

# Péndulo de Foucault

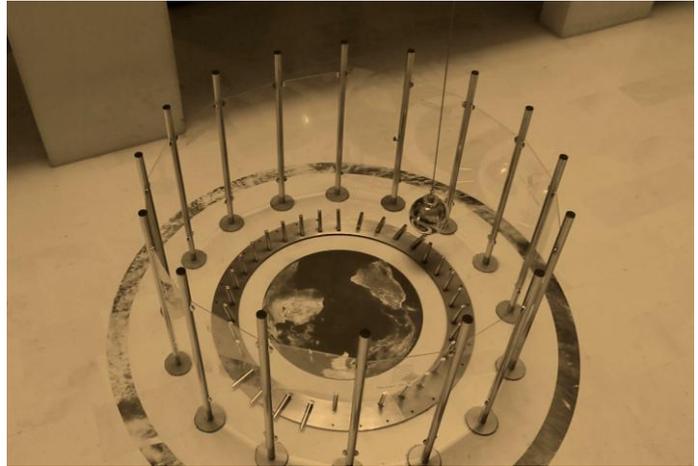
¡Estás rotando con la Tierra... aunque no te des cuenta!

## ¿Qué es un péndulo de Foucault?

Es un elegante experimento que demuestra la rotación de la Tierra, ideado por el físico francés Jean Bernard-León Foucault.



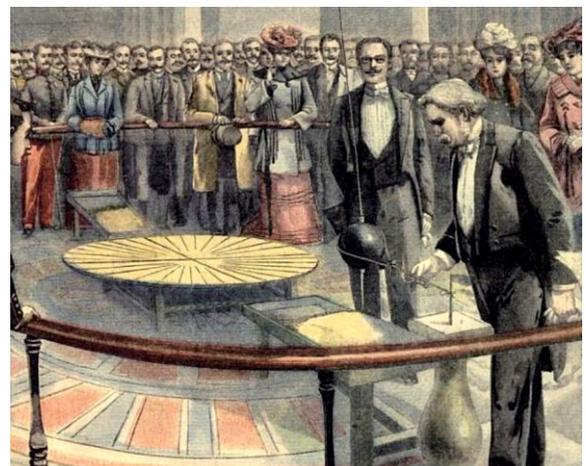
Jean Bernard-León Foucault (1819 – 1868)



Se trata de un péndulo capaz de oscilar libremente durante largo tiempo en cualquier plano vertical (llamado *plano de oscilación*).

Tras algunas pruebas anteriores, en su taller y en el Observatorio de París, el 26 de marzo de 1851, en el marco de la Exposición Universal, Foucault realizó una demostración pública en el Panteón de París (también conocido como Iglesia de Santa Genoveva). Suspendió de la cúpula del Panteón una bola de hierro de 28 kg con un cable de acero de 67 m de longitud; el periodo de este péndulo (tiempo de ida y vuelta de la bola) era de 16 segundos.

Para iniciar el movimiento, el péndulo era separado de su posición vertical de equilibrio y retenido con una cuerda; ésta se prendía y, cuando se había quemado lo suficiente, se rompía permitiendo oscilar al péndulo. De ese modo se evitaba imprimirle ningún impulso en dirección diferente a la de su oscilación natural.



Bajo el punto de suspensión había una balsa circular, de unos 3 m de radio, llena de arena húmeda, sobre la que una aguja metálica colocada en la parte inferior de la bola iba dibujando la trayectoria. El péndulo no contaba con ningún dispositivo que compensara su pérdida de energía por rozamiento con el aire, así que necesitaba un nuevo impulso cada 5 o 6 horas. Pero ese tiempo era suficiente para poner de manifiesto el efecto: pasados unos minutos, la traza de la aguja se había engrosado y, en unas horas, el sector circular barrido era de más de  $60^\circ$ , es decir, el plano de oscilación había girado ese ángulo. Así, todos los presentes pudieron comprobar que el plano de oscilación del péndulo rotaba en sentido horario, unos  $11^\circ$  por hora, de modo que la circunferencia se completaría en algo más de 32 h; y Foucault logró demostrar experimentalmente, en directo y por primera vez, la rotación terrestre.

