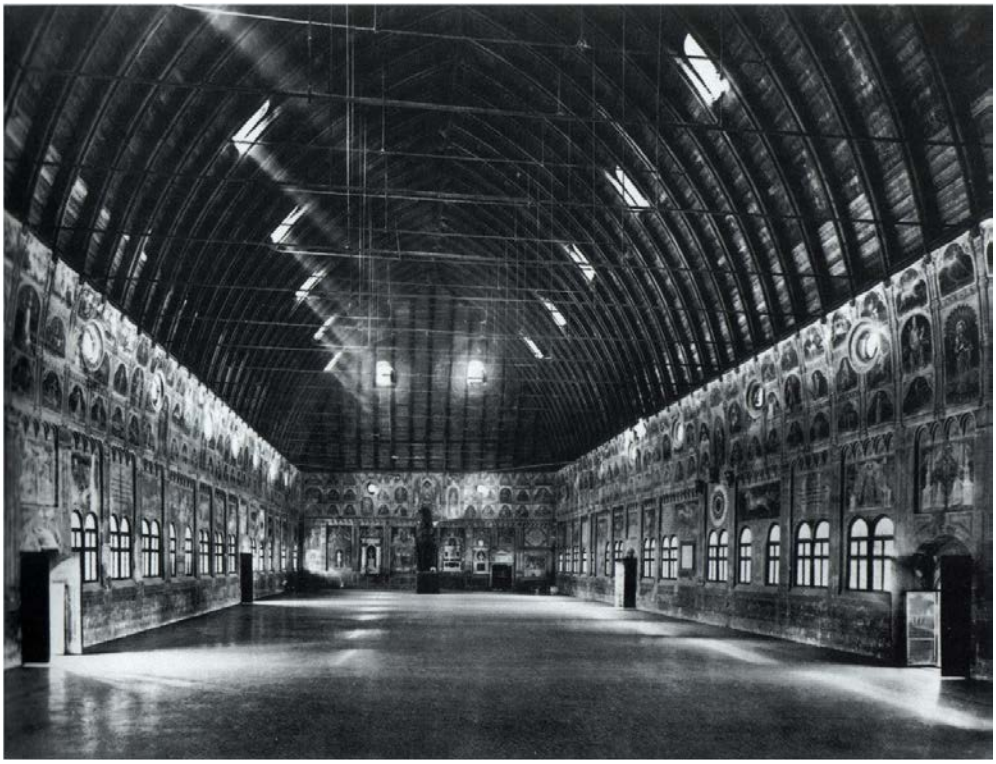
Dopo oltre un decennio dal suo allestimento, il pendolo di Foucault fa ormai parte dell'ambiente del Salone. Voluto fortemente dall'allora sindaco Flavio Zanonato e realizzato con la collaborazione del Dipartimento di Fisica dell'Università, ripete con l'aggiunta delle moderne tecnologie elettroniche un esperimento che ancora oggi suscita una straordinaria suggestione: dimostra una regola fondamentale della fisica e del moto del nostro pianeta.
Il Salone è di per sé, come viene definito in questa piccola ma preziosa pubblicazione, "una macchina astronomica medievale": i suoi affreschi sono ispirati al pensiero di Pietro d'Abano fortemente caratterizzato da simbologie astrologiche e cabalistiche.
Questo rende ancora più significativa la collocazione di questo apparecchio, semplice nelle sue regole prime ma complesso nel suo funzionamento, al punto da richiedere un restauro della parte elettronica realizzato attraverso una collaborazione tra il Comune di Padova, i Lions Club della provincia di Padova, la Fondazione del distretto 108TA3. A questi va un sincero ringraziamento per aver riportato al suo pieno funzionamento questo piccolo gioiello, voluto e mantenuto tra le molte iniziative di divulgazio ne scientifica organizzate dalla nostra città.

Sergio Giordani
Sindaco

La costruzione di questa macchina è stata motivata dalla convinzione che il sapere di una società si costruisca tanto attraverso la ricerca, quanto attraverso l'educazione alla ricerca, e la speranza è quella di avvicinare il mondo universitario a quello dei cittadini offrendo un brano di scienza come patrimonio della città.

Giacomo Torzo
Università degli Studi di Padova . LabTrek

Padova 2022



Palazzo della Ragione, Padova, Italia
The "Salone", Padova, Itally

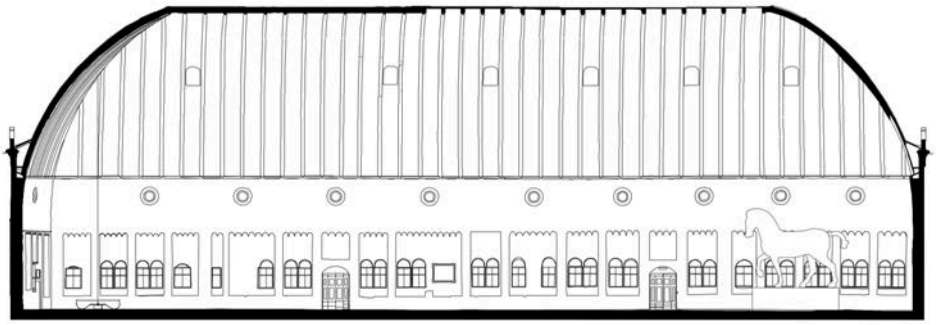
The Foucault Pendulum in the "Salone"

The municipality of Padova, together with the Physics Department of the University of Padova, promoted the realization of a Foucault pendulum inside of the main hall of the Palazzo della Ragione (Salone).
The choice of setting-up a Foucault pendulum inside the Salone was motivated not only by the opportunity offered by this tall dome, but also by the fact that the monument itself is a medieval "astronomical machine".

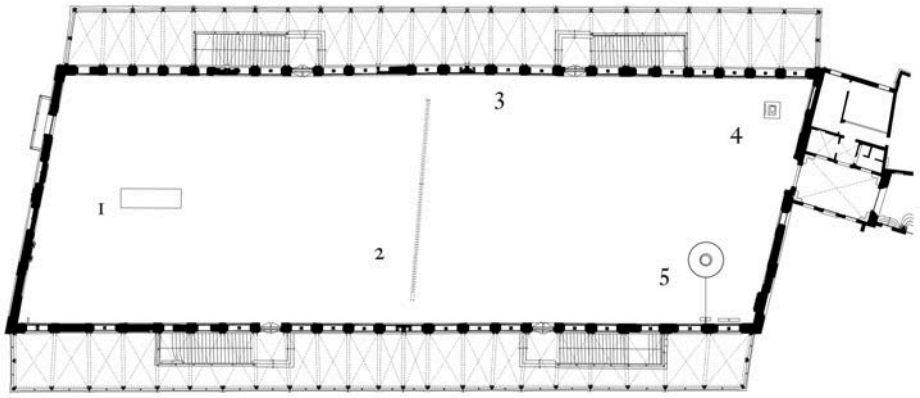
The pendulum is placed inside the Salone together with the Pietra del Vituperio [Stone of Shame], where insolvent debtors were exposed before being banned from the city, with the Wooden Horse realized for a tournament in 1466, with the Gnomon (Solar clock) made by a hole in the south wall and a ruler on the floor, and with the Ciclo di affreschi, one of the very few medieval astrological frescoes surviving in Europe nowadays.
The design of this Foucault pendulum arises from the three major technical demands required by the scientific project: to set up large oscillations, to protect the device from air flows, and to establish a boundary so the public cannot interfere with the experiment.
The machinery is placed inside an heavy and deep dodecaedral tank whose border keeps visitors at the proper distance, while shielding the oscillating sphere from the ambient air flows.
The tank is made of an aluminium frame, hosting the electromagnet providing energy to the pendulum, of an aluminium plate, and of twelve slices of iron-plate, connected through butterfly metallic joints with screws in the 3 millimetres thickness.
The diameter of the tank is 4.7 metres. The pendulum is made of a 20 metres long steel wire and of a 13 kg sphere (mostly made of aluminum, with an iron bottom).
The elongation of oscillations is 2 m, and the period about 9 seconds.
The exhibition design represented a challenge not only for technical reasons, but also for the necessary confrontation with an ancient experiment, in which physicists from all over the world have tried their hand at over the last two centuries; experiment that in the last decade has inspired the design and construction of MEMS micro-gyroscopes on which the navigation of drones and satellites is based.

Il Pendolo di Foucault a Palazzo della Ragione

Il Comune di Padova, in collaborazione con il Dipartimento di Fisica dell'Università di Padova, ha promosso la realizzazione di un pendolo di Foucault nel Palazzo della Ragione.
La scelta di allestire un pendolo di Foucault entro il Salone è stata motivata non solo dalla opportunità offerta da questa alta cupola, ma anche dal fatto che lo stesso edificio è anch'esso una "macchina astronomica medievale".
Il pendolo è posizionato nel Salone accanto alla Pietra del Vituperio, sulla quale venivano fatti sedere i debitori insolventi obbligati a ripetere tre volte alla presenza di almeno 100 persone l'impegno "cedo bonis" (rinuncio ai beni) prima di essere espulsi dalla città; al Cavallo ligneo, realizzato nel 1466 per una giostra e donato nel 1837 alla città dalla famiglia Capodilista; allo Gnomone (orologio solare) costituito da un foro nella parete sud e da un regolo marmoreo nel pavimento; al Ciclo di affreschi che è uno dei rarissimi cicli astrologici medievali giunti fino ai nostri giorni.
La progettazione architettonica di questo pendolo di Foucault risponde alle tre principali richieste fatte al progetto: ottenere grandi ampiezze di oscillazione, proteggere il dispositivo rispetto a flussi d'aria, fornire una separazione che impedisca al pubblico di interferire con il moto del pendolo.
Il dispositivo è posto in una pesante e profonda vasca dodecaedrica il cui bordo mantiene i visitatori ad una distanza di sicurezza dal pendolo e che scherma la sfera oscillante dalle correnti d'aria ambientali. La vasca è composta da una struttura interna di alluminio ove è alloggiato l'elettromagnete che fornisce energia al pendolo, da una lastra di copertura in alluminio e da dodici spicchi in piastra di acciaio, connessi tra loro da giunti metallici a farfalla con viti a scomparsa nello spessore di 3 millimetri. Il diametro della vasca è di 4.7 metri. Il pendolo è costituito da un filo di acciaio lungo 20 metri e da una sfera di alluminio e ferro di 13 kg. L'ampiezza di oscillazione è 2 metri, ed il periodo circa 9 secondi.
Il progetto dell'allestimento ha rappresentato una sfida non solo per ragioni di carattere tecnico, ma anche per il necessario confronto con un esperimento antico, in cui si sono cimentati fisici di tutto il mondo negli ultimi due secoli; esperimento che nell'ultimo decennio ha ispirato la progettazione e realizzazione dei micro-giroscopi MEMS su cui si basa la navigazione di droni e satelliti.



1. *Wooden Horse* 2. *Gnomon* 3. *Frescoes* 4. *Stone of Shame* 5. *Foucault Pendulum*



1. *Wooden Horse* 2. *Gnomon* 3. *Frescoes* 4. *Stone of Shame* 5. *Foucault Pendulum*

History of the Foucault pendulum

The Foucault pendulum takes its name from the French physicist Jean Bernard Leon Foucault [1] *, the inventor of the gyroscope and of the rotating mirror method for measuring the speed of light.*
The great scientific value of the Foucault experiment with the pendulum consists in proving an astronomical phenomenon (the Earth rotation around its axis) by simply using phenomena within the Earth system.
Foucault got his first idea by chance, while working a thin bar at the lathe; the bar lateral vibrations showed a "strange" behaviour: when rotating the chuck the vibration plane remained the same.
Foucault understood the phenomenon and decided to exploit it to turn a pendulum into a probe for detecting the Earth rotation.
He made a first test in the wine cellar of his house, with a pendulum 2 meters long. In that first experiment the damping was too large: to perceive a lateral displacement he needed a longer wire.
He made a second trial at the Paris astronomical observatory with a wire 11 meters long: the result was better but still not satisfactory. The third trial is the famous one: he suspended to the top of the Pantheon dome in Paris a pendulum made of a brass sphere of 28 kg and a steel wire 67 meters long, 1.4 millimetres in diameter.
The sphere bottom carried a tip that traced grooves on a sand layer on the floor.

The Foucault pendulum mounted in the Pantheon dome in Paris

The oscillation period was 16.5 seconds, with a damping time of 6 hours. With such set-up the oscillation plane rotated 0.05 degrees per period, and with an elongation of 3 meters the pendulum traced grooves on the sand that, on the circle of maximum elongation, had a spacing of about 3 millimetres, a separation easily detected by naked eye. To make visible the slow rotation of the oscillation plane, that at the Paris latitude (about 49°) is only 11.3 degrees/hour, Foucault had to maximize the period T.
He therefore needed to maximize the pendulum length L, because $T \approx 2\pi\sqrt{(L/g)}$. Moreover he needed also a large elongation A, because the lateral displacement of the bob after each pass at the circle of maximum elongation is proportional to A. Finally, he had to use an heavy bob because, for a given friction between the tracing tip and the sand, the damping is inversely proportional to the momentum of inertia with respect to the fulcrum (i.e. to the bob mass).
These limits may be avoided nowadays, by using different techniques to monitor the oscillation plane rotation and to reduce (or compensate) the damping, nevertheless it is still important to consider that the longer is the pendulum, and the larger is its elongation, the more charming results the experiment to the observer eye.

