

El péndulo de Foucault

De entre la gran variedad de experimentos científicos, destacan los que demuestran algún fenómeno natural. El péndulo de Foucault, llamado así en honor del célebre físico francés que vivió en el siglo XIX, constituye uno de estos *experimentum crucis*: permite verificar, sin necesidad de observar el cielo estrellado, que nuestro planeta gira sobre sí mismo.

Se basa en una pesada esfera que oscila en el extremo de un fino cable. Pese a guardar estrecha semejanza con el péndulo matemático, esconde bajo su aparente simplicidad un funcionamiento delicado y sensible, que requiere una experimentación paciente y minuciosa. Con todo, acepta errores sistemáticos inferiores al 15 por ciento.

La clave del éxito del péndulo de Foucault reside en la orientación de su plano de oscilación, que tiende a mantenerse constante en el espacio. Constituye, pues, un sistema de referencia inercial respecto del cual observamos el giro de nuestro planeta. Su movimiento aparente se atribuye, a menudo, a una precesión; en realidad se trata de la rotación de la línea de los ápsides (el eje mayor de una órbita), debida a la fuerza (ficticia) de Coriolis. A ello se debe que el plano de oscilación del péndulo gire en sentido horario en el hemisferio norte y antihorario en el hemisferio sur.

Dispuestos a acometer la construcción del péndulo, localizaremos en primer lugar un espacio tan alto como sea posible; por ejemplo, una caja de escalera o una nave industrial. El propio Foucault consiguió resultados óptimos con un péndulo de sólo 2 metros de longitud.

El período de la oscilación depende sólo de la longitud del péndulo y del potencial gravitatorio en el punto donde se instala. Se aconseja restringir la amplitud de la oscilación a valores pequeños. Las grandes amplitudes conllevan algunos inconvenientes: por un lado, las ecuaciones que definen el movimiento del péndulo son más complejas (no admiten simplificaciones); por otro, en los extremos de la trayectoria el cable de suspensión se destensa, mientras la esfera intenta trazar un cicloide.

El siguiente paso consiste en fijar en el techo una placa circular metálica. Allí instalaremos un rodamiento axial de bolas y, sobre éste, la pinza que fija el cable. Como es lógico, en el punto de suspensión entre el rodamiento y el cable debe absorberse el movimiento relativo entre la Tierra y el péndulo. En nuestro caso, este movimiento se realiza mediante la torsión del hilo de suspensión. (La solución óptima pasaría por utilizar una suspensión cardán: dos círculos concéntricos cuyos ejes forman ángulo recto; ello permite mantener la orientación de un eje de rotación en el espacio, aunque su soporte se mueva.)

Los ejes de esta suspensión deben encontrarse exactamente en el mismo plano; de lo contrario, la longitud efectiva del péndulo varía según los distintos planos de oscilación y, por tanto, el período se altera. Estas pequeñas diferencias en la longitud del péndulo, junto con posibles defectos de construcción de la esfera, corrientes de aire y errores en la puesta en marcha del experimento contribuyen a tornar elíptica la trayectoria del péndulo. En la práctica, pues,



resulta casi imposible conseguir que el péndulo oscile en un plano ideal. En cada oscilación, se produce una precesión esférica que perturba el movimiento del péndulo. Por ello, se procurará una construcción simétrica.

En lo que atañe a la esfera, cuanto más pesada sea ésta mayor inercia y estabilidad conseguiremos. Entre 20 y 30 kg serán suficientes. Puede generarse con relativa facilidad mediante un torno de control numérico; durante el mecanizado deberá marcarse, con una incisión, el ecuador, perfectamente equidistante de los polos, donde situaremos el hilo de lanzamiento. La fijación del cable de acero en la esfera se consigue mediante un tornillo de presión, que comprime un cono de aluminio sobre el hilo de suspensión.