***La lenta rotación del plano de oscilación del péndulo es realmente una ilusión de los observadores situados sobre la Tierra, incapaces de percibir su propia rotación.***

En el Panteón de París puede verse actualmente una reproducción de aquel péndulo original.



Como en muchos otros péndulos de Foucault, entre ellos el del Museo de la Ciencia de Valladolid, la balsa de arena ha sido sustituida por un conjunto de *testigos* (pivotes dispuestos en círculo) que caen al ser golpeados por la bola, mostrando el giro aparente del plano de oscilación.

(Fotograma del video cedido por Sergio Paredes, autor del blog <http://cluster-divulgacioncientifica.blogspot.com> )

### **¿En qué consiste el experimento?**

El llamado *cuadro de Foucault* ilustra muy bien el funcionamiento del péndulo.

Es un péndulo que puede oscilar libremente en cualquier dirección, suspendido por un punto de un cuadro metálico montado sobre una plataforma giratoria.

(Imagen del Cuadro de Foucault de la colección de instrumentos antiguos de Física del IES José Zorrilla, [http://centros5.pntic.mec.es/ies.zorrilla/dependencias\\_especiales/](http://centros5.pntic.mec.es/ies.zorrilla/dependencias_especiales/) )



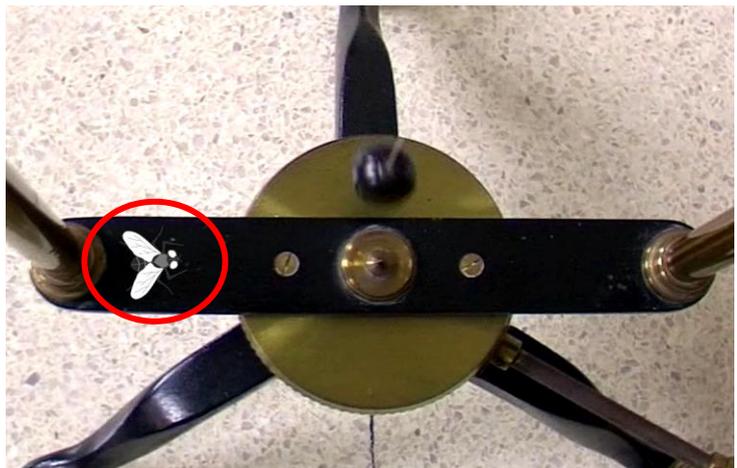
Al ponerlo en movimiento se comprueba que el péndulo se balancea en un plano de oscilación que permanece fijo: el movimiento de la masa y del hilo quedan confinados en un mismo plano vertical e inmóvil.

Físicamente, esto se explica por la primera ley de Newton o *Principio de inercia*. Según éste, todo cuerpo continúa en su estado de reposo o de movimiento uniforme (con velocidad constante) en línea recta, a menos que se ejerzan sobre él fuerzas externas. En el caso del péndulo, las dos fuerzas que actúan sobre la masa son su peso y la tensión del hilo, y ambas están contenidas en el plano de las oscilaciones, en el que continúa el movimiento una vez iniciado. Para cambiar este plano habría que aplicar una fuerza *perpendicular al mismo*. (Más adelante veremos cuál es esta fuerza en el caso del péndulo de Foucault).



Aunque se haga girar la plataforma con la manivela, el plano de oscilación del péndulo permanece inalterado, visto desde el exterior, es decir, visto por un *observador inercial*.

Pero una mosca posada sobre la plataforma giratoria, o sobre el marco metálico que gira con ella, vería que el plano de oscilación del péndulo va rotando. Para esta *observadora no inercial* el plano de oscilación girará alrededor del eje vertical, en sentido contrario al de rotación de la plataforma y con la misma velocidad angular que ésta.



En un péndulo de Foucault la plataforma giratoria es la propia Tierra y los seres humanos las 'moscas' posadas en su superficie, rotando con ella y observando cómo gira lentamente el plano de oscilación.