Storia del pendolo di Foucault

Il pendolo di Foucault prende il nome dal fisico francese Jean Bernard Leon Foucault [1] , cui si deve anche l'invenzione del giroscopio e del metodo dello specchio rotante per la misura della velocità della luce.
Il grande valore scientifico dell'esperimento di Foucault con il pendolo è quello d'aver fornito una prova sperimentale di un fenomeno astronomico (la rotazione della Terra attorno al proprio asse) utilizzando un fenomeno tutto contenuto nell'ambiente terrestre.
Foucault ebbe la prima idea quasi per caso, mentre lavorava al tornio un'asta sottile le cui vibrazioni trasversali mostravano uno "strano" comportamento: se si ruotava il mandrino il piano della oscillazione restava fisso.
Foucault capì la natura del fenomeno e pensò di usarlo per trasformare un pendolo in un rivelatore del moto di rotazione della terra.
Fece, nella cantina di casa sua, un primo tentativo con un pendolo lungo circa due metri. In quel primo esperimento lo smorzamento era eccessivo: per far percepire meglio il fenomeno della rotazione del piano di oscillazione, si doveva usare un filo più lungo.
Fece così un secondo tentativo all'osservatorio astronomico di Parigi con un filo lungo circa 11 metri, ottenendo un risultato migliore, ma non ancora soddisfacente. Il terzo tentativo consistette nel collocare sotto la cupola del Pantheon di Parigi nel 1851, un pendolo costituito da una sfera in ottone di 28 kg appesa ad un filo di acciaio del diametro di 1.4 millimetri lungo 67 metri e fornita di una punta che lasciava traccia del suo movimento su uno strato di sabbia steso sul pavimento.

Il pendolo di Foucault montato nel Pantheon a Parigi

Il periodo di oscillazione era 16.5 secondi, con un tempo di smorzamento di 6 ore. Con tale allestimento il piano di oscillazione ruotava di 0.05 gradi ad ogni periodo, e con ampiezza di 3 metri il pendolo tracciava traiettorie sulla sabbia che, sul cerchio di massima elongazione, erano separate da quasi 3 millimetri, una distanza apprezzabile anche ad occhio nudo.
Per rendere visibile la lenta rotazione del piano di oscillazione, che alla latitudine di Parigi (circa 49°) corrisponde ad una rotazione di soli 11.3 gradi ogni ora, Foucault aveva bisogno di massimizzare il periodo T delle oscillazioni.
Doveva quindi massimizzare la lunghezza L del pendolo, dato che $T \approx 2\pi\sqrt{(L/g)}$. Inoltre doveva utilizzare grande ampiezza A di oscillazione, dato che lo spostamento della posizione del pendolo ad ogni successivo passaggio sul cerchio toccato dalla elongazione massima è proporzionale ad A.
Infine doveva utilizzare una grande massa, dato che a parità di attrito tra punta tracciante e sabbia lo smorzamento è inversamente proporzionale al momento di inerzia del sistema rispetto al fulcro, e quindi anche alla massa oscillante.

Questi vincoli possono essere superati al giorno d'oggi, utilizzando tecniche diverse sia per rivelare la rotazione del piano di oscillazione, sia per ridurre (fino ad annullarlo) lo smorzamento, ma resta il fatto che più lungo è il pendolo e maggiore è l'ampiezza di oscillazione, più affascinante risulta l'esperimento agli occhi dell'osservatore.

Other famous versions of the Foucault pendulum

The Foucault experiment was repeated in a much greater size eighty years later (April 12, 1931) in S. Petersburg. A pendulum 93 meters long with a bob of 54 kg, was suspended to the top of the St. Isaac cathedral dome. The oscillation amplitude was 5 meters with a period of 20 seconds. At each oscillation the bob lateral displacement was 6 millimetres. But even during the same year 1851 the Foucault experiment rose so much interest in the scientific community to induce its repetition first in the Reims' cathedral, then in the Radcliff library in Oxford, then in Dublin, New York, Rio de Janeiro, Colombo (Ceylon) and finally in Rome, inside the S. Ignacio church by the Jesuit father Angelo Secchi [2].

One year later in Groningen, Middleburg, Deventer and Haarlem (Holland), in Gdansk (Poland), Köln (Germany), Copenhagen (Denmark), and then Beijing (China). Since then the experiment was repeated many times in many different places around the world and most of the Science Centres exhibit one small or large version of it, more or less complex in its set-up. The most common

technique used to compensate the dissipative effects which damp the pendulum oscillations (e.g. the air friction) is still that firstly used by Foucault: a pulsed magnetic field attracts the iron bob when it approaches the centre. The method to show the plane rotation is often a tip tracing over a sand layer, or a circle of skittles that are hit in sequence by the oscillating bob.

Galileo Galilei : the pendulum and the isochrone oscillation

Naming the pendulum, even out of the scientific world, you'll easily discover that most of the people correctly relate this device to Galileo Galilei.

The first biographer of Galileo, Vincenzo Viviani, writes that he started studying the pendulum motion after having observe the oscillations of a lamp hanging inside the Pisa cathedral.

However his first written notes on this topic are dated 1588 , and the first real studies started only in 1602. After observing that the oscillation period is practically independent on the elongation (phenomenon named "isochronism"), he tried to find some relation among the pendulum length and period.

After his discovery the pendulum was used as a tool to measure time intervals, with useful applications in medicine (in 1602, in a letter to a friend, he explained the isochronism of long pendulum and one year later another friend, Santorio Santorio, venetian physician, started using a short pendulum, that he named "pulsilogium", to measure the heart beats of his patients).

In 1641, 77 years old and blind, Galileo proposed using the pendulum as pacemaker in clocks, and even suggested how to make it.

The first mechanical clocks were built in the IX century, but they were quite imprecise devices, missing an effective system for triggering equals time lapses, and Galileo probably suggested to couple an escapement to the pendulum of a mechanical clock as proved by the following writing from Vincenzo Viviani:

"I remember that in 1641, while I was his guest in Arcetri, he had the idea of coupling a pendulum to a mechanical clock, with the hope that the isochronal pendulum motion could compensate the clock defects. But he was blind, so he could not draw sketches for a prototype. One day his son Vincenzo came to Arcetri from Florence, and Galileo shared with him this idea starting a long discussion. Finally they agreed on how to start testing in practice what the theoretical model suggested".

Viviani writes this text in a memory dated 1659, seventeen years after the Galileo's death, and three years after the publication of the Christian Huygens' patent on the pendulum clock.[3]

Altre famose versioni del pendolo di Foucault

L'esperimento di Foucault fu ripetuto ottant'anni dopo (il 12 aprile del 1931) a S. Pietroburgo, con un allestimento eccezionale. Un pendolo di 93 metri e pesante 54 kg, fu attaccato alla sommità della cupola della cattedrale di Sant'Isacco. L'ampiezza delle oscillazioni era di 5 metri e il periodo di oscillazione di 20 secondi. Ad ogni oscillazione la punta del pendolo si spostava di 6 millimetri.

Già nello stesso anno 1851 l'esperimento di Foucault suscitò tale interesse da essere ripetuto prima nella cattedrale di Reims, poi nella Radcliffe library di Oxford, poi a Dublino, poi a New York, a Rio de Janeiro, a Colombo (Ceylon) ed infine a Roma, nella chiesa di S. Ignazio dal padre gesuita Angelo Secchi.

L'anno successivo a Groningen, Middelburg, Deventer e Haarlem (Olanda), a Danzica (Polonia), Colonia (Germania), Copenhagen (Danimarca), poi a Pechino (Cina).

L'esperimento da allora è stato ripetuto innumerevoli volte in molte diverse sedi nel mondo e buona parte degli attuali Science Centers ne posseggono uno più o meno grande, e più o meno sofisticato nelle tecniche di movimentazione e di rivelazione del movimento.

La tecnica più diffusa per compensare gli effetti dissipativi che portano a smorzare le oscillazioni del pendolo (ad esempio l'interazione con l'aria) è tutt'oggi quella utilizzata da Foucault per primo: un campo magnetico pulsato che attrae la sfera in ferro quando essa si avvicina alla verticale.

Il metodo per rivelare la rotazione del piano di oscillazione è spesso una punta che traccia su uno strato di sabbia o birilli che vengono abbattuti in sequenza.

Galileo Galilei : il pendolo e l'isocronismo delle oscillazioni

Quando si nomina un pendolo, al di fuori dell'ambiente scientifico, è frequente scoprire che i più, giustamente, collegano questo dispositivo alla figura di Galileo Galilei.

Il primo biografo di Galileo, Vincenzo Viviani, scrive che egli aveva intrapreso lo studio del moto del pendolo dopo aver osservato il moto di oscillazione di una lampada sospesa nella Cattedrale di Pisa.

Tuttavia le prime annotazioni di Galileo su questo tema risalgono al 1588 e i primi veri studi iniziarono solo nel 1602. Accorgendosi che il periodo di oscillazione di un pendolo è praticamente indipendente dalla sua ampiezza (fenomeno detto "isocronismo"), cercò di trovare le relazioni tra la lunghezza, il peso ed il periodo. Grazie a questa sua scoperta il pendolo venne usato come strumento per misurare gli intervalli di tempo, trovando applicazione per esempio in medicina (nel 1602, in una lettera ad un amico, egli spiegava l'isocronismo dei pendoli di grande lunghezza, ed un anno dopo, un altro suo amico, Santorio, medico veneziano, cominciò ad usare un corto pendolo, da lui battezzato "pulsilogium", per misurare il battito cardiaco dei suoi pazienti).

Nel 1641, all'età di 77 anni, ormai cieco, Galileo propose l'utilizzo del pendolo come meccanismo regolatore degli orologi, e ne abbozzò addirittura un progetto. L'orologio meccanico esisteva infatti già da molto tempo: i primi prototipi risalgono a IX secolo, ma si trattava di dispositivi assai poco precisi, in cui mancava un efficace sistema per la scansione regolare di intervalli di tempo, e Galileo pensò di accoppiare un meccanismo a scappamento al pendolo di un orologio meccanico, come riportato nel passo seguente di Vincenzo Viviani:

"Nel 1641, mentre soggiornavo nella sua villa in Arcetri, ricordo che gli venne l'idea che si sarebbe potuto accoppiare un pendolo ad un orologio mosso da pesi o molle, sperando che il moto regolare del pendolo potesse correggerne i difetti. Ma essendo cieco non poteva tracciare disegni per un prototipo. Un giorno venne da Firenze ad Arcetri suo figlio Vincenzio, e Galileo gli confidò
questa idea, e ne seguirono lunghe discussioni.

Alla fine decisero per uno schema da cui partire per provare quali fossero in pratica gli effetti che il modello teorico prevedeva."

Viviani scrive questo passo in una memoria del 1659, diciassette anni dalla morte di Galileo, e tre anni dopo la pubblicazione del brevetto di Christian Huygens sull'orologio a pendolo[3].

Galileo and the Foucault's effect

Galileo had outside the window of his office at Padova University a large pendulum 10 meters long, whose bob was 1 kg metal ball. Therefore he could perform the Foucault experiment and he could have discovered the precession of the plane of oscillation due to the Earth rotation. Indeed maybe he guessed something related to the phenomenon, because in the notes written about the pendulum by his scholar Vincenzo Viviani we may read: "...it is slightly deviating from the previous track…". It is interesting to read a fragment from the First Day of Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due Nuove Scienze ("Discourses and mathematical demonstrations on two New Sciences").

SALVIATI. ... We come now to the other questions, relating to pendulums, a subject which may appear to many exceedingly arid, especially to those philosophers who are continually concerned with the most deep questions on nature; […]
SAGREDO. You give me often the opportunity of admiring the richness and the great generosity of nature, when you derive, from so common and trivial facts, so many new informations which no one could have foreseen.
For example I observed so many times various oscillations, in particular those of lamps hanging from long wires inside churches, when moved by someone; but the only information I was able to derive was that it is wrong the opinion of those who think that is the air which keeps the oscillations going; because I think the air would be too clever and at the same time it would have not much reason for spending time in pushing to and from a hanging object.
But I never thought that a weight suspended by a long wire and made oscillating at quite large amplitude would spend the same time in completing either a large arc or a very short one : and this still seem me incredible. […].
SALVIATI. First of all you must know that each pendulum has its own natural period, and that it is impossible to make it oscillate ad with a different period.
Anyone may take a rope with a weight attached and try to increase or decrease the frequency of its oscillations: it will be a waste of time. And we may put in motion a pendulum by blowing on it, and we may move it with large amplitude by repeating the proper blowing, but always we'll obtain the same period: at the first blow we'll move
slightly from rest; after it has returned toward us we'll give more
thrust, and so on with repeated blows given at the right time: not when it is approaching us (this would decrease its motion)[…]
SAGREDO. When I was young, I observed a single man move a huge bell by giving these thrusts with a proper frequency, and when the bell had to be stopped I saw four or six men attached to the rope being risen high all together and they were not able to stop the motion that a single man was able to start by alone using the correct regular pulling.
[VIII, 138-141]