Para el cable utilizaremos, como ya hizo Léon Foucault, cuerda de piano: fino hilo de acero con una resistencia de alrededor de 150 kg/mm². Para esferas de 20 o 30 kilos, necesitaremos un diámetro de 0,8 mm. Cuanto más delgado sea el hilo, menor resistencia ofrecerá a la torsión y, por tanto, mejor comportamiento mostrará el péndulo a la hora de mantener constante su plano de oscilación. En cualquier caso, la fatiga del material en el punto de suspensión puede provocar la rotura; por tanto, deberemos aplicar un amplio margen de seguridad.

Con el péndulo en marcha, el experimentador verifica que, en apariencia, sólo rota una fracción de vuelta cada día. ¿Por qué no completa los 360°? En realidad, esto sólo sucedería en los polos, donde veríamos que la Tierra gira, en un día sidéreo (23h 56' 04''), una vuelta completa respecto del plano de oscilación del péndulo. Justo lo contrario sucedería en el ecuador, donde la vertical del péndulo quedaría perpendicular al eje de rotación del planeta y, por tanto, no resultaría posible detectar dicha rotación. En las

Péndulo de Foucault en CosmoCaixa Barcelona, el nuevo Museo de la Ciencia de la Fundación "la Caixa".



Una oscilación compleja y delicada

LONGITUD MÁXIMA Y AMPLITUD MÍNIMA. Las ecuaciones que describen el movimiento del péndulo pueden simplificarse si su longitud (L) es grande y la amplitud de la oscilación (A) pequeña. En tales condiciones, el período puede aproximarse a

$$p = 2\pi(L/g)^{1/2}$$

donde la aceleración de la gravedad g (en m/s²), a una latitud geográfica γ y una altura h (en metros), viene dada con suma precisión por la fórmula de Helmert

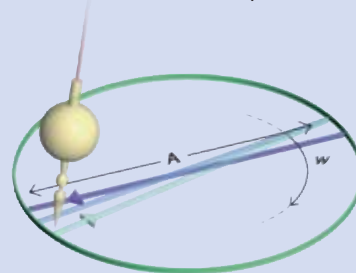
$$g = 9,80612 - 2,5865 \cdot 10^{-2} \cos 2\gamma + 5,8 \cdot 10^{-5} \cos^2 2\gamma - 3,08 \cdot 10^{-6} \cdot h.$$

La expresión que define la rotación de la línea de los ápsides (en grados por hora sidérea)

$$w = 15^\circ [1 - 3/8 (A/L)^2] \operatorname{sen} \gamma$$

se simplifica, a grandes longitudes y amplitudes reducidas, en

$$w = 15^\circ \operatorname{sen} \gamma$$



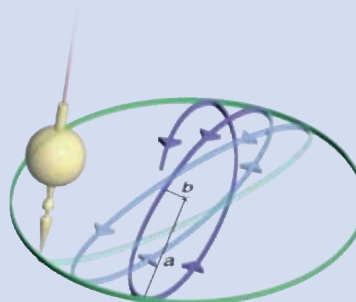
MAXIMA SIMETRÍA. El mecanismo de oscilación debe contar con la máxima simetría posible. Si los ejes de la suspensión no se encuentran exactamente en el mismo plano, la longitud efectiva del péndulo varía a medida que rota la línea de los ápsides. Ello altera el período a razón de

$$\Delta p/p = 1/2 \Delta L/L.$$

Además, la asimetría introduce, en cada oscilación, una precesión (ϕ) que perturba el movimiento del péndulo según

$$\Delta \phi = 3\pi ab/4L^2$$

donde a corresponde al semieje mayor de la elipse y b al semieje menor de la elipse.