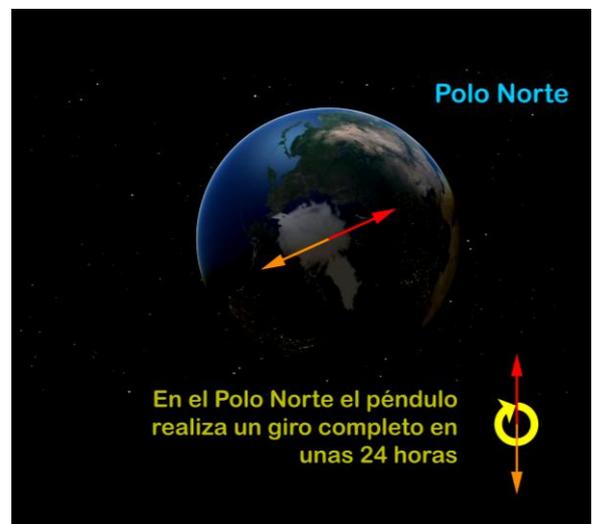


**Como hemos visto, realmente el plano de oscilación del péndulo es fijo: aunque nosotros no percibimos la rotación terrestre, es la Tierra quien, a medida que gira, va “ofreciendo” a la bola del péndulo los sucesivos testigos.**

### ¿Es el péndulo un reloj?

A simple vista, eso parece, ya que el plano de oscilación del péndulo va girando con el tiempo de forma regular... Pero sería un reloj poco útil, ya que gira a distinto ritmo en puntos de la Tierra con diferente latitud. Veamos algunos ejemplos:

- En el polo norte (latitud  $90^\circ$ ): el plano de oscilación gira  $360^\circ$  en aproximadamente 24 h, en el sentido de las agujas del reloj (al revés que el de la rotación terrestre). Decimos “aproximadamente 24 h” porque, en realidad, son 23 h 56 m 4 s, lo que tarda la Tierra en dar una vuelta sobre su eje, medido con respecto a las estrellas. Éste es el *día sidéreo*, definido como el tiempo transcurrido entre dos momentos sucesivos en que una estrella de referencia alcanza su máxima altura sobre el horizonte del observador.



- En París (latitud  $49^\circ$ ): el plano de oscilación gira más lento,  $360^\circ$  en algo más de 32 h. En 24 h giraría  $\frac{3}{4}$  de vuelta,  $270^\circ$ .

- En Valladolid (latitud  $41^\circ$ ): el plano de oscilación gira aún más lentamente,  $360^\circ$  en casi 37 h. En 24 h sólo le da tiempo de girar  $240^\circ$ .
- En las Islas Canarias (latitud  $28^\circ$ ): el plano de oscilación tarda casi 51 h en dar una vuelta entera, y en 24 h gira sólo  $170^\circ$ .



- En el Ecuador (latitud  $0^\circ$ ): el plano de oscilación permanece fijo, tardaría un tiempo infinito en completar una vuelta.
- El comportamiento del péndulo es simétrico respecto al ecuador: en el hemisferio sur gira en sentido contrario a las agujas del reloj y, como en el hemisferio norte, también gira más rápido a mayor latitud.



- En el polo sur (latitud  $-90^\circ$ ): el movimiento aparente del péndulo es igual que en el polo norte, gira  $360^\circ$  en unas 24 h, pero en sentido antihorario.

Se puede cuantificar el ritmo de giro del plano de oscilación en función de la latitud:

en un punto de la superficie terrestre, de latitud  $\lambda$ , el suelo se comporta como una plataforma giratoria con una velocidad angular  $\Omega = \omega \text{ sen } \lambda$ , donde  $\omega$  representa la velocidad angular de rotación de la Tierra. Un péndulo de Foucault en ese punto gira a la misma velocidad angular. Si  $T$  es el tiempo empleado por el plano de oscilación en dar una vuelta completa, se verifica  $T = 2\pi / \Omega = 2\pi / \omega \text{ sen } \lambda$ . Y, siendo  $t = 2\pi / \omega$  el día sidéreo (casi 24 h), podemos escribir  $T = t / \text{sen } \lambda$ .