Galileo e l'effetto Foucault

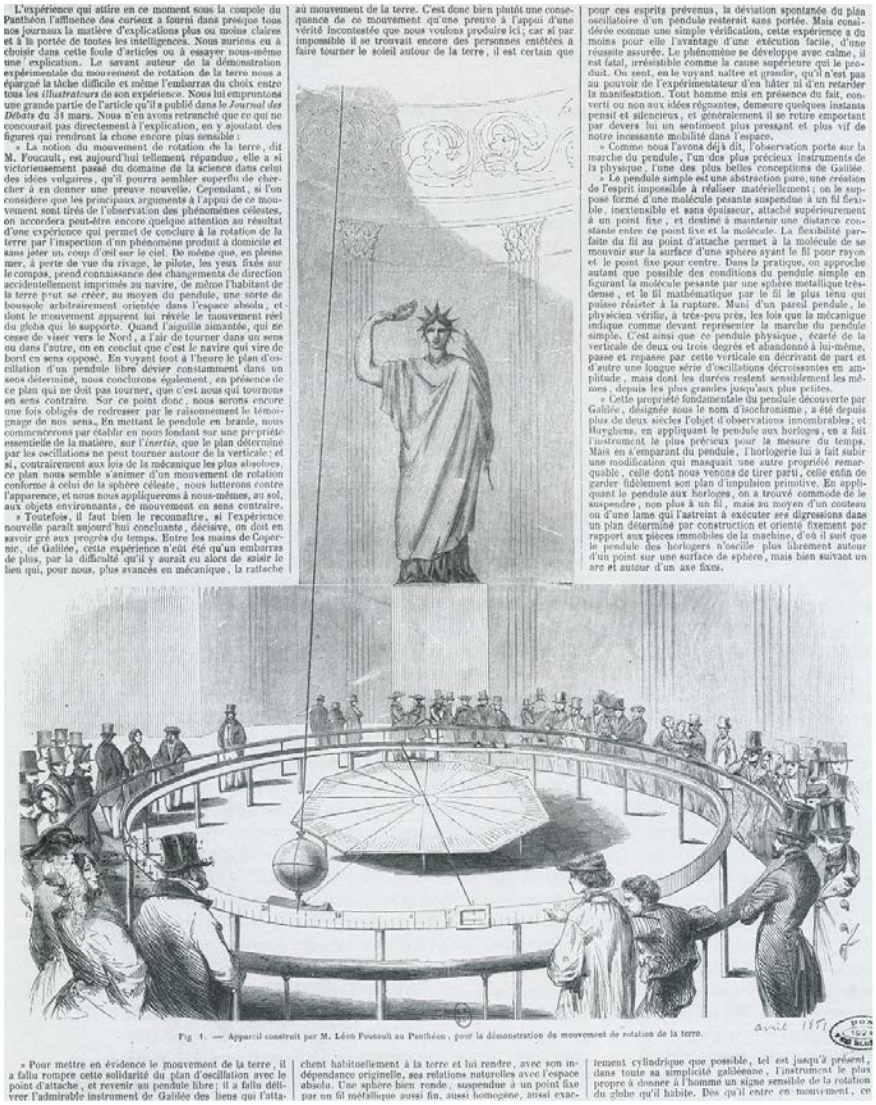
Galileo possedeva fuori dalla finestra del suo studio presso l'università di Padova un grande pendolo lungo 10 metri a cui era appesa una palla da un chilo, ed avrebbe potuto scoprire l'effetto di precessione del piano di oscillazione, dovuto alla rotazione della terra, fenomeno descritto scientificamente da Foucault. Forse, in effetti, di qualcosa si accorse, dato che negli scritti del suo allievo Vincenzo Viviani a proposito del pendolo si legge: "...insensibilmente va traviando dalla prima sua gita...".
Vale la pena di rileggere sul tema un frammento dalla Prima Giornata dei Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due Nuove Scienze.

SALVIATI. ... Vengo ora a gli altri quesiti, attenenti a i pendoli, materia che a molti parrebbe assai arida, e massime a quei filosofi che stanno continuamente occupati nelle più profonde quistioni delle cose naturali; […]
SAGREDO. V. S. mi dà pur frequentemente occasione d'ammirare la ricchezza ed insieme la somma liberalità della natura, mentre da cose tanto comuni, e direi anco in certo modo vili, ne andate traendo notizie molto curiose e nuove, e bene spesso remote da ogni immaginazione.
Io ho ben mille volte posto cura alle vibrazioni, in particolare, delle lampade pendenti in alcune chiese da lunghissime corde, inavvertentemente state mosse da alcuno; ma il più che io cavassi da tale osservazione, fu l'improbabilità dell'opinione di quelli che vogliono che simili moti vengano mantenuti e continuati dal mezzo, cioè dall'aria, perché mi parrebbe bene che l'aria avesse un gran giudizio, ed insieme una poca faccenda, a consumar le ore e le ore di tempo in sospignere con tanta regola in qua e in là un peso pendente: ma che io fussi per apprenderne che quel mobile medesimo, appeso a una corda di cento braccia di lunghezza, slontanato dall'imo punto una volta novanta gradi ed un'altra un grado solo o mezzo, tanto tempo spendesse in passar questo minimo, quanto in passar quel massimo arco, certo non credo che mai l'avrei incontrato, ché ancor ancora mi par che tenga dell'impossibile. Ora sto aspettando di sentire che queste medesime semplicissime minuzie mi assegnino ragioni tali di quei problemi musici, che mi possino, almeno in parte, quietar la mente.
SALVIATI. Prima d'ogni altra cosa bisogna avvertire che ciaschedun pendolo ha il tempo delle sue vibrazioni talmente limitato e prefisso, che impossibil cosa è il farlo muovere sotto altro periodo che l'unico suo naturale.
Prenda pur chi si voglia in mano la corda ond'è attaccato il peso, e tenti quanto gli piace d'accrescergli o scemargli la frequenza delle sue vibrazioni; sarà fatica buttata in vano: ma ben all'incontro ad un pendolo, ancor che grave e posto in quiete, col solo soffiarvi dentro conferiremo noi moto, e moto anche assai grande col reiterare i soffi, ma sotto 'l tempo che è proprio quel delle sue vibrazioni; che se al primo soffio l'aremo rimosso dal perpendicolo mezzo dito, aggiugnendogli il secondo dopo che, sendo ritornato verso noi, comincerebbe la seconda vibrazione, gli conferiremo nuovo moto, e così successivamente con altri soffi, ma dati a tempo, e non quando il pendolo ci vien incontro (ché così gl'impediremmo, e non aiuteremmo, il moto); e seguendo, con molti impulsi gli conferiremo impeto tale, ché maggior forza assai che quella d'un soffio ci bisognerà a cessarlo. SAGREDO. Ho da fanciullo osservato, con questi impulsi dati a tempo un uomo solo far sonare una grossissima campana, e nel volerla poi fermare, attacarsi alla corda quattro e sei altri e tutti esser levati in alto, nè poter tanti insieme arrestar quell'impeto che un solo con regolati tratti gli aveva conferito.
[VIII, 138-141]



Autoritratto di Leon Foucault (1819- 1868)
in uno dei primi dagherrotipi, 1840 circa. (CNAM, Parigi)

Selfportrait of Leon Foucault (1819- 1868)
in one of the first dagherrotypes, about 1840. (CNAM, Paris)



L'expérience qui attire en ce moment sous la coupole du Panthéon l'affluence des curieux a fourni dans presque tous nos journaux la matière d'explications plus ou moins claires et à la portée de toutes les intelligences. Nous aurions eu à choisir dans cette foule d'articles ou à essayer nous-même une explication. Le savant auteur de la démonstration expérimentale du mouvement de rotation de la terre nous a épargné la tâche difficile et même l'embarras du choix entre tous les *illustrateurs* de son expérience. Nous lui empruntons une grande partie de l'article qu'il a publié dans le *Journal des Débats* du 31 mars. Nous n'en avons retranché que ce qui ne concourait pas directement à l'explication, en y ajoutant des figures qui rendront la chose encore plus sensible :

« La notion du mouvement de rotation de la terre, dit M. Foucault, est aujourd'hui tellement répandue, elle a si victorieusement passé du domaine de la science dans celui des idées vulgaires, qu'il pourra sembler superflu de chercher à en donner une preuve nouvelle. Cependant, si l'on considère que les principaux arguments à l'appui de ce mouvement sont tirés de l'observation des phénomènes célestes, on accordera peut-être encore quelque attention au résultat d'une expérience qui permet de conclure à la rotation de la terre par l'inspection d'un phénomène produit à domicile et sans jeter un coup d'œil sur le ciel. De même que, en pleine mer, à perte de vue du rivage, le pilote, les yeux fixés sur le compas, prend connaissance des changements de direction accidentellement imprimés au navire, de même l'habitant de la terre peut se croire, au moyen du pendule, une sorte de boussole arbitrairement orientée dans l'espace absolu, et dont le mouvement apparent lui révèle le mouvement réel du globe qui le supporte. Quand l'aiguille aimantée, qui ne cesse de viser vers le Nord, a l'air de tourner dans un sens ou dans l'autre, on en conclut que c'est le navire qui vire de bord en sens opposé. En voyant tout à l'heure le plan d'oscillation d'un pendule libre dévier constamment dans un sens déterminé, nous conclurons également, en présence de ce plan qui ne doit pas tourner, que c'est nous qui tournons en sens contraire. Sur ce point donc, nous serons encore une fois obligés de redresser par le raisonnement le témoignage de nos sens. En mettant le pendule en branle, nous commencerons par établir en nous fondant sur une propriété essentielle de la matière, sur l'*inertie*, que le plan déterminé par les oscillations ne peut tourner autour de la verticale ; et si, contrairement aux lois de la mécanique les plus absolues, ce plan nous semble s'animer d'un mouvement de rotation conforme à celui de la sphère céleste, nous lutterons contre l'apparence, et nous nous appliquerons à nous-mêmes, au sol, aux objets environnants, ce mouvement en sens contraire.

» Toutefois, il faut bien le reconnaître, si l'expérience nouvelle paraît aujourd'hui concluante, décisive, on doit en savoir gré aux progrès du temps. Entre les mains de Copernic, de Galilée, cette expérience n'eût été qu'un embarras de plus, par la difficulté qu'il y aurait eu alors de saisir le lien qui, pour nous, plus avancés en mécanique, la rattache au mouvement de la terre. C'est donc bien plutôt une conséquence de ce mouvement qu'une preuve à l'appui d'une vérité incontestée que nous voulons produire ici ; car si par impossible il se trouvait encore des personnes entêtées à faire tourner le soleil autour de la terre, il est certain que pour ces esprits prévenus, la déviation spontanée du plan oscillatoire d'un pendule resterait sans portée. Mais considérée comme une simple vérification, cette expérience a du moins pour elle l'avantage d'une exécution facile, d'une réussite assurée. Le phénomène se développe avec calme, il est fatal, irrésistible comme la cause supérieure qui le produit. On sent, en le voyant naître et grandir, qu'il n'est pas au pouvoir de l'expérimentateur d'en hâter ni d'en retarder la manifestation. Tout homme mis en présence du fait, converti ou non aux idées régnantes, demeure quelques instants pensif et silencieux, et généralement il se retire emportant par devers lui un sentiment plus pressant et plus vif de notre incessante mobilité dans l'espace.

» Comme nous l'avons déjà dit, l'observation porte sur la marche du pendule, l'un des plus précieux instruments de la physique, l'une des plus belles conceptions de Galilée.

» Le pendule simple est une abstraction pure, une création de l'esprit impossible à réaliser matériellement ; on le suppose formé d'une molécule pesante suspendue à un fil flexible, inextensible et sans épaisseur, attaché supérieurement à un point fixe, et destiné à maintenir une distance constante entre ce point fixe et la molécule. La flexibilité parfaite du fil au point d'attache permet à la molécule de se mouvoir sur la surface d'une sphère ayant le fil pour rayon et le point fixe pour centre. Dans la pratique, on approche autant que possible des conditions du pendule simple en figurant la molécule pesante par une sphère métallique très-dense, et le fil mathématique par le fil le plus ténu qui puisse résister à la rupture. Muni d'un pareil pendule, le physicien vérifie, à très-peu près, les lois que la mécanique indique comme devant représenter la marche du pendule simple. C'est ainsi que ce pendule physique, écarté de la verticale de deux ou trois degrés et abandonné à lui-même, passe et repasse par cette verticale en décrivant de part et d'autre une longue série d'oscillations décroissantes en amplitude, mais dont les durées restent sensiblement les mêmes, depuis les plus grandes jusqu'aux plus petites.

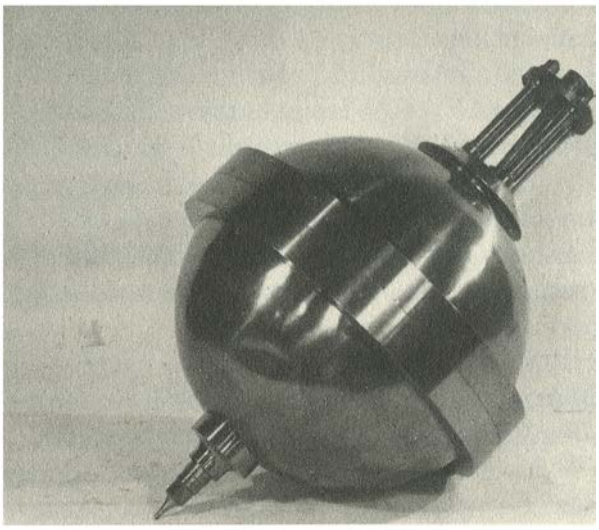
» Cette propriété fondamentale du pendule découverte par Galilée, désignée sous le nom d'isochronisme, a été depuis plus de deux siècles l'objet d'observations innombrables ; et Huyghens, en appliquant le pendule aux horloges, en a fait l'instrument le plus précieux pour la mesure du temps. Mais en s'emparant du pendule, l'horlogerie lui a fait subir une modification qui masquait une autre propriété remarquable, celle dont nous venons de tirer parti, celle enfin de garder fidèlement son plan d'impulsion primitive. En appliquant le pendule aux horloges, on a trouvé commode de le suspendre, non plus à un fil, mais au moyen d'un couteau ou d'une lame qui l'astreint à exécuter ses digressions dans un plan déterminé par construction et orienté fixement par rapport aux pièces immobiles de la machine, d'où il suit que le pendule des horlogers n'oscille plus librement autour d'un point sur une surface de sphère, mais bien suivant un arc et autour d'un axe fixes.