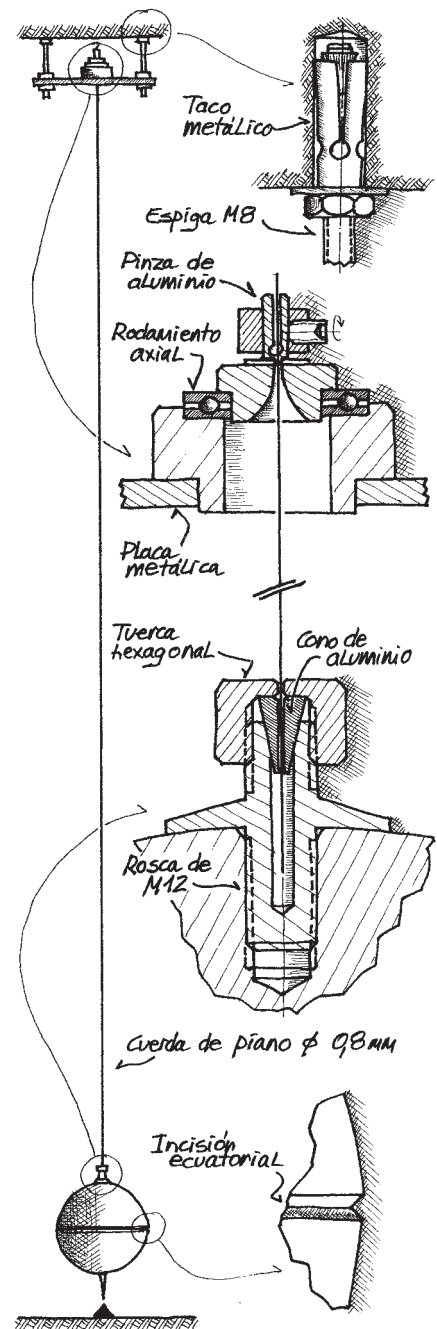
latitudes intermedias, el movimiento del péndulo resulta de una combinación de ambos escenarios.

Una vez a punto los componentes del péndulo, procederemos a instalarlos. Lo habitual es fijar en el techo una placa circular de acero o aluminio mediante seis espigas roscadas en tacos metálicos de expansión. Sobre la placa colocaremos un rodamiento axial y en éste la pinza que fija el cable. Procederemos luego a fijar la esfera, que previamente habremos colocado en un soporte que la sitúe a su altura definitiva. Para ello tiraremos el cable desde arriba hasta dejarlo tenso. Por fin, retiraremos el soporte de la esfera.

Para verificar el desplazamiento relativo entre el péndulo y nuestro planeta debemos utilizar métodos que introduzcan pocas perturbaciones. Foucault empleó un estilete fijado a la esfera que rozaba en dos montoncitos de arena situados en puntos opuestos respecto del punto central y en el extremo del recorrido del péndulo [véase "Léon Foucault", por William Tobin, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1998]. Otro método, similar, consiste en utilizar papel ennegrecido con humo, que queda marcado por un fino hilo de nailon fijado bajo la esfera.

Para poner en marcha el péndulo repetiremos el método original. Pondremos un lazo de hilo de algodón en el ecuador marcado en la esfera; tiraremos de éste con suavidad y, una vez apartado suficientemente de la vertical, lo fijaremos a un punto sólido y estable. Se recomienda dejar reposar la esfera en esta posición durante algunas horas, hasta que permanezca inmóvil. Por fin, quemaremos el nudo del hilo para que el péndulo inicie, con perturbaciones mínimas, su oscilación. Quizá resulte necesario repetir el lanzamiento, porque, pese a todas las precauciones, podríamos haber introducido algún movimiento espurio.

Poco a poco, el péndulo pierde energía por fricción con el aire, torsión, flexión, estiramiento del hilo y otras perturbaciones; por tanto, debe reimpulsarse pasadas unas cuantas horas. En el Panteón de París, Foucault impulsaba suavemente la



esfera cada 3 o 4 horas. En nuestro experimento, la frecuencia dependerá de la longitud del péndulo y de la masa de la esfera. Esta operación puede introducir nuevas perturbaciones.

Se observó entonces que un mecanismo automático para el movimiento del péndulo facilitaría la observación. En la actualidad, podemos recurrir a varios métodos; el habitual consiste en un electroimán anular que atrae una masa de hierro o un imán permanente fijado al hilo.