



Los relojes Comtoise, como se ve aquí en el Museo Comtoise del maestro relojero Bernd Deckert, son un reloj de péndulo francés de la región francesa de Franch-Comté. Si bien son hermosas antigüedades, también son increíblemente funcionales, manteniendo el tiempo, cuando se calibran correctamente, durante el lapso de un mes sin más que la pérdida de un minuto de precisión. (Horst Ossinger / Picture Alliance a través de Getty Images)

## El primer reloj en Estados Unidos falló y ayudó a revolucionar la física

El péndulo no marcó bien cuando lo trajeron aquí: el comienzo de una historia fascinante.



Ethan Siegel [Follow](#)

Sep 1 · 9 min read ★

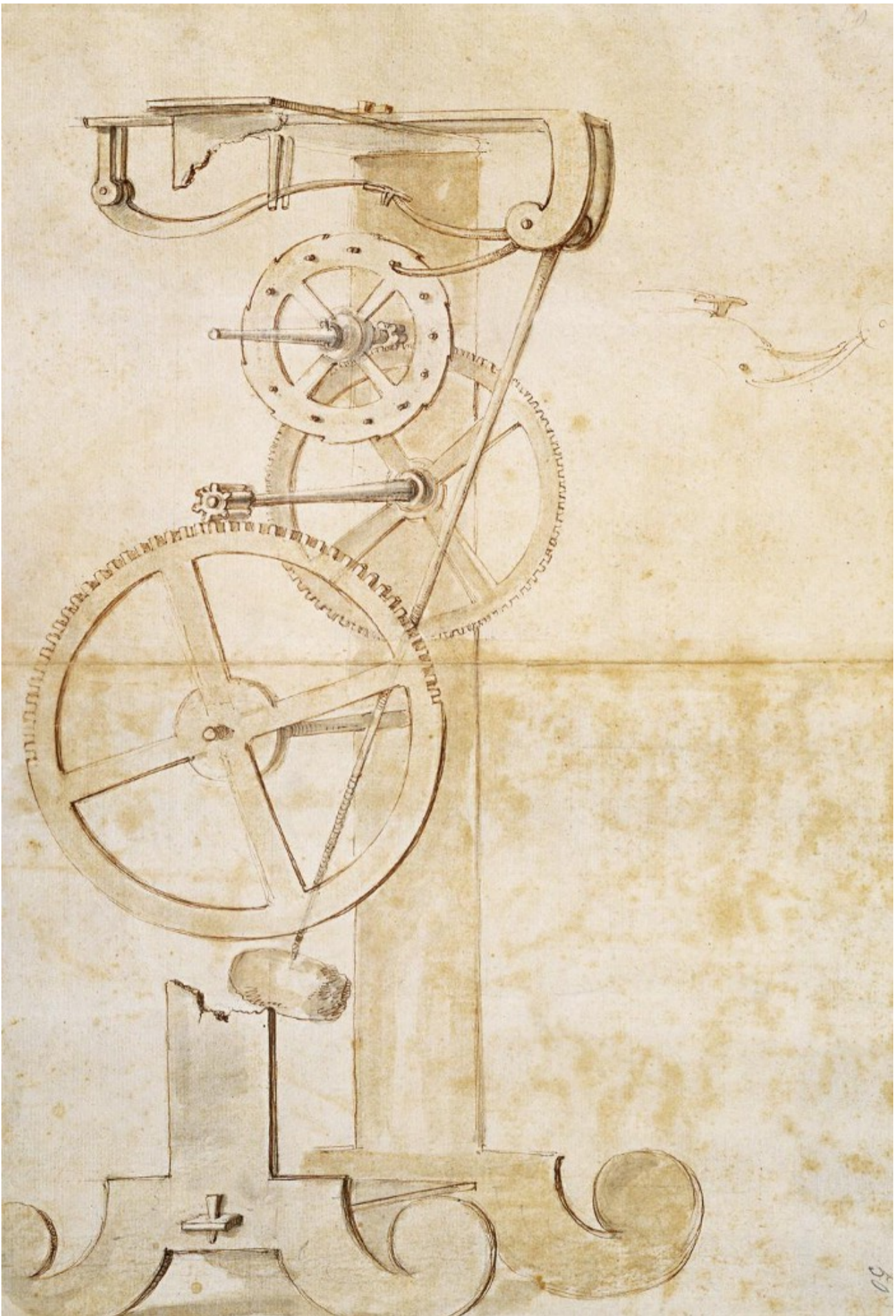
. . .