Fig. 1. — Appareil construit par M. Léon Foucault au Panthéon, pour la démonstration du mouvement de rotation de la terre.

» Pour mettre en évidence le mouvement de la terre, il a fallu rompre cette solidarité du plan d'oscillation avec le point d'attache, et revenir au pendule libre ; il a fallu délivrer l'admirable instrument de Galilée des liens qui l'attachent habituellement à la terre et lui rendre, avec son indépendance originelle, ses relations naturelles avec l'espace absolu. Une sphère bien ronde, suspendue à un point fixe par un fil métallique aussi fin, aussi homogène, aussi exactement cylindrique que possible, tel est jusqu'à présent, dans toute sa simplicité galiléenne, l'instrument le plus propre à donner à l'homme un signe sensible de la rotation du globe qu'il habite. Dès qu'il entre en mouvement, ce

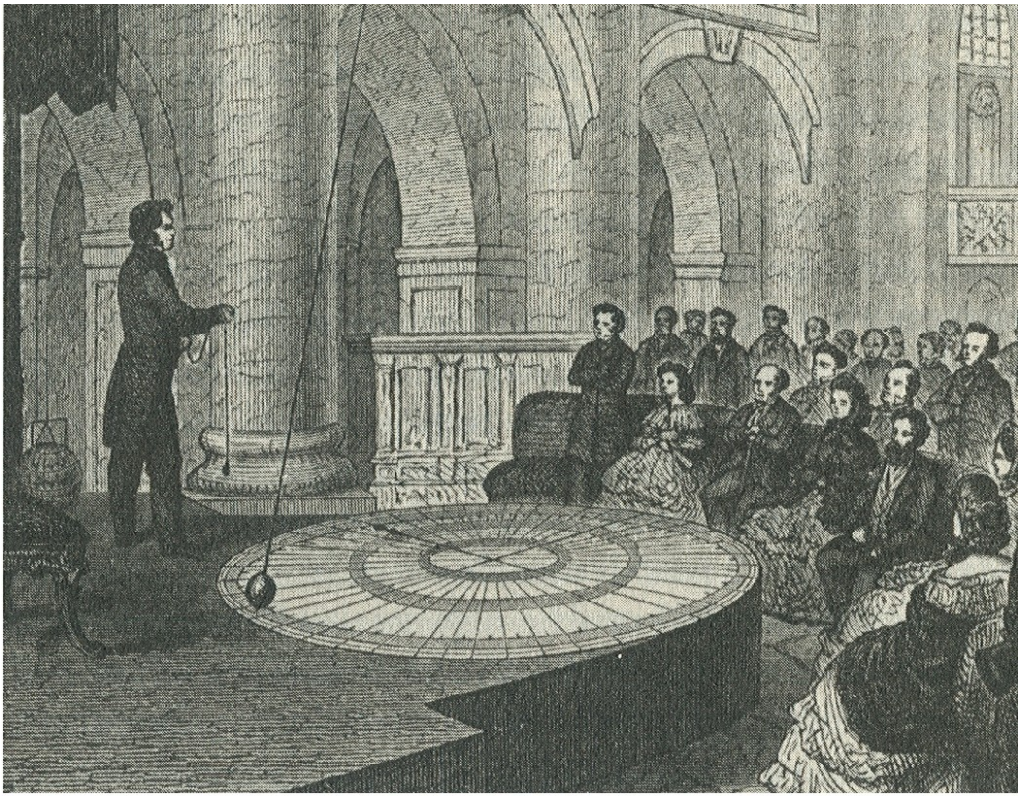
Dimostrazione sperimentale di Leon Foucault del movimento di rotazione della terra. Estratto dall' "Illustration" di Aprile 1851. (Bibliotheque Nationale)

Experimental demonstration of earth's rotation movement by Leon Foucault. Extract from the "Illustration" of Apri/1851. (Bibliotheque Nationale)



Il peso terminale del pendolo di Foucault costruito da Froment e usato per la dimostrazione nel Pantheon a Parigi, 1851. (CNAM, Paris)

The bob of the Foucault pendulum built by Froment and used for the demonstration in the Pantheon in Paris, 1851. (CNAM, Paris)



La dimostrazione del pendolo di Foucault nella Chiesa di Sant'Ignazio a Roma, 1851. (Corbis- Bettmann)

The demonstration of Foucault pendulum in Saint Ignazio church in Rome, 1851. (Corbis- Bettmann)



La cattedrale di San Isacco a San Pietroburgo, in una foto odierna

Saint Isaac cathedral in Saint Petersburg, in a recent picture



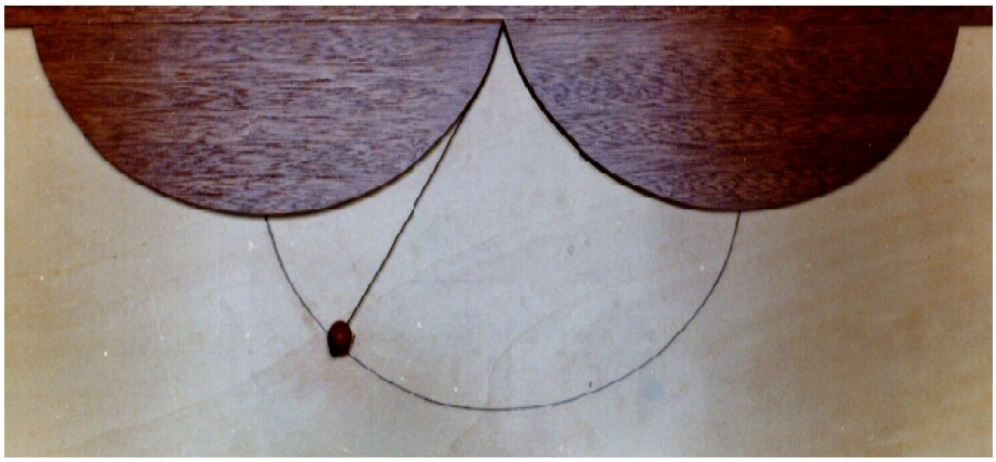
Il Pantheon a Parigi in una foto moderna

The Pantheon in Paris in a recent picture



Nel 1995 è stata allestita nel Pantheon a Parigi una copia fedele del pendolo originale di Foucault

In 1995 one faithful copy of the original Foucault pendulum was installed in the Pantheon at Paris



Le guide cicloidali di Huygens che impongono una oscillazione isocrona al pendolo

The Huygens cycloidal guides, which makes isochrone pendulum oscillation

Technical details on the Foucault pendulum in Palazzo della Ragione

The sphere, made of aluminium and iron, weighting 13 kg, is suspended to a fixed point of the vaulted roof of Palazzo della Ragione, by a steel wire 20 meters long, with a Charron Ring [4] limiting the ellipticality of the pendulum motion. The pendulum oscillations are naturally subject to damping, due to various dissipation phenomena (for example air viscosity, air density), and in order to keep the motion going one must continuously feed the energy lost by the oscillating system. In our case the mean energy is maintained constant by a pulsed magnetic field, produced by an electromagnet, placed at the centre, that attracts the sphere every quarter of a period when it approaches the centre. An optical sensor at the platform centre gives the signal that switches off the magnetic field when the bob passes through the equilibrium point. More optical sensors placed along a circle detect the transit of the sphere and switch-on a sequence of white LED along a circle. The pulse given by the electromagnetic field to the sphere, every time it comes close to the centre, is proportional to the current intensity feeding the electromagnet, but it also strongly depends on the distance between the electromagnet and the sphere. Inside Palazzo della Ragione there are large seasonal temperature changes, reaching a 30° difference between summer and winter. As a consequence, the length of the steal cable varies vary up to 6 millimetres (the steel expansion coefficient is of the order of 0.00001/degree). Consequently an automatic feedback system has been developed, in order to control the oscillation amplitude.

The oscillation plane precession is monitored by 180 LED that are sequentially switched on: every LED marks a time interval of about 10 minutes. The LED arc length increases with the oscillation plane rotation. During the opening ceremony on the 4th of April 2006 the pendulum was started with the same procedure used by Foucault, burning a wire that was holding the sphere at a given elongation. Since that moment the pendulum oscillates with constant amplitude, revealing to the public the Earth rotation through the rotation of its plane of oscillation.

A monitor shows a loop movie, recorded a few days before the opening ceremony, lasting a whole day. The movie was obtained by selecting a subset of frames: this produced alias of the oscillations accelerated almost one hundred times.

E.g. if the oscillation period includes N frames, selecting 1 frame every N increases the angular velocity of the precession of a factor N. When the oscillation plane completes one turn (360 degrees) all the LED are switched off except the East one, where the bob stays in that precise moment, and the process restarts. Since the vertical component of the angular velocity at the latitude of Padua is smaller than the angular velocity of the Earth rotation (360 degrees per 23 hours and 56 minutes), the instant at which the pendulum takes the East-West direction (direction of the parallels) is different in different days, and therefore the lighting LED track takes a different length at the same time in different days.

Dettagli tecnici sul pendolo di Foucault nel Palazzo della Ragione

La sfera del peso di 13 kg, in alluminio e ferro, è appesa ad un punto fisso della volta del Palazzo della Ragione, mediante un filo di acciaio lungo 20 metri ed un anello di Charron [4], dipositivo che provvede a contenere la ellitticità del moto pendolare.
L'oscillazione del pendolo è naturalmente soggetta a smorzamento per effetto di vari fenomeni dissipativi (p.es. viscosità e densità dell'aria), e se si vuole mantenere il moto l'energia persa va continuamente reintrodotta nel sistema oscillante.
In questo pendolo l'energia media è mantenuta costante da un campo magnetico pulsato, prodotto da un elettromagnete posto al centro della piattaforma sottostante, e che attrae la sfera di ferro durante i quarti di periodo in cui essa si avvicina al centro.
Un sensore ottico al centro della piattaforma fornisce il segnale che spegne il campo magnetico al passaggio del pendolo per il punto di equilibrio.
Altri sensori ottici posti lungo un cerchio rilevano il passaggio della sfera e accendono in sequenza un cerchio di LED bianchi.
L'impulso prodotto sulla sfera dal campo magnetico ogni volta che essa si avvicina al centro è proporzionale alla intensità della corrente che attraversa la bobina dell'elettromagnete, ma dipende anche dalla distanza bobina- sfera
L'escursione termica stagionale dentro Palazzo della Ragione è notevole (fino a 30 gradi di variazione tra estate e inverno) e di conseguenza la lunghezza del filo di acciaio può variare fino a 6 millimetri (coefficiente di dilatazione termica dell'ordine di 0.00001/grado.
Per questa ragione si è dovuto allestire un sistema automatico per il controllo automatico della ampiezza.
La precessione del piano di oscillazione è evidenziata da 180 LED che si accendono in sequenza: ogni LED marca un intervallo di tempo di circa 10 minuti. L'arco di LED accesi si allunga mano a mano che il piano ruota. Il pendolo è stato avviato, con le stesse modalità usate da Foucault (bruciando un filo che teneva bloccata la sfera ad una certa elongazione) durante la cerimonia di inaugurazione il 4 aprile 2006. Da allora esso oscilla ad ampiezza costante mostrando allo spettatore la rotazione della Terra attraverso la rotazione del proprio piano di oscillazione. Un monitor mostra una riproduzione di un filmato delle oscillazioni registrato, alcuni giorni prima della inaugurazione, durante l'arco di 24 ore. Viene proiettata una sequenza di fotogrammi scelti in modo tale da mostrare un "alias" delle oscillazioni che riproducono un moto accelerato del pendolo simile a quello che si vedrebbe accelerando la proiezione di alcune centinaia di volte.
Ad esempio se il periodo di una oscillazione contiene N fotogrammi selezionando 1 fotogramma ogni N equivale a moltiplicare per N la velocità angolare della precessione.
Quando il piano di oscillazione ha compiuto un giro completo (360 gradi) tutti i LED si spengono eccetto quello ad Est dove si trova il pendolo in quell'istante, ed il processo ricomincia.
Dato che la componente verticale della velocità angolare alla latitudine di Padova è inferiore alla velocità angolare della rotazione terrestre (360 gradi ogni 23 ore e 56 minuti), l'istante in cui il piano di oscillazione passa per la direzione Est- Ovest (la direzione dei paralleli) è diverso ogni giorno e quindi la traccia di LED ha diversa lunghezza alla medesima ora del giorno in giorni diversi.

