

LAS  
4 FUERZAS  
QUE RIGEN EL  
UNIVERSO



JORDI PEREYRA

AUTOR DE «EL UNIVERSO EN UNA TAZA DE CAFÉ»

PAIDÓS

LAS  
**4 FUERZAS**  
QUE RIGEN EL  
**UNIVERSO**

JORDI PEREYRA

PAIDÓS   
Barcelona • Buenos Aires • México

1.<sup>a</sup> edición, marzo de 2017

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal). Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra. Puede contactar con CEDRO a través de la web [www.conlicencia.com](http://www.conlicencia.com) o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47.

© Jordi Pereyra Marí, 2017  
© de todas las ediciones en castellano,  
Espasa Libros, S. L. U., 2017  
Avda. Diagonal, 662-664. 08034 Barcelona, España  
Paidós es un sello editorial de Espasa Libros, S. L. U.  
[www.paidos.com](http://www.paidos.com)  
[www.planetadelibros.com](http://www.planetadelibros.com)

ISBN: 978-84-493-3316-3  
Fotocomposición: Anglofort, S.A.  
Depósito legal: B. 3.214-2017  
Impresión y encuadernación en Liberdúplex, S. L.

El papel utilizado para la impresión de este libro es cien por cien libre de cloro y está calificado como papel ecológico.

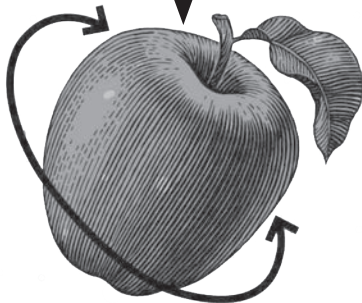
Impreso en España – *Printed in Spain*

# Sumario

Prólogo.....	9
Primera parte. LA GRAVEDAD. ....	17
Segunda parte. EL ELECTROMAGNETISMO. ....	85
Tercera parte. LAS FUERZAS NUCLEARES.....	159
Cuarta parte. HACIA UNA TEORÍA DEL TODO.....	219
Notas.....	231

PRIMERA PARTE

LA GRAVEDAD



## INTRODUCCIÓN

La gravedad es la fuerza fundamental con la que estamos más familiarizados. No sólo la experimentamos en nuestras propias carnes cada segundo de nuestras vidas a partir del momento en que nacemos, sino que llevamos notando sus efectos desde que surgió la vida en la Tierra, hace unos 3.700 millones de años.

Durante todo ese tiempo, los continentes se han movido en la superficie del planeta, nuevos océanos se han formado en los espacios que quedaban entre ellos o han desaparecido allá donde se unían, la composición de la atmósfera ha cambiado y el clima ha sufrido transformaciones que han remodelado la biosfera por completo. En un mundo que está en continuo cambio, el campo gravitatorio de la Tierra es lo único que ha permanecido constante desde el momento en el que se formó nuestro planeta.

Hoy en día tenemos una idea bastante precisa sobre cómo funciona la gravedad, pero explicar por qué las cosas caen al suelo no era una tarea tan sencilla en la Antigüedad.

A falta de instrumentos que les permitieran medir de qué manera la gravedad acelera el movimiento de las cosas hacia el suelo o de telescopios con los que poder distinguir que los planetas y las estrellas son cosas diferentes, los griegos empezaron a observar los fenómenos que tenían lugar a su alrededor para intentar encontrar pistas sobre la causa de esa misteriosa tendencia a caer al suelo que tienen las cosas.

Por ejemplo, observaron que algunas sustancias tendían a apilarse unas sobre otras en vez de mezclarse, colocándose siempre unas encima de otras en el mismo orden.

Aristóteles, que se había empeñado en que la Tierra era el centro del cosmos, atribuía este fenómeno a que la naturaleza de una sustancia es la que tiende a acercarla hacia el centro del universo con mayor o menor intensidad.

Vitruvio, un ingeniero y arquitecto romano, expone un ejemplo que «apoyaba» esta hipótesis en su libro *De Architectura*:<sup>1</sup>

Si el mercurio se vierte en un recipiente, y una piedra que pesa cien libras se coloca sobre él, la roca nada sobre su superficie y no puede deprimir el líquido, ni introducirse en él, ni separarlo. Si retiramos el peso de cien libras y colocamos un escrúpulo [medida de peso antigua, equivalente a 1,198 gramos] de oro, no nadará, sino que se hundirá hacia el fondo por su propia cuenta. Por lo tanto, es innegable que la gravedad de una sustancia no depende de la cantidad de su peso, sino de su naturaleza.

La observación de Aristóteles derivaba de la teoría griega de los cuatro elementos, que sugería que toda sustancia está compuesta por una mezcla específica de fuego, aire, tierra y agua. Esta línea de pensamiento suponía que el agua y la tierra eran los elementos que se veían atraídos hacia el centro del universo con mayor intensidad o que tenían un mayor «potencial interno», mientras el aire y el fuego tendían a alejarse de él, así que la proporción en la que se unieran los elementos determinaría si la sustancia a la que dieran lugar se acercaría hacia el centro del universo o se alejaría en mayor o menor medida. Aunque tuviera mérito para la época, esta explicación era completamente incorrecta: lo que estaban describiendo los griegos no era más que la propiedad de la densidad.

Otras civilizaciones le dieron vueltas al asunto de por qué las cosas caen, algunas con más acierto que otras. Por ejemplo, el astrónomo indio Brahmagupta (598-670 d.C.) creía en una Tierra esférica<sup>2</sup> donde «toda la gente camina erguida y todas las cosas pesadas caen hacia la tierra por ley natural, ya que la naturaleza de la tierra es atraer y aguantar las cosas, igual que la naturaleza del agua es fluir, la del fuego es arder y la del viento es mover. Si una cosa quiere ir a mayor profundidad que la tierra, deja que lo intente. La tierra es la única cosa baja y las semillas siempre vuelven a ella, independientemente de la dirección en la que las lances, y nunca se elevan hacia arriba».

No obstante, la teoría (o, más bien, hipótesis) errónea de Aristóteles perduró hasta el siglo XVII, cuando surgieron serias dudas sobre el papel central de la Tierra en el universo y los pensadores estaban empezando

a adoptar una mentalidad más científica. Ya no bastaba con observar un fenómeno e inventarse una explicación medianamente convincente, sino que había que demostrar su validez poniendo a prueba esa idea.

Otro de los postulados de Aristóteles sugería que no hay un efecto sin una causa. Es un planteamiento muy razonable pero, aplicado a un objeto en caída libre junto con la idea de que cada sustancia se ve atraída en una medida diferente hacia el suelo según su «naturaleza», sugiere que un objeto con una masa mayor debería caer más rápido que uno más ligero lanzado desde la misma altura y, por tanto, deberían