En el polo norte o sur, el ángulo girado en 1 h es  $360^\circ / 24 \text{ h}$  (aprox.) =  $15^\circ$ . En cualquier otra latitud, este ángulo es función de la latitud del lugar:  $\theta = 15^\circ \text{ sen } \lambda$

Punto sobre la Tierra	$\lambda$	$\text{sen } \lambda$	$T = 1 \text{ día sidéreo} / \text{sen } \lambda$	Ángulo girado en 24 h
Polo norte	+90°	1	1 día sidéreo = unas 24 h	360°
París	49°	0,7547	Casi 32 h	Casi 270°
Valladolid	41°	0,6561	Más de 36 h	Unos 240°
Canarias	28°	0,4695	Casi 51 h	Casi 170°
Ecuador	0°	0	Tiempo infinito (no gira)	0°
Polo sur	-90°	-1	1 día sidéreo = unas 24 h	360°

***Si un péndulo de Foucault funciona con precisión, la velocidad y sentido de su giro permiten determinar la latitud del lugar de la experiencia sin necesidad de observación astronómica desde fuera.***

### **Foucault y Coriolis**

El péndulo de Foucault demuestra también el llamado *efecto Coriolis*, descubierto por el científico francés del mismo nombre en 1836.

Una manifestación de este efecto es que, debido a la rotación de la Tierra de oeste a este, los objetos que se mueven sobre la superficie terrestre se desvían hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el sur. La magnitud de la desviación aumenta con la velocidad del objeto y con la latitud.

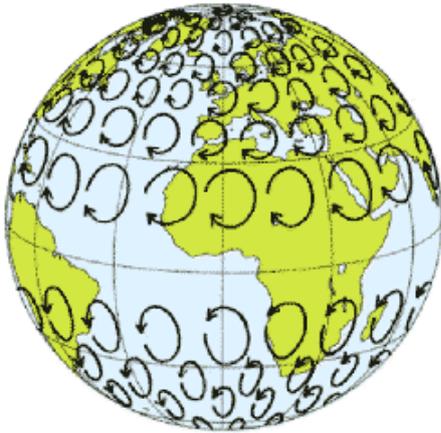
Para calcular correctamente la trayectoria de cualquier cuerpo que se desplaza sobre la Tierra, hay que tener en cuenta no sólo la velocidad propia de su movimiento, sino también la velocidad lineal de rotación que comparte con nuestro planeta, que es función de la latitud desde la que parte, y que tiende a permanecer constante por efecto de la *inercia*.

Desde el punto de vista de un observador terrestre (en rotación), un objeto que se desvía de su trayectoria está experimentando una aceleración, es decir, es como si sobre él actuara una fuerza. Realmente esa aceleración no es causada por una fuerza real, sino que se debe a que el sistema de referencia está rotando; pero para explicarla se introduce una *fuerza inercial o ficticia* llamada *fuerza de Coriolis*. Ésta es perpendicular al eje de rotación terrestre y a la dirección del movimiento del cuerpo vista desde la Tierra.

El vaivén de un péndulo de Foucault también es afectado por el efecto Coriolis.

La descripción precisa del movimiento es complicada, así que veamos un ejemplo sencillo: imaginemos un péndulo en el polo Norte, oscilando en un plano cualquiera. Visto desde fuera de la Tierra, este plano permanece fijo, ya que las únicas fuerzas sobre el péndulo son el peso de la bola y la tensión del cable, ambas contenidas en ese mismo plano. Pero para un observador terrestre, sobre el péndulo actúa además la fuerza de Coriolis, *perpendicular al*

*plano de oscilación*, causando la rotación de dicho plano en sentido horario. Tal como adelantábamos en la explicación del cuadro de Foucault, esta fuerza perpendicular al plano del movimiento justifica su giro.