The construction of the pendulum in Palazzo della Ragione

The first step in the construction of the pendulum in Palazzo della Ragione was the setup of the suspension point of the steel cable to one of the historical wooden beams of the vaulted roof. The preparation consisted in fixing the suspension point at about 20 meters above the floor and in setting the axis of the Charron ring.
This operation required the construction of a temporary scaffolding of nine stages, because employing an adequate crane would have probably damaged the historical and delicate graniglia of the floor, as consequence of its weight. Then a sphere of aluminium and iron, the bob, was attached to the lower end of the steel cable. A screw with an axial hole, arranged to host the cable-end and to allow a fine adjustment of the effective length of the pendulum, was set inside the sphere itself.
The horizontal goniometric plane has been centred below the suspension point lodged inside a dodecagonal iron tank which establishes a boundary that keeps the public at a proper distance, in order to not interfere with the experiment. The goniometric plane is made of aluminium (202 centimetres in diameter), with a central hole hosting the electromagnet's sensors. Twelve aluminum end-sectors host 180 optical sensors driving 180 LED. The goniometric plane rests on an aluminum frame, which in the centre holds the electromagnet, and at the perimeter offers rigid support for the petals of the tank.
The need of precision in the co-axial placement of the goniometric plane with respect to the pendulum axis has determined the construction technique. This consists of a dry montage of laser-cut aluminum and iron elements, in order to reduce to minimum all errors which would derive from welding. The diameter of the dodecagonal tank is 434 centimetres and its weight is about 600 kg; its borders are 85 centimetres high.
The dodecagonal tank is composed of twelve iron petals of 3 millimetres thickness; the petals are folded to create the borders which keep public to proper distance. The twelve sectors are connected through 48 butterfly metallic joints fixed with four screws in the 3 millimetres thickness of the steel plate. The choice of a so complex and delicate construction technique, in the phase of production as in the phase of montage, comes from the need of obtaining a highly rigid object while reducing to minimum all off-axis displacements that could invalidate the experiment. Since there was no possibility of transporting a so heavy monolithic object inside the Salone, the tank had to be assembled in place.
Two reading desks are placed aside the dodecagonal tank, one offering an historical information and the other a short scientific description. Two parallelepipeds host two monitors, one showing a loop movie of the first day of oscillation of the pendulum, the other a didactic hypertext. The electronic equipment for monitoring the optical sensors and driving the LEDs and the electromagnet, is set in one of the monitor-parallelepipeds and is connected through a bundle of cables to the core of the tank.

La costruzione del pendolo in Palazzo della Ragione

La prima fase della costruzione del pendolo nel Palazzo della Ragione è stata l'allestimento del punto di attacco del cavo di acciaio ad un costolone di legno della volta, ad una altezza di circa 20 metri dal pavimento, e della messa in asse dell'anello di Charron.
Questa operazione ha richiesto la costruzione di un ponteggio temporaneo di circa nove piani, in quanto l'impiego di una gru atta all'uso avrebbe rischiato di danneggiare la delicata graniglia del salone.
Successivamente è stata fissata la sfera all'estremità inferiore del cavo di acciaio, utilizzando una vite forata assialmente che, penetrando all'interno della sfera stessa, consentisse un fine aggiustamento della lunghezza efficace del pendolo. In asse con il punto di attacco sotto al pendolo è stato posizionato il piano goniometrico orizzontale, alloggiato all'interno di una vasca dodecagonale che definisce la distanza necessaria, perchè il pubblico non interferisca con l'esperimento.
Il piano goniometrico si compone di una lamiera in alluminio circolare di diametro 202 centimetri, recante una serigrafia con i gradi di rotazione ed un foro per l'alloggio dei sensori dell'elettromagnete, e dodici settori esterni, sempre in alluminio, ove si dispongono i 180 sensori ottici che pilotano i 180 LED.
Il piano circolare ed i settori trapezoidali appoggiano su una struttura in alluminio, che ospita al centro l'elettromagnete e che lungo il perimetro offre i punti di attacco per la vasca di cortesia al pubblico.
La necessità di precisione nel posizionamento del piano di spazzolamento e del suo centramento rispetto all'asse del pendolo ha vincolato la stessa tecnica costruttiva del piano e del suo supporto.
Si è impiegata una lavorazione al laser di componenti in alluminio e ferro da assemblare con soli incastri, in modo da ridurre al minimo l'errore che poteva derivare da saldature.
Il diametro complessivo della vasca dodecagonale è di 468 centimetri ed il suo peso è di circa 600 kg; i suoi bordi sono alti 85 centimetri.
La vasca dodecagonale di cortesia al pubblico si compone di dodici petali in lamiera di ferro di spessore 3 millimetri piegati a costituire un parapetto che mantenga il pubblico ad una distanza di rispetto. I dodici settori sono assemblati mediante 48 intarsi metallici a farfalla e grani dello stesso spessore della lamiera.
La scelta di una tecnica costruttiva così complessa e delicata, sia nella fase di costruzione che di montaggio, deriva dalla necessità di allestire un oggetto altamente rigido, per ridurre al minimo i movimenti che potessero alterare il posizionamento del piano e quindi inficiare l'esperimento, senza avere la possibilità di trasportare all'interno del salone un oggetto monolitico. Accanto alla vasca dodecagonale si trovano due leggii con una breve spiegazione dell'esperimento e due parallelepipedi in acciaio ove sono alloggiati due monitor: il primo monitor mostra il filmato del primo giorno di oscillazione del pendolo; il secondo monitor ospita un ipertesto didattico.
L'apparato elettronico che serve il monitoraggio dei sensori ottici, dei LED e dell'elettromagnete – attraverso un fascio di cavi che raggiunge l'interno della vasca - è ospitato da uno dei due parallelepipedi.

Short resume of the hypertext tour available on site

Alongside the pendulum there is a monitor that offers an historical and scientific description of the Foucault pendulum, through a bilingual (Italian and English) hypertext that can be browsed simply pressing few buttons. In this way it is possible to activate some simulations of the pendulum motion and to have a better comprehension of the phenomenon.
The simulations show three interesting cases: an hypothetical pendulum long 1/2 of the Earth radius - with a period T = 1 hour – has been placed at latitude 90° (North Pole - Fig. 2), at latitude 45.24° (Padova - Fig. 4)and at latitude 3.6° (nearby the Equator - Fig. 6).
At the North Pole latitude the trajectory projected on the horizontal plane would be a rose made of 48 petals (Fig. 3). At latitude of Padova the trajectory would be an "open" orbit resulting from a rotation at an angular velocity ! smaller than that of the Earth rotation ω. The relation between the two is ! = ω sin ϕ, where ϕ is the latitude of Padova (Fig. 5). The trajectory made by the same pendulum nearby the Equator latitude would show that the precession velocity of the oscillation plane is almost reduced to zero (Fig. 7).

The pendulum motion in a rotating frame

Assuming a conical pendulum, placed at the North Pole, the Newton's 2nd law of rotational motion predicts that the pendulum, once displaced from the equilibrium position and released with zero velocity, does follow a trajectory along a plane that is at rest in the reference frame of "fixed stars". The Newton's 2nd law of rotational motion states that the time derivative of the angular momentum the equals the momentum of the force. In the conic pendulum (a mass suspended through a wire to a fixed point) the force acting on the mass is the vectorial sum of the gravitational force and the wire tension, and it is orthogonal to the vertical plane passing through the fulcrum and the initial position of the mass. Therefore the mass velocity must be a vector laying in this plane, and the mass motion cannot escape such plane.
Such motion, however, is seen by an observer on the rotating frame anchored to the Earth as oscillations along a plane that rotates in opposition to the Earth rotation, with a period of 24 hours.
To explain the rotation of the oscillation plane at the North Pole, we may consider the rotating frame and introduce into the motion equations some "fictitious force".
For example we all know that, when we stand over a fast rotating carousel, we feel pushed outside by a "centrifugal" force.
On the other hand, if we move with velocity v with respect to the carousel, beside the gravity force and the centrifugal force, we feel a second fictitious force, the Coriolis force (Fc) directed orthogonally to the velocity[5].

Il percorso ipertestuale che spiega il fenomeno studiato

Accanto al pendolo un monitor offre una descrizione storico-scientifica del pendolo di Foucault, mediante un percorso ipertestuale (in italiano o in inglese) che si naviga usando pulsanti che consentono ad esempio di attivare alcune simulazioni del moto del pendolo che facilita la comprensione della natura del fenomeno
Le simulazioni mostrano tre situazioni interessanti: latitudine 90.00° (Polo Nord - Fig. 2), latitudine 45.24° (Padova - Fig. 4) e latitudine 3.60° (in prossimità dell'equatore - Fig. 6), per un pendolo immaginario, lungo circa la metà del raggio terrestre (che avrebbe un periodo T = 1 ora).
Al Polo Nord la traiettoria proiettata sul piano orizzontale sarebbe una rosetta composta da 48 petali. (Fig. 3).
Alla latitudine di Padova la traiettoria sarebbe un'orbita "aperta", prodotta da una rotazione del piano ad una velocità angolare Ω inferiore a quella del globo terrestre (ω), e ad essa legata dalla relazione $\Omega = \omega \sin \phi$, ove $\phi = 45.24°$ è la latitudine di Padova (Fig. 5).
La traiettoria compiuta dal medesimo pendolo posto ad una latitudine che si discosta poco da quella dell'equatore mostra che la velocità della precessione del piano di oscillazione si riduce quasi a zero. (Fig. 7).

Il moto del pendolo in un sistema rotante

Se si pensa ad un pendolo conico posto al Polo Nord le leggi della dinamica prevedono che le oscillazioni del pendolo, spostato dalla sua posizione di equilibrio e poi lasciato andare con velocità nulla, giacciano su un piano immobile nel sistema di riferimento delle stelle "fisse". Questa previsione discende direttamente dalla seconda legge della dinamica per le rotazioni.
Tale legge stabilisce che la derivata del vettore momento della quantità di moto è uguale al vettore momento della forza. Nel pendolo conico (una massa appesa tramite un filo ad un punto fisso) la forza risultante è la somma vettoriale della forza di gravità e della tensione del filo.
Dato che il momento di tale forza è all'inizio perpendicolare al piano verticale passante per fulcro e posizione iniziale della massa del pendolo, la velocità della massa deve essere sempre parallela a tale piano e il moto della massa resta vincolato al piano.
Il moto del pendolo oscillante lungo questo piano immobile, visto da un osservatore ancorato al sistema di riferimento rotante della Terra, sembra avvenire lungo un piano che ruota in senso contrario a quello della rotazione della Terra, con un periodo di 24 ore.
Un metodo per spiegare la rotazione del piano di oscillazione al Polo Nord, è quello di porsi nel sistema di riferimento della piattaforma rotante ed introdurre nelle equazioni del moto anche le "forze apparenti", quelle dovute al fatto che la Terra ruota. Ad esempio quando ci troviamo sopra una giostra che gira velocemente ci sentiamo spingere verso l'esterno da una forza "centrifuga". In modo analogo, nel sistema della piattaforma che ruota sotto al pendolo tutto avviene come se sulla massa oscillante agisse, oltre alla forza di gravità, una "forza apparente", detta forza di Coriolis, diretta, nel piano orizzontale in direzione ortogonale alla velocità istantanea della massa. [5]

The effects of initial conditions on the pendulum trajectory

The exact shape of the trajectory made by the projection on the horizontal plane of the bob position depends, as well, on the initial conditions. If the bob is kept away from its equilibrium position and it is left with velocity equal to zero, with reference to the rotating system (the Earth), then the trajectory makes a curve as shown in Fig. 8. If the bob starts from the equilibrium position with finite velocity (in a generic radial direction), then the trajectory makes a curve as shown in Fig. 9. The difference between the two trajectories is that the first one never passes through the equilibrium position and the second one passes through the equilibrium position two times per period. This phenomenon is due to the fact that in the first case the pendulum starts with a small but not null velocity, perpendicular to the plane defined by the suspension point, the starting position and the equilibrium position. Therefore the trajectory in an inertial system of reference is a curve. In the second case the trajectory in an inertial system of reference is a straight-line segment.

Gli effetti delle condizioni iniziali sulla traiettoria del pendolo

La forma esatta della traiettoria percorsa dalla proiezione sul piano orizzontale della posizione della massa dipende anche dalle condizioni iniziali.
Se il pendolo è trattenuto fermo lontano dalla sua posizione di equilibrio, e poi abbandonato con velocità nulla relativa al sistema di riferimento rotante (terra), allora la traiettoria descrive una curva del tipo rappresentato in Fig. 8.
Se invece il pendolo parte dalla posizione di equilibrio con velocità finita (in direzione radiale qualsiasi) allora la traiettoria descrive una curva del tipo rappresentato in Fig. 9.
La differenza tra le due traiettorie (la prima non passa mai per il punto di equilibrio mentre la seconda ci passa due volte ogni periodo di oscillazione) è dovuta al fatto che nel primo caso il pendolo parte con una piccola ma non nulla velocità perpendicolare al piano definito dal punto di sospensione, dalla posizione iniziale e dalla posizione di equilibrio, e quindi la traiettoria vista in un sistema di riferimento inerziale non è un tratto di retta ma una ellissi.
Nel secondo caso la traiettoria vista in un sistema di riferimento inerziale è un tratto di retta.