Durante casi tres siglos completos, la forma más precisa en que la humanidad registró el tiempo fue a través del reloj de péndulo. Desde su desarrollo inicial en el siglo XVII hasta la invención de los relojes de cuarzo en la década de 1920, los relojes de péndulo se convirtieron en elementos básicos de la vida doméstica, permitiendo a las personas organizar sus horarios de acuerdo con un estándar universalmente acordado.

Inicialmente inventado en los Países Bajos por Christian Huygens en 1656, sus primeros diseños se refinaron rápidamente para aumentar en gran medida su precisión.

Pero cuando se llevó el primer reloj de péndulo a América, sucedió algo extraño. El reloj, que había funcionado perfectamente bien para mantener la hora exacta en Europa, podía sincronizarse con fenómenos astronómicos conocidos, como el atardecer / amanecer y el atardecer / salida de la luna. Pero después de solo una semana o dos en

las Américas, estaba claro que el reloj no marcaba la hora correctamente. El primer reloj en Estados Unidos fue un completo fracaso, pero eso es solo el comienzo de una historia que revolucionaría nuestra comprensión de la física del planeta Tierra.



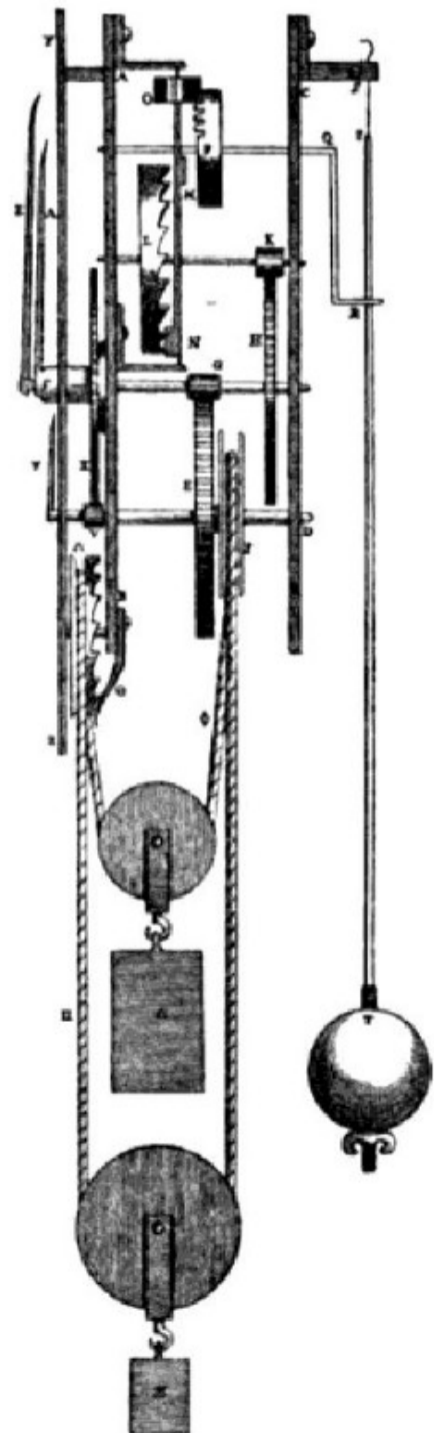
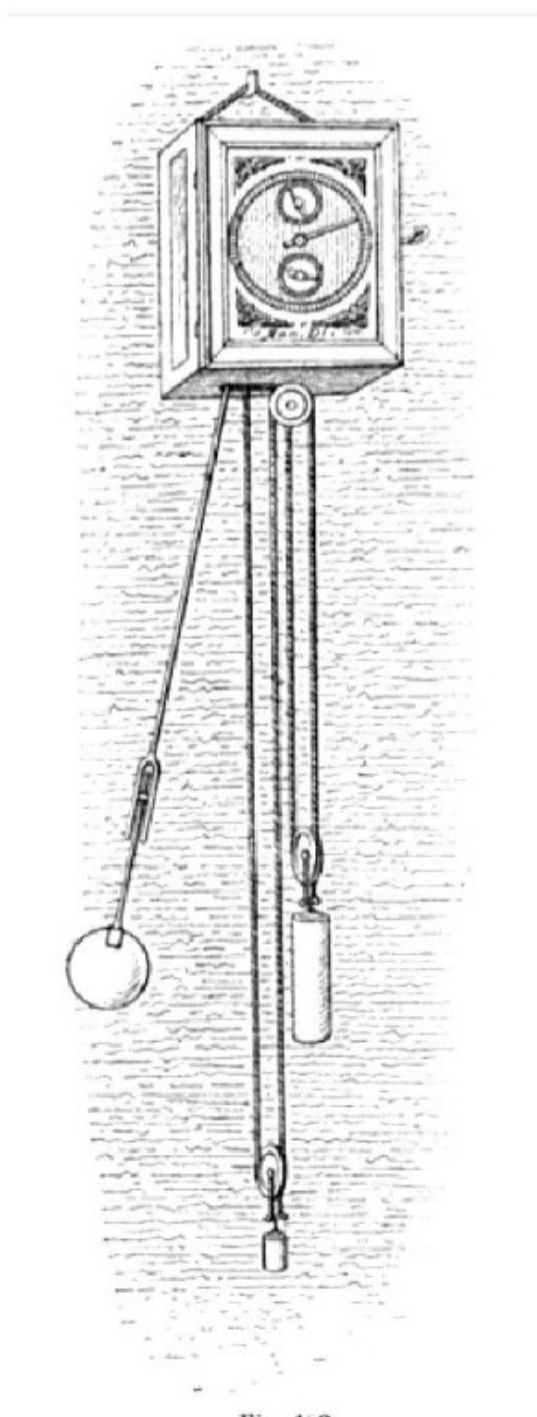
El primer dibujo de un concepto para un reloj de péndulo fue de Galileo Galilei, que buscó aprovechar el período uniforme de un péndulo oscilante para crear una máquina de cronometraje en funcionamiento. El dispositivo nunca fue completado, ni por Galileo ni por su hijo, y el primer reloj de péndulo fue construido en 1656 por Christiaan Huygens. (DE AGOSTINI VIA GETTY IMAGES)