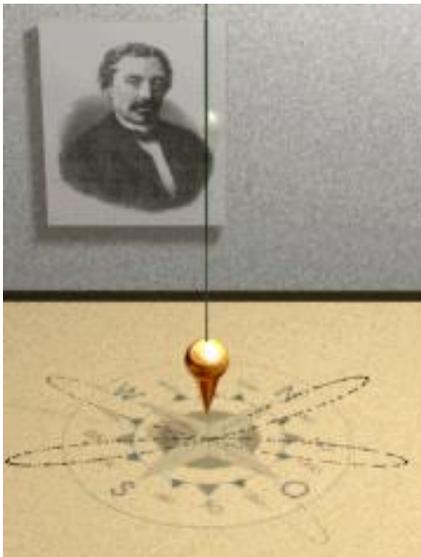


La fuerza de Coriolis es también responsable de la circulación del aire alrededor de los centros de baja o alta presión, a derechas en el hemisferio Norte, a izquierdas en el Sur, la desviación de la trayectoria de proyectiles de largo alcance, etc.

Esta borrasca sobre Islandia pone de manifiesto el efecto Coriolis



(Imagen de: <http://eltamiz.com/2007/06/23/falacias-el-agua-gira-en-los-desagues-por-la-fuerza-de-coriolis/> )



La figura que describe el péndulo de Foucault en el suelo parece una flor, y matemáticamente se describe por la familia de ecuaciones llamada *rosa polar*. El número y forma de los pétalos varía con la latitud del lugar.

(Puedes verlo en <http://www.youtube.com/watch?v=wIhHWYKswik&feature=related>, <http://www.todointeresante.com/2010/03/rosa-polar-grafica-efecto-coriolis.html>)

## ¿El péndulo no se detiene por el rozamiento con el aire?

Naturalmente, así sucedería... si no se evitase proporcionando al péndulo la energía que pierde por rozamiento. Pero un dispositivo formado, por ejemplo, por un anillo de hierro y un electroimán, colocado en la parte superior del cable (también puede ir en el suelo), compensa la pérdida de energía por rozamiento, y el péndulo puede funcionar sin pararse.

(Más información en <http://www.calacademy.org/products/pendulum/page8.htm>,  
[http://www.cecs.cl/pendulo/index.php?option=com\\_content&view=article&id=46&Itemid=60](http://www.cecs.cl/pendulo/index.php?option=com_content&view=article&id=46&Itemid=60))

## Otras contribuciones de Foucault a la Física

Además del péndulo que lleva su nombre, Léon Foucault logró medir la velocidad de la luz con una increíble precisión para la época: obtuvo 298.000 km/s, sólo un 0,6% menor que el valor admitido actualmente.



Giróscopo de finales del siglo XIX

Para comprender la dependencia de la velocidad de rotación del péndulo con la latitud, inventó en 1852 el *giróscopo* o *giroscopio*, un dispositivo fundamental para la orientación y navegación de barcos, aviones y naves espaciales. Actualmente tenemos modernos giróscopos integrados en los teléfonos móviles y en los mandos de consolas, que permiten detectar los movimientos realizados con ellos.

**¡Da las gracias a Foucault la próxima vez que juegues!**

(Más información en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Gir%C3%B3scopo>,  
<http://www.neoteo.com/2011-el-ano-del-giroscopo>)

## Para saber más:

- <http://neuro.qi.fcen.uba.ar/ricuti/foucault/foucault.html>
- <http://www.slideshare.net/martimarti/pendulo-de-foucault-presentation>
- <http://cofradiaastronomica.com/index.php/ciencia-aplicada/pendulo-de-foucault/>
- [http://es.wikipedia.org/wiki/P%C3%A9ndulo\\_de\\_Foucault](http://es.wikipedia.org/wiki/P%C3%A9ndulo_de_Foucault)
- <http://www.principia-malaga.com/portal/pdfs/pendulo.pdf>

Ilustraciones extraídas del video de explicación que puede verse junto al péndulo de Foucault del Museo de la Ciencia de Valladolid:

<http://www.museocienciavalladolid.es/opencms/mcva/QueOfrecemos/ExposicionPermanente/vestibulo.html>