Notes

[1] *Léon Foucault was born in Paris in 1819. Scientist, interested in many different aspects related to physics, he became fond of daguerreotype, of illumination (studying the electric arch) and of optics (studying the interference phenomenon). Using the rotating mirror method, he succeeded in determining with good approximation the light velocity through air and water and proving, in the meanwhile, that the velocity of light changes inversely to the refraction value of the medium where it propagates. With those experiments he denied once again the corpuscle theory of light, which was already strongly criticized by different parties at that time. Through the investigations on electromagnetism he individuated the currents, that later took his name; those currents are generated by variable electromagnetic fields in metallic masses. He was as well a talented builder of scientific equipment, among which a gyroscope, a new type of telescope and polarizer prism. Foucault died in Paris in 1868.*

[2] *Angelo Secchi, (memoria 1851) "On the experiments performed in Rome to prove the Earth rotation and to calculate the absolute value of gravity". …before explaining the experiments, I think useful to the readers recalling the theoretical principle from which derives the pendulum deviation. The famous Poisson in a memory "On the projectile motion with reference to the earth motion", concluded that a body thrown on the earth surface must deviate to the right of the observer watching the projectile track , by a quantity which depends on the local latitude. This is easily obtained by considering that when launching a projectile e.g. southward it passes from slower parallels to faster parallels, and while it goes it cannot (when neglecting the air friction) feel any thrust from the faster parallels, and therefore it must lag with respect to them: it will deviate to west; the contrary will happen if the motion will be northward, and then the projectile will deviate to east . (freely translated from ancient Italian)*

[3] *The simple pendulum motion is not exactly isochronic. Huygens, who in 1656 patented the first pendulum clock, and later published an extensive theoretical explanation of this device (Horologium Oscillatorium sive de motu pendulorum, 1673), described that the pendulum period depends slightly on the oscillation amplitude. Huygens introduced cycloidal tracks at the suspension point of a wire-pendulum which modulate the effective length of the pendulum as a function of oscillation amplitude, obtaining for the suspended mass a cycloidal trajectory and a motion exactly isochrone.*

[4] *The Charron ring (axial ring fixed near the fulcrum) acts only in the instants of maximum elongation, when the wire that keeps suspended the sphere touches the ring itself preventing tangential slide through friction. This action, added for a long subset of oscillations, limits the ellipticality of pendulum motion that is inevitably produced by also very small asymmetries in the system geometry.*

[5] *The discovery of the effects of the vertical component of the Earth rotation on the motions of bodies was not made by Foucault. The first study made by Gaspard-Gustave de Coriolis on possible deviations of bullets produced by the Earth rotation was published in 1837 (Sur les équations du mouvement relatif des systèmes de corps). Coriolis, sixteen years before the Foucault experiment, in his publication showed that the motion laws of a body in an inertial reference system could be also used in a rotating reference system introducing an appropriate force, which depends on angular velocity ω of the rotating system and velocity V of the body. The merit of Foucault was to make visible the effects of the Coriolis' force, by using the pendulum that accumulates oscillation after oscillation the small deviations produced by this force.*

Note

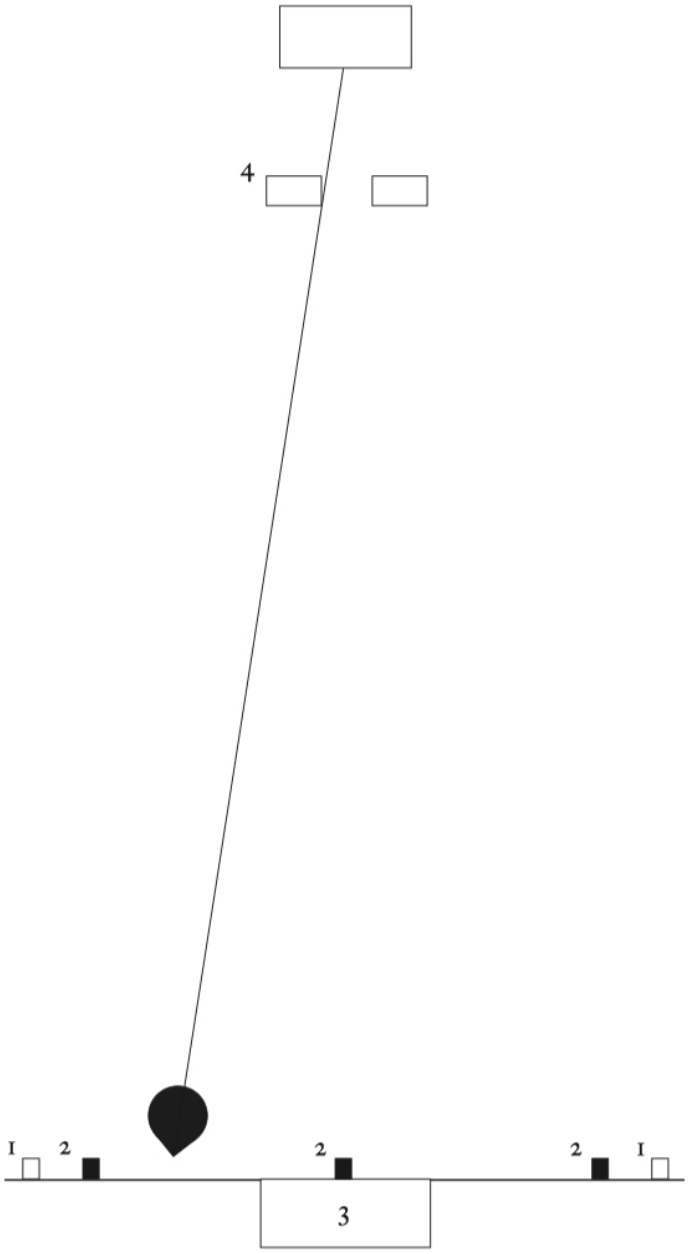
[1] Léon Foucault nasce a Parigi nel 1819. Scienziato interessato a vari aspetti legati al mondo della fisica, si appassiona di dagherrotipia, di illuminazione (studia l'arco elettrico) e di ottica (interferenza). In seguito, attraverso il metodo dello specchio rotante, riesce a determinare con buona approssimazione la velocità della luce nell'aria e nell'acqua, dimostrando che la velocità della luce varia in ragione inversa all'indice di rifrazione del mezzo in cui si propaga. In questo modo egli dà un'ulteriore smentita della teoria corpuscolare della luce, allora notevolmente criticata da più parti. Con le ricerche sull'elettromagnetismo individua le correnti, in seguito dette "di Foucault", che si generano nelle masse metalliche per induzione da campi magnetici variabili.
Egli è anche un abile costruttore di apparecchiature scientifiche e mette a punto un giroscopio, un nuovo tipo di telescopio e un prisma polarizzatore. Foucault muore a Parigi nel 1868.

[2] Padre Angelo Secchi, (memoria 1851) *"Sugli esperimenti del pendolo fatti in Roma a prova della rotazione della terra, e per la determinazione assoluta della gravità".*
…Prima però di esporre ciò che riguarda gli esperimenti, stimo non inutile per comodo di parecchi lettori il richiamare il principio teoretico da cui dipende il fatto della deviazione del pendolo. Il celebre Poisson in una profonda memoria Sul moto de' proiettili avuto riguardo alla rotazione della terra, concluse che un corpo lanciato alla superficie terrestre deve deviare apparentemente alla destra dell'osservatore che sia rivolto verso la traiettoria, di una quantità dipendente dalla latitudine del luogo. Questo facilmente si concepisce se riflettiamo che lanciando un proiettile e. verso il sud esso passa da paralleli che hanno minore celerità a quelli che l'hanno maggiore, e che mentre esso è trasportato nella sua direzione senza toccar terra(astraendo dall'attrito dell'aria), esso non può ricever comunicazione alcuna di quella maggiore celerità propria ai paralleli su cui passa, e perciò relativamente ad essi deve trovarsi in ritardo, e quindi rinvenirsi più all'ovest, relativamente al meridiano del luogo donde è partito; il contrario avverrà se il moto facciasi verso nord e allora il proiettile avrà deviato verso est.

[3] A rigore, infatti, il moto del pendolo semplice non è esattamente isocrono. Il suo periodo di oscillazione dipende debolmente dalla ampiezza, in un modo descritto in dettaglio da Huygens, che nel 1656 brevettò il primo orologio a pendolo e più tardi pubblicò una estesa teoria su questo dispositivo (*Horologium Oscillatorium sive de motu pendulorum,*1673). Huygens introdusse guide cicloidali nel punto di attacco di un pendolo a filo, in modo da modulare la lunghezza efficace del pendolo in funzione della ampiezza di oscillazione, ottenendo per la massa sospesa una traiettoria cicloidale ed un moto perfettamente isocrono.

[4] L'anello di Charron (anello fissato assialmente in prossimità del fulcro) agisce solo negli istanti di massima elongazione, quando il filo che sostiene la sfera viene a contatto con l'anello stesso, e , per attrito, inibisce lo scorrimento tangenziale. Questa azione, sommata su una lunga sequenza di oscillazioni tende a limitare la ellitticità dell'orbita inevitabilmente indotta da anche piccolissime asimmetrie nella geometria del sistema.

[5] La scoperta degli effetti della componente verticale della rotazione terrestre non fu merito di Foucault. Già nel 1837 comparvero studi di Simon Denis Poisson e Gaspard-Gustave de Coriolis sulle possibili deviazioni subite dai proiettili per effetto della rotazione terrestre (*Sur les équations du mouvement relatif des systèmes de corps*). Coriolis, sedici anni prima dell'esperimento di Foucault, mostrò nella sua pubblicazione che le leggi del moto di un corpo valide in un sistema di riferimento inerziale potevano essere usate in un sistema di riferimento rotante a patto che si introducesse una opportuna forza, dipendente dalla velocità angolare ω del sistema rotante e dalla velocità V del corpo. Il merito di Foucault fu quello di rendere visibili gli effetti della forza di Coriolis, utilizzando il pendolo che accumula oscillazione dopo oscillazione gli effetti di questa forza.