Durante miles de años, los científicos no tuvieron mejor método para medir el tiempo que el antiguo reloj de sol. Pero a principios del siglo XVII, las investigaciones de Galileo sobre el péndulo oscilante y, en particular, su observación de que el período de un

péndulo estaba determinado únicamente por su longitud, llevaron a la idea de que un péndulo podría teóricamente usarse como reloj. Galileo discutió la idea en 1637 y, aunque murió en 1642, la idea siguió viva.

En 1656, Christiaan Huygens inventó el primer reloj de péndulo en funcionamiento, que era a la vez primitivo y revolucionario en varias formas. Durante las siguientes décadas, se realizaron mejoras que mejoraron aún más el reloj de péndulo, que incluyen:

- acortando el swing de modo que solo ocurra para ángulos estrechos, aumentando su precisión,
- aumentar la longitud del péndulo y colocar una masa pesada en el extremo, lo que aumentó la longevidad del reloj,
- estandarizando una longitud de 0,994 metros para el péndulo, lo que significaba que cada "oscilación" de un lado a otro duraba exactamente un segundo,
- y la adición de un minuterio, ya que los relojes ahora eran lo suficientemente precisos como para que fracciones de hora, hasta el minuto, fueran ahora cantidades significativas para discutir.



La vista frontal (L) y lateral / esquemática (R) del primer reloj de péndulo jamás construido, en 1656/7, que fue diseñado por Christiaan Huygens y construido por Saloman Coster. Los dibujos provienen del tratado de Huygens de 1658, Horologium. Se hicieron muchos refinamientos posteriores, incluso antes de la gravedad de Newton, en este diseño original. (CHRISTIAN HUYGENS, 1658)

Todas estas innovaciones se han realizado antes de 1700: un conjunto notable de avances en un corto período de tiempo. La principal "fuente de error" conocida que ocurrió con estos relojes de péndulo se debió a los cambios de temperatura: la longitud del péndulo aumentaría o disminuiría a medida que los materiales con los que estaban hechos se expandieron o contrajeron con la temperatura. Al desarrollar un péndulo con compensación de temperatura, donde el período de una oscilación no cambiaba incluso como lo hizo la temperatura, los relojes de péndulo podrían tener una precisión de unos pocos segundos por semana. El primer reloj construido en Estados Unidos no se produciría hasta muchas décadas después de ese avance, por lo que se importaron los primeros dispositivos de cronometraje estadounidenses.