1. LED 2. Sensori 3. Elettromagnete 4. Anello di Charron

1. *LED* 2. *Sensors* 3. *Elettromagnet* 4. *Charron ring*

Fig. 1

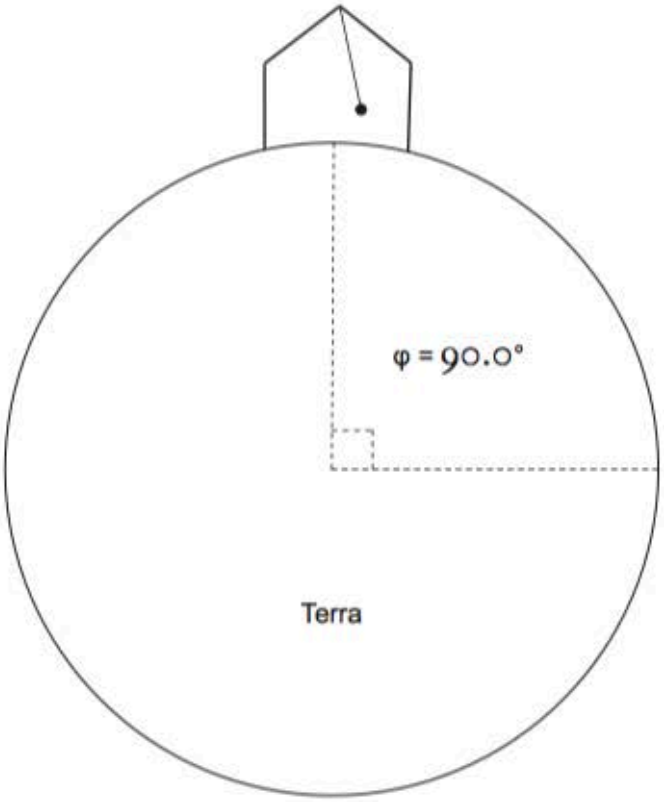


Fig. 2

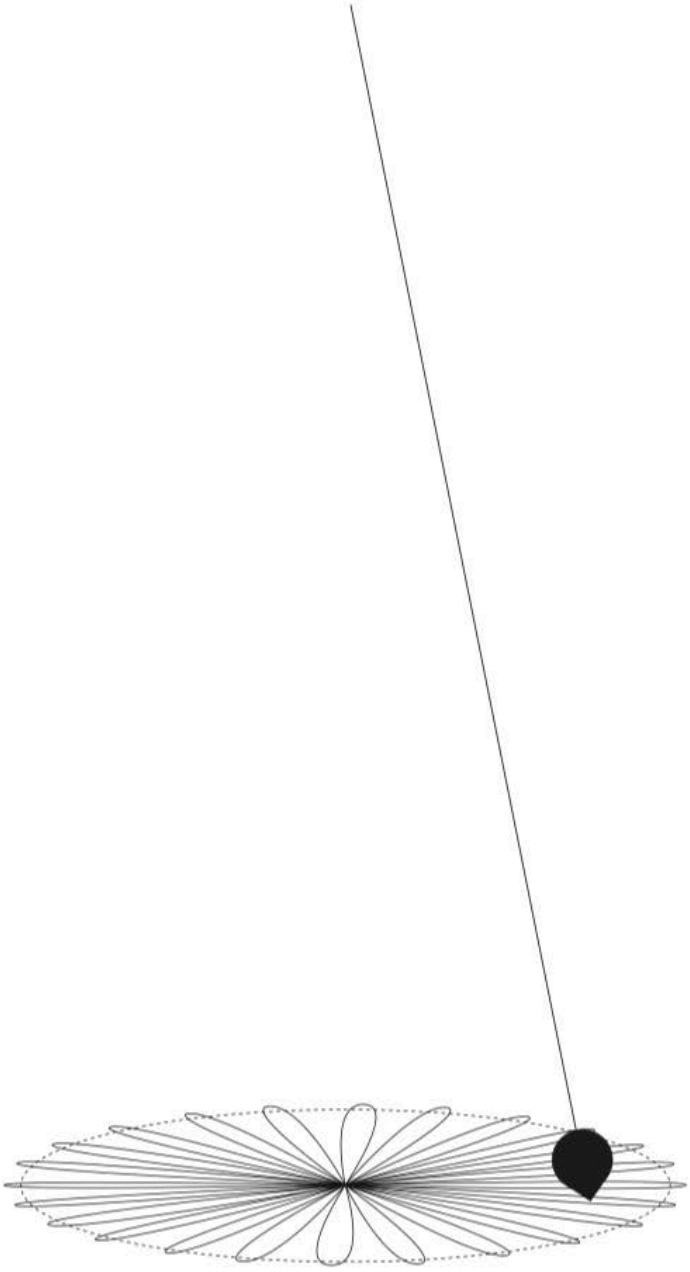


Fig. 3

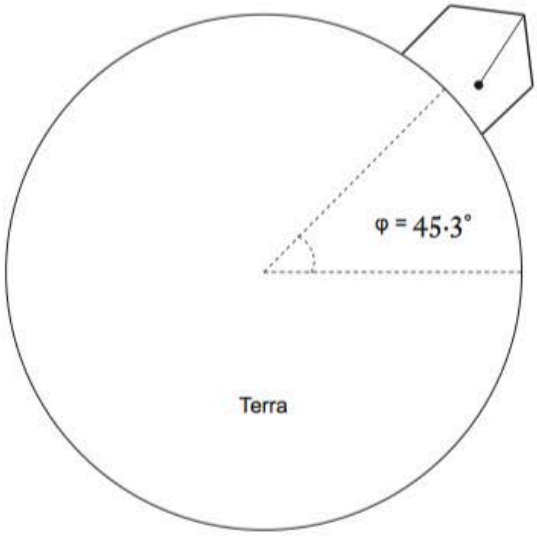


Fig. 4

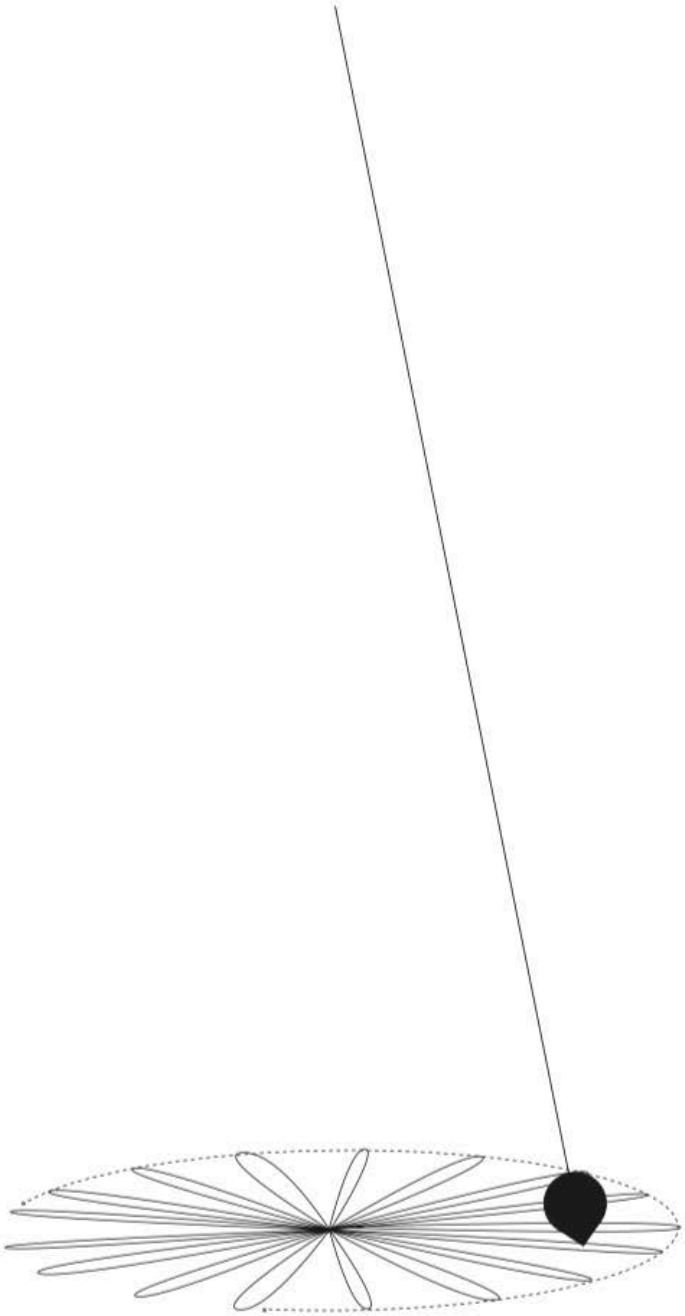


Fig. 5

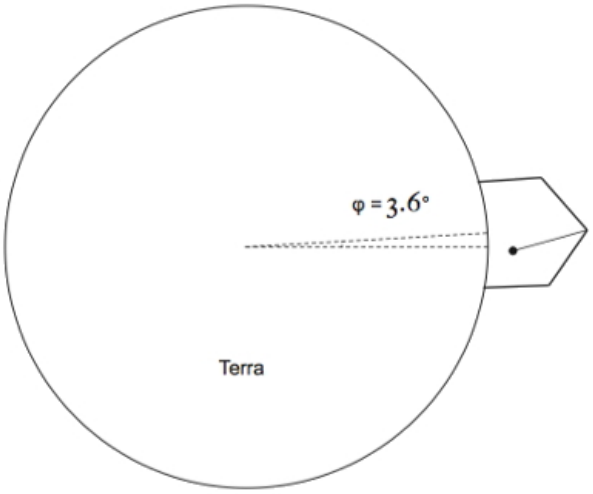


Fig. 6

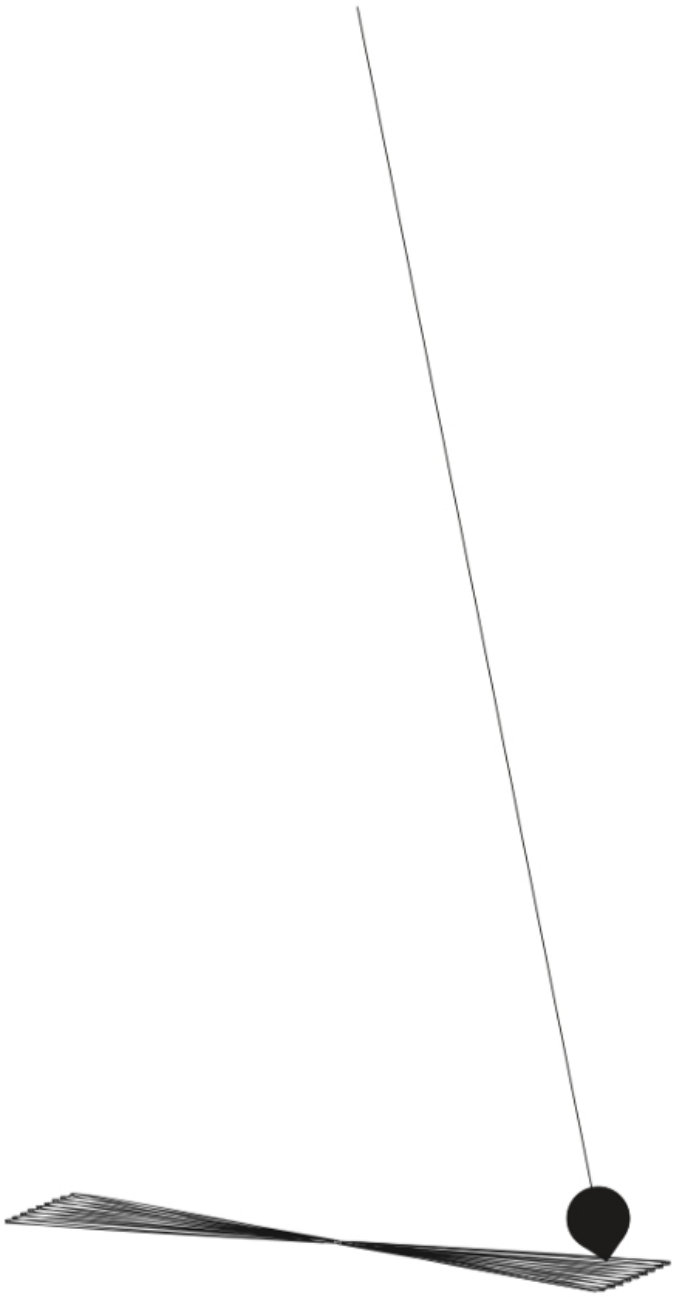
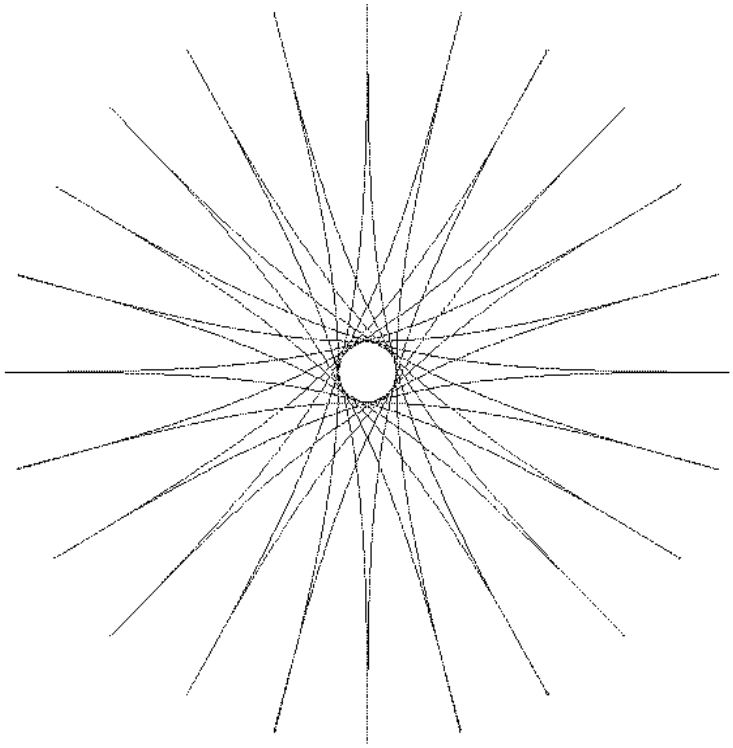


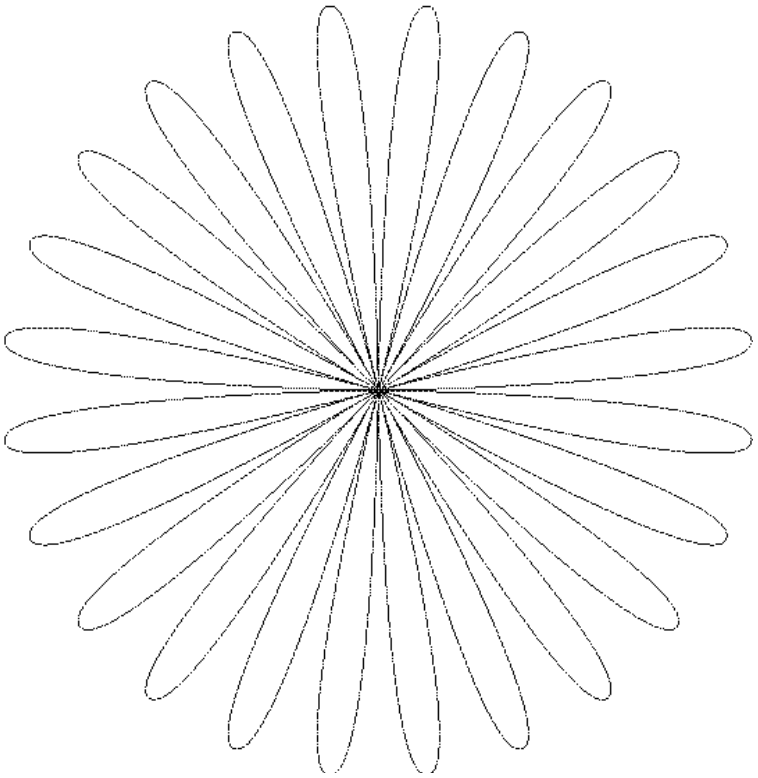
Fig. 7



Curva descritta dal pendolo rilasciato a riposo lontano dalla posizione di equilibrio