Por eso fue todo un enigma cuando se trajo el primer reloj de péndulo de Europa a América. El reloj, construido y calibrado en Holanda, era exquisitamente preciso. Los tiempos de puesta del sol / amanecer y puesta de la luna / salida de la luna fueron precisos durante semanas, con estrellas saliendo y poniéndose dentro de un minuto de la hora prevista sin ninguna calibración durante aproximadamente un mes completo. Pero una vez que ese reloj llegó a Estados Unidos, se dio cuerda y comenzó a hacer tictac, todo comenzó a ir mal.

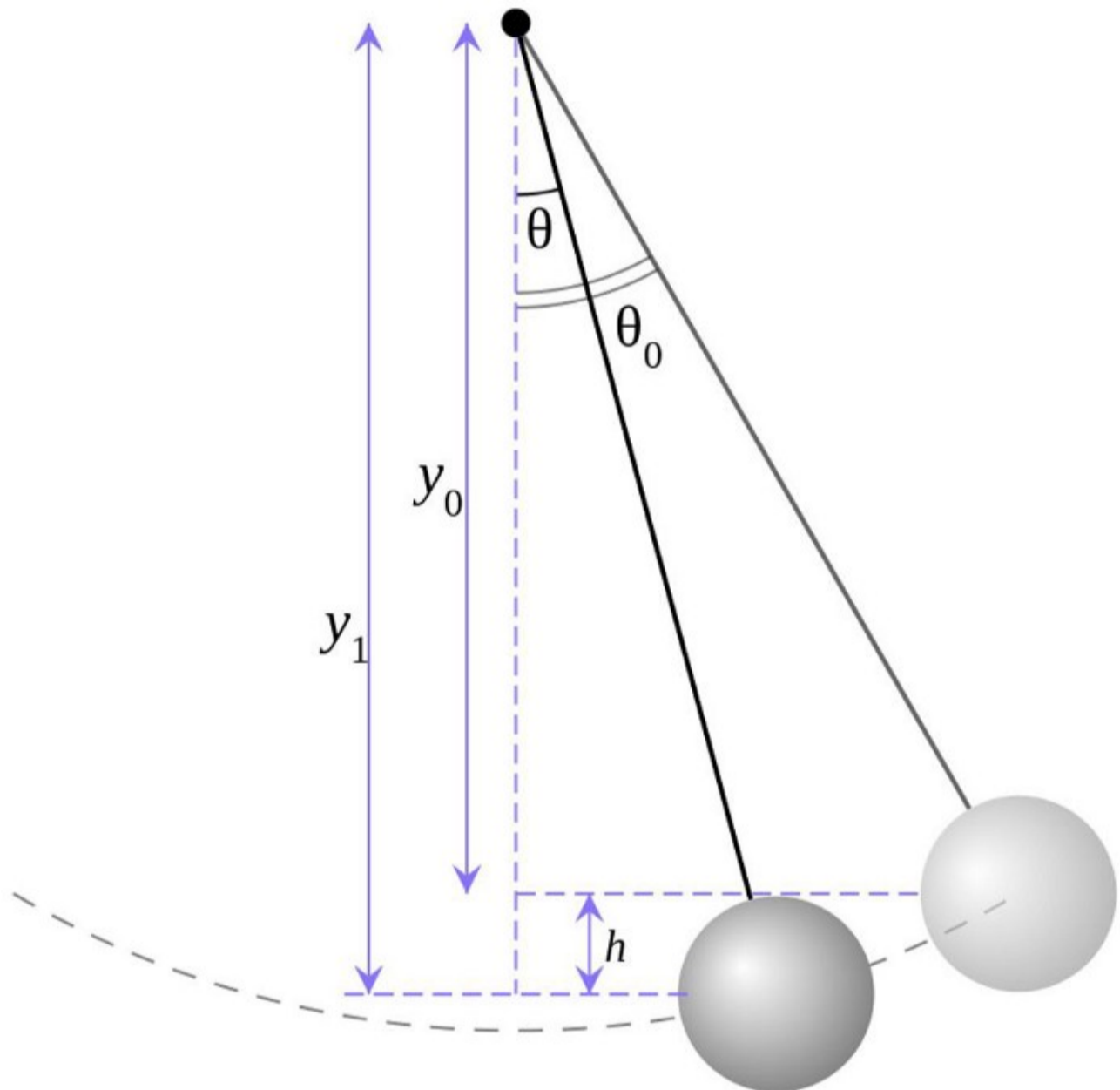


Un viaje de Europa a América, en el siglo XVII, habría significado típicamente viajar desde latitudes más altas (más cerca del polo) a latitudes más bajas y ecuatoriales. Si bien este hecho se apreciaba en general en ese entonces, no se apreciaba que la aceleración gravitacional y, por lo tanto, el período de un péndulo también fueran diferentes. (© HERRAMIENTAS DE MAPAS GRATUITAS / OPENSTREETMAP)

En una sola semana, la gente notó que el Sol y la Luna no salían ni se ponían en los momentos previstos, según este nuevo reloj. Además, el desajuste empeoraba con cada día que pasaba. Mientras que se suponía que el reloj tenía una precisión de aproximadamente 2 segundos por día, o aproximadamente 15 segundos por semana, en ese momento, se ralentizaba en más de 30 segundos por día. Al final de la primera semana, se redujo en casi 5 minutos.

Claramente, concluyeron, el reloj debió haber sufrido algún daño durante el viaje transatlántico que se requirió para transportar el reloj de Europa a América. Así que hicieron lo único que sabían hacer: enviar el reloj al fabricante para su reparación. Luego de otro viaje transatlántico, donde el reloj fue devuelto de América a Holanda. Cuando llegó, dieron cuerda al reloj, observaron su tictac y lo compararon con todas las otras formas que conocían para medir el tiempo: con otros relojes, con relojes de sol y con la salida y puesta de los objetos celestes.

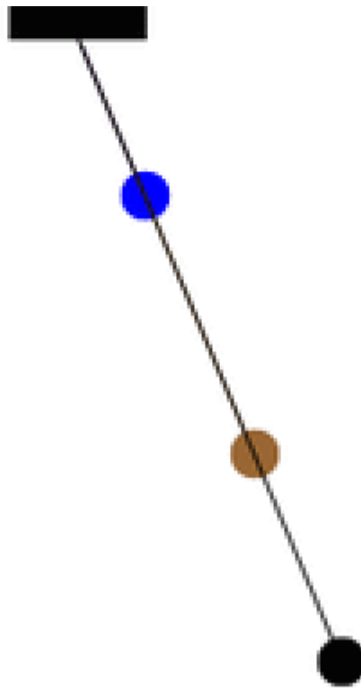
A menos de 2 segundos por día, el reloj era perfectamente preciso.



Un péndulo, siempre que todo el peso esté en la sacudida en la parte inferior mientras se puede despreciar la resistencia del aire, los cambios de temperatura y los efectos de grandes ángulos, siempre tendrá el mismo período cuando esté sujeto a la misma aceleración gravitacional. El hecho de que el mismo péndulo oscile a diferentes velocidades en diferentes lugares es un indicio de la gravitación de Newton. (COMUNES DE KRISHNAVEDALA / WIKIMEDIA)

Esta enloquecedora experiencia es familiar para cualquiera que haya estado en un escenario en el que su automóvil está haciendo algo que usted sabe que no debería estar haciendo: hacer un sonido extraño, manejar incorrectamente, calentarse demasiado, etc. Usted nota el problema, lo acepta a un mecánico, y tan pronto como llegas al mecánico, el auto comienza a comportarse como si nada estuviera mal. El problema omnipresente que ha estado experimentando constantemente se resuelve repentinamente cuando llega a la única persona que podría diagnosticarlo y solucionarlo. Sin embargo, tan pronto como se aleja, inevitablemente comienza a tener ese problema nuevamente.

Si hubieran enviado ese reloj a las Américas desde Europa, habrían visto ocurrir exactamente los mismos fenómenos. El reloj, que mantenía una hora exquisitamente precisa en Europa, habría comenzado a funcionar a un ritmo incorrecto en las Américas una vez más. La razón habría sido totalmente desconocida para cualquiera que viviera en la época de Galileo, pero comenzó a tener sentido una vez que comenzamos a comprender cómo funcionaba la gravitación.