Path description by the bob released at rest far from the equilibrium position

Fig. 8



Curva descritta dal pendolo lanciato dalla posizione di equilibrio

Path descrbed by the bob kicked from the equilibrium position

Fig. 9

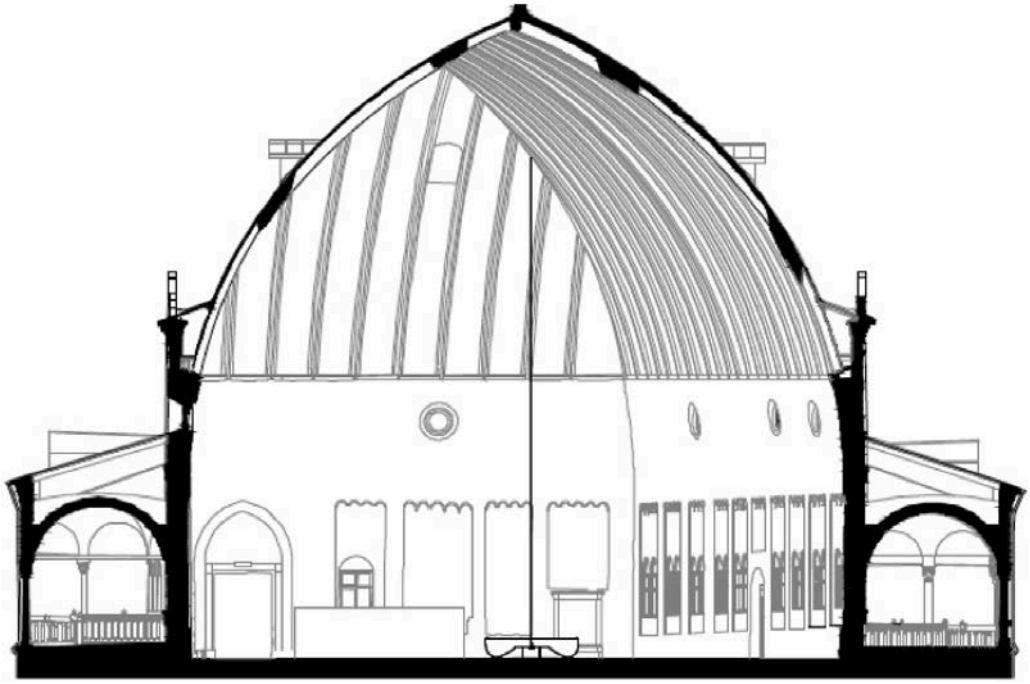


Dettaglio delle giunzioni meccaniche tra i 12 petali della vasca

Details of the mechanical junctions, binding the 12 petals of the tank

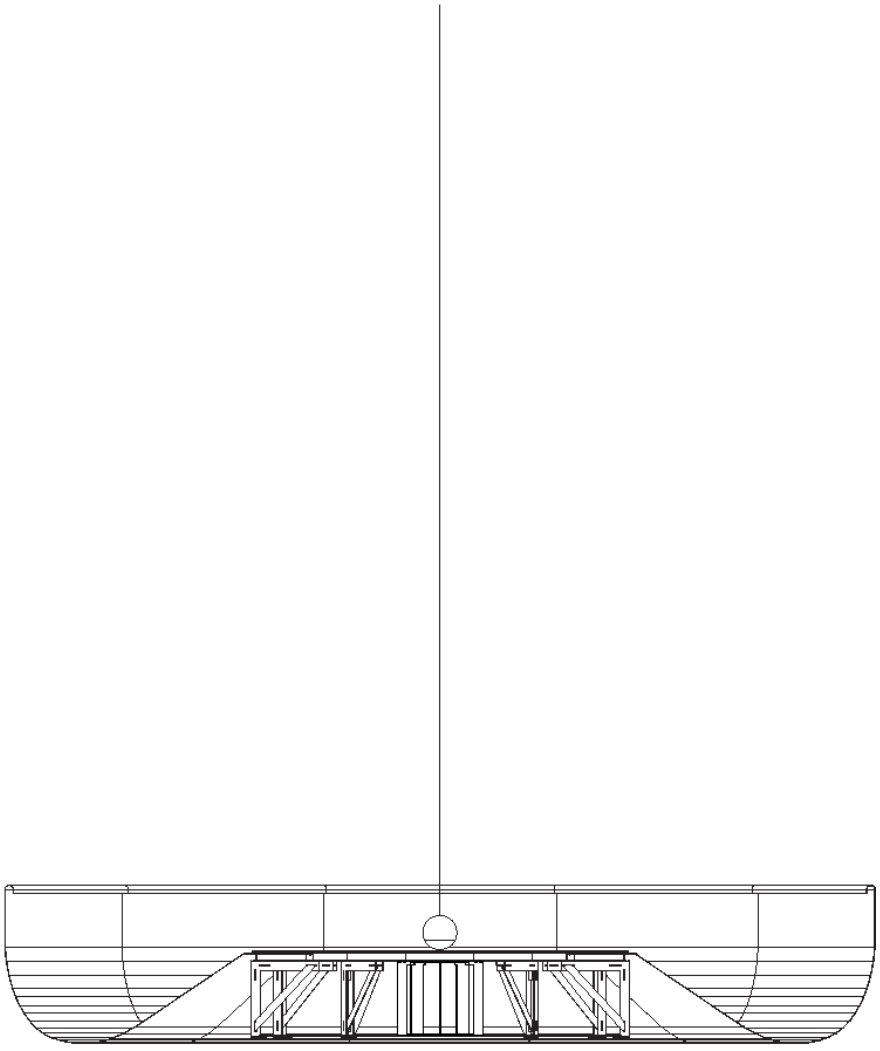






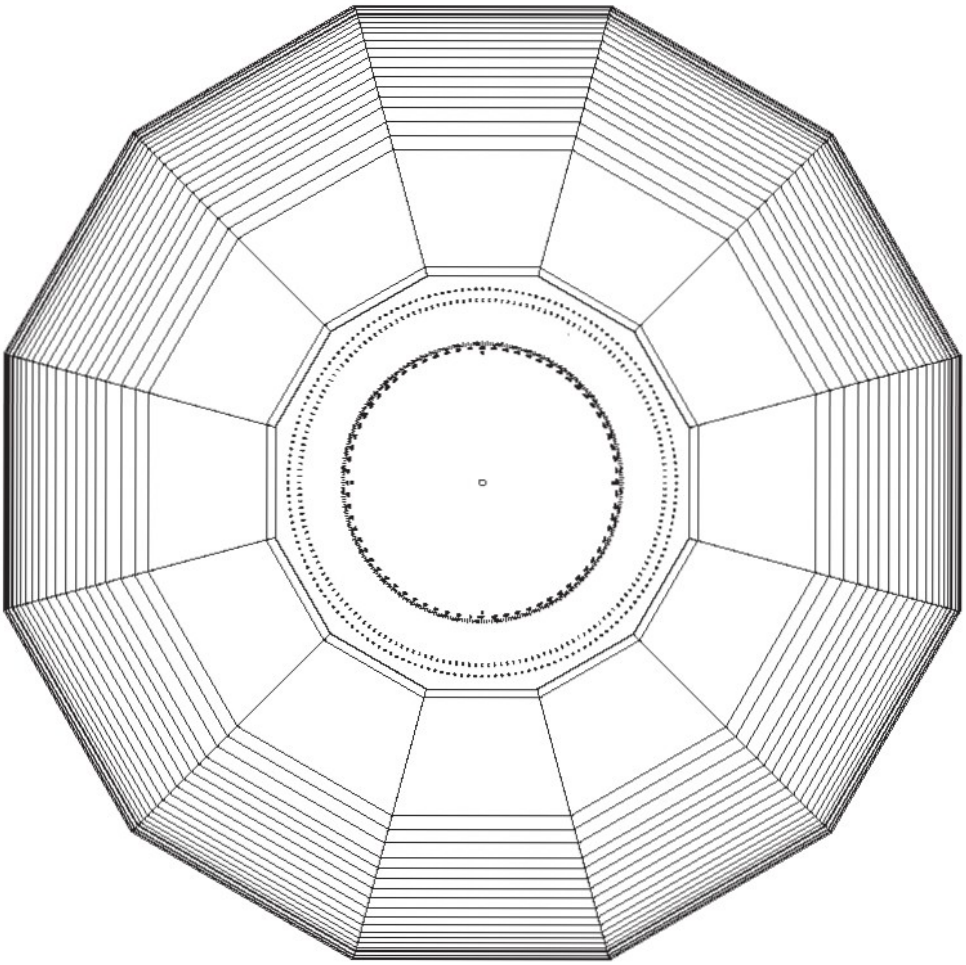
Sezione generale trasversale. Scala 1:1000

General cross section Scale *1: 1000*



Sezione scala 1:50

Section scale 1: 50:



Prospetto scala 1:50

Elevation scale 1:50

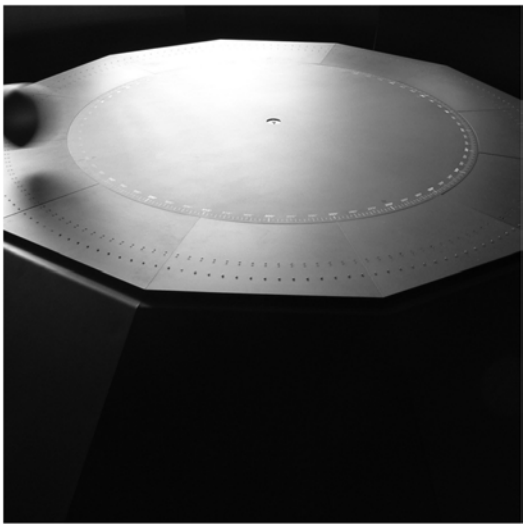


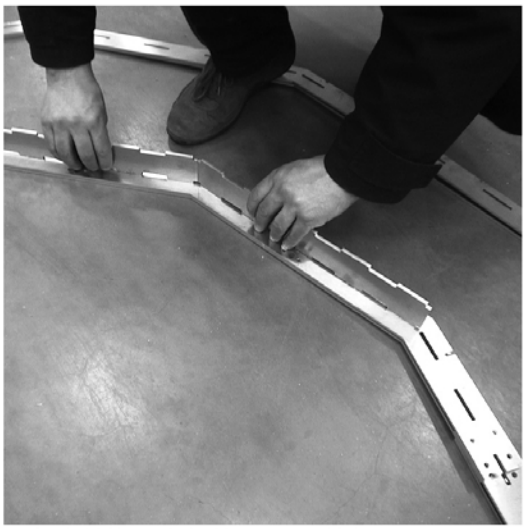




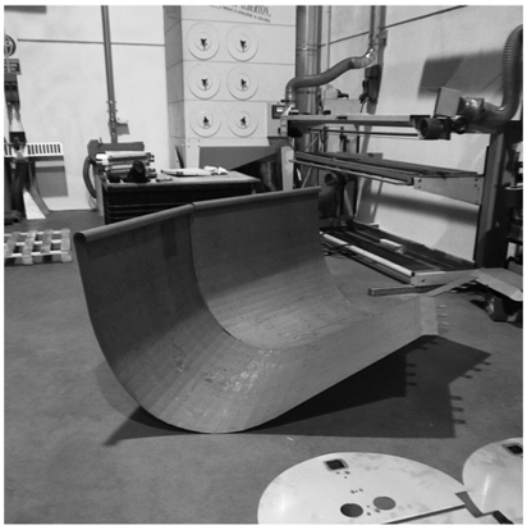






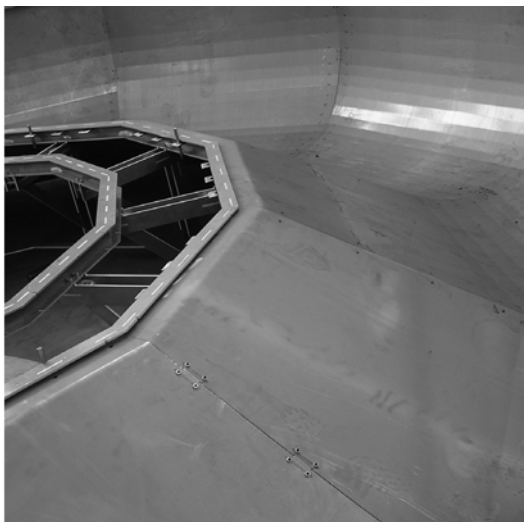


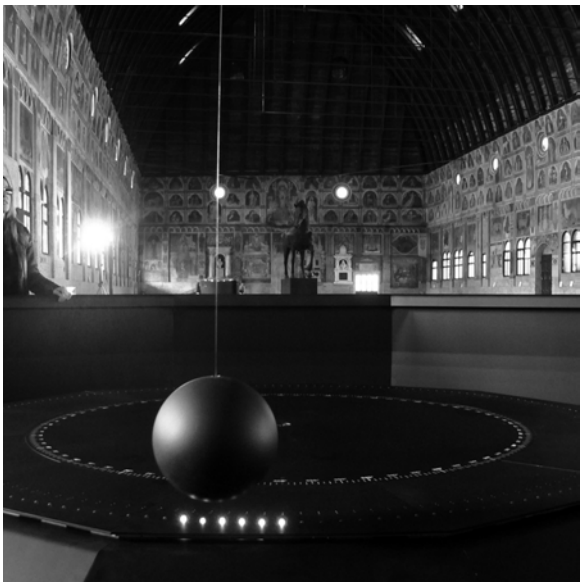




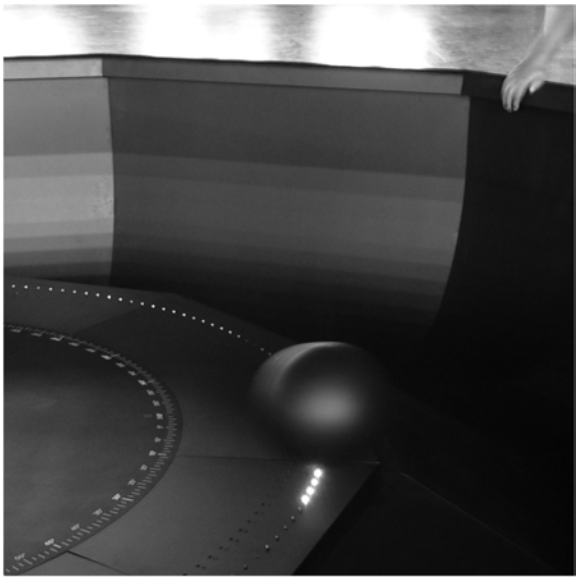














Credits

scientific project
prof. Giacomo Torzo . University of Padova . LabTrek srl
exhibit design
arch. Francesca Torzo Venier
metal structures
eng. Luca Priore . Millennium engineering
mechanic equipment
Dario Sarzo. DSG snc
serigraphy colouring
Antonio Venti . Plastigraf SaS

Photographic credits

Valentina Gugole / foto pp. 40, 41, 42
Francesca Torzo architetto / foto pp. 1, 46, 47, 48

Book "The Foucault Pendulum in the Salone"

translation
G. Torzo, F. Torzo Venier
design
Francesca Torzo architetto
typefaces
Palatino

in memory of Mariangela Venier and Antonio Drigo.

Autori

progetto scientifico
prof. Giacomo Torzo . Università di Padova . LabTrek srl
progetto allestimento
arch. Francesca Torzo Venier
strutture metalliche
ing. Luca Priore . Millennium engineering
lavorazioni meccaniche
Dario Sarzo. DSG snc
verniciatura e serigrafia
Antonio Venti . Plastigraf SaS

Autori delle fotografie

Valentina Gugole / foto pp. 40, 41, 42
Francesca Torzo architetto / foto pp. 1, 46, 47, 48

Libro "Il Pendolo di Foucault a Palazzo della Ragione"

traduzione
G. Torzo, F. Torzo Venier
progetto grafico
Francesca Torzo architetto
caratteri
Palatino

in memoria di Mariangela Venier ed Antonio Drigo.