En general, solo hay dos factores que determinan el período de un péndulo: su longitud, donde los péndulos más largos tardan más en completar una oscilación, y la aceleración debida a la gravedad, donde mayores cantidades de gravedad dan como resultado oscilaciones más rápidas del péndulo. (DANIEL A. RUSSELL / UNIVERSIDAD ESTATAL DE PENN)

Aquí en la Tierra, la fuerza gravitacional es lo que impulsa el balanceo de un péndulo. Si mueve un péndulo un poco lejos de su posición de equilibrio, la fuerza de gravedad es lo que lo empuja hacia la posición de equilibrio. Es cierto que el período del péndulo está relacionado con la longitud del péndulo: si desea duplicar el período, debe cuadruplicar la longitud. (Un péndulo de 0,994 metros de largo tardará dos segundos en volver a su posición inicial; un péndulo de 0,2485 metros de largo tardará 1 segundo en volver a su posición inicial; uno de 3,974 metros de largo tardará 4 segundos en volver a su posición inicial. , etc.)

Pero asumimos erróneamente, antes de que apareciera Newton, que la gravedad funcionaba de la misma manera en todas partes de la superficie de la Tierra. Pero la forma en que funciona la gravitación es que te atrae hacia el centro de la Tierra, incluso cuando toda la masa del planeta te atrae. Debido a que la Tierra gira sobre su eje, se abulta en su ecuador y se comprime en los polos. El efecto es leve pero aún sustancial, y significa que alguien en uno de los polos de la Tierra está más cerca del centro de la Tierra que alguien en el ecuador.

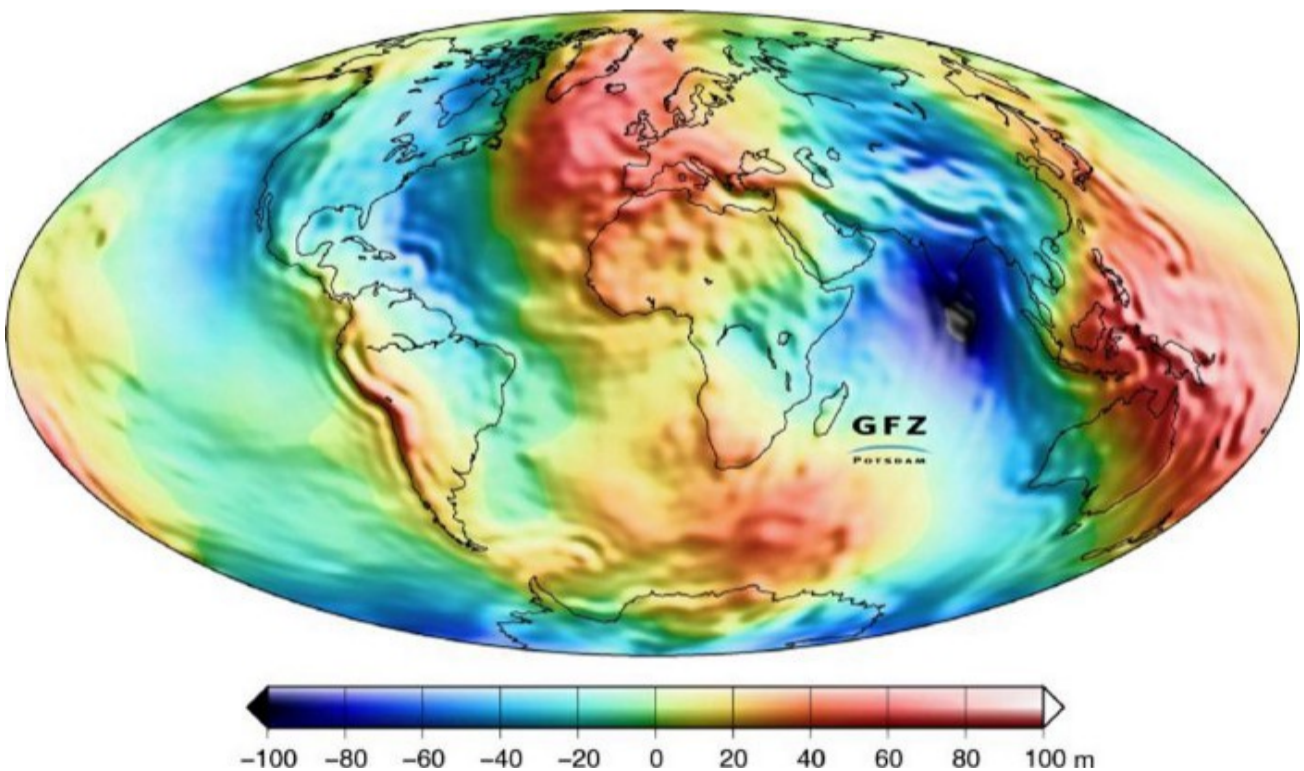




El diámetro de la Tierra en el ecuador es de 12.756 km, mientras que en los polos solo tiene 12.714 km. Estás 21 kilómetros más cerca del centro de la Tierra en el Polo Norte que en el ecuador. Esta diferencia se debe en gran parte a la rotación axial de la Tierra. (NASA / PROYECTO DE MÁRMOL AZUL / MODIS)

Si alguna vez has tomado una clase de física, es posible que hayas aprendido que todos los objetos se aceleran "hacia abajo" a  $9,8 \text{ m} / \text{s}^2$  bajo la influencia de la gravedad, lo que significa que si dejas caer un objeto desde el reposo y descuidas la resistencia del aire, se acelerará. hacia arriba, en la dirección descendente, en  $9,8 \text{ m} / \text{s}$  (aproximadamente 32 pies por segundo) por cada segundo que cae. ¡Y eso es verdad! Dondequiera que vaya, en la superficie de la Tierra, tendrá la misma aceleración hacia abajo, hacia el centro de la Tierra:  $9,8 \text{ m} / \text{s}^2$ .

Pero todavía no es cierto si se pasa a la tercera cifra significativa: a lo que comúnmente se cita como  $9,81 \text{ m} / \text{s}^2$ . En los polos, donde estás más cerca del centro de la Tierra, la aceleración gravitacional es un poco mayor que la media:  $9,83 \text{ m} / \text{s}^2$ . En el ecuador, donde estás más lejos del centro de la Tierra, la aceleración gravitacional es un poco menor que la media:  $9,78 \text{ m} / \text{s}^2$ . Estos efectos son pequeños, pero con el tiempo suficiente, se sumarán.



El campo gravitacional en la Tierra varía no solo con la latitud, sino también con la altitud y de otras formas, particularmente debido al grosor de la corteza y al hecho de que la corteza terrestre flota efectivamente sobre el manto. Como resultado, la aceleración gravitacional varía en unas pocas décimas de porcentaje en la superficie de la Tierra. (C. REIGBER et al. (2005), REVISTA DE GEODINÁMICA 39 (1), 1–10)

Aunque pensamos que las áreas más pobladas de Europa y América del Norte se encuentran aproximadamente en las mismas latitudes, ese no es el caso. Ámsterdam, la

ciudad más poblada de los Países Bajos, se encuentra a  $52^\circ$  N de latitud. Boston, que era la ciudad más grande tan al norte como lo era en las Américas, está  $10^\circ$  más al sur: a  $42^\circ$  N de latitud. Otros importantes centros de población de las Américas estaban aún más al sur, más cerca del ecuador, lo que exacerbaba esa diferencia.

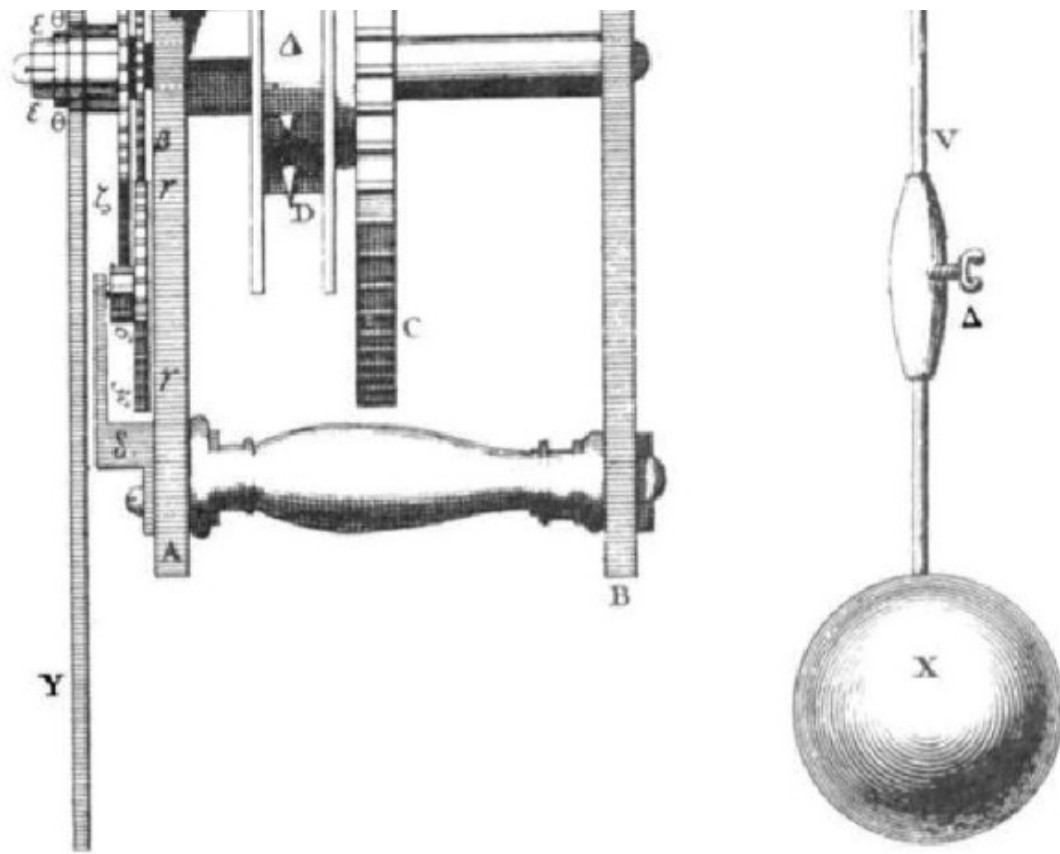
Los cambios de elevación también pueden marcar la diferencia, con ubicaciones de tierras bajas cerca de los polos que tienen las aceleraciones más altas en la Tierra de hasta  $9,834 \text{ m/s}^2$ , mientras que las cadenas montañosas altas cerca del ecuador conducen a la aceleración medida más baja:  $9,764 \text{ m/s}^2$ . Sin embargo, el problema de la latitud es particularmente importante cuando se trata de la hora normal, y podemos ver esto simplemente haciendo un cálculo simple.



Desde su invención en 1656 hasta la década de 1920, los relojes de péndulo fueron los dispositivos de cronometraje más precisos conocidos por la humanidad. Con el tiempo, se volvieron lo suficientemente







El diseño de un reloj de péndulo temprano, que fue construido en 1673 como su segundo diseño, por Christiaan Huygens, el inventor del reloj de péndulo. El dibujo es de su publicación *Horologium Oscillatorium* e incluye una serie de mejoras sustanciales con respecto a sus ilustraciones originales que se remontan a 1658. La gravedad de Newton no se formularía hasta 1687. (CHRISTIAAN HUYGENS, 1673)

Podría decirse que el reloj de péndulo fue la primera indicación experimental que tuvimos de que la gravedad no es uniforme en la superficie de la Tierra. Incluso antes de los avances de Isaac Newton, se sabía que un péndulo (si la oscilación es pequeña, la resistencia del aire es insignificante y la temperatura y la longitud permanecen constantes) siempre necesita la misma cantidad de tiempo para completar una oscilación completa. Pero el tiempo que tarda un péndulo en oscilar varía sobre la superficie de la Tierra, no solo con la longitud, sino con otros dos factores: altitud y latitud.

Fue un indicio importante de un hecho que ahora damos por sentado: que la atracción gravitacional de la Tierra depende de su distancia al centro de nuestro planeta, en lugar de ser uniforme en toda la superficie. El hecho de que la Tierra gire sobre su eje, y que la rotación haga que el ecuador se abulte en comparación con los polos, significa que un péndulo tarda más en completar una oscilación a medida que la gravedad se debilita. Cualquier reloj de péndulo, por lo tanto, debe calibrarse al campo gravitacional de exactamente donde se encuentra. El primer reloj en las Américas fue una demostración espectacular de este efecto, ¡siendo la causa subyacente la propia ley de la gravedad!

. . . .

*Starts With A Bang* is [now on Forbes](#), and republished on Medium on a 7-day delay. Ethan has authored two books, [Beyond The Galaxy](#), and [Treknology: The Science of Star Trek from Tricorders to Warp Drive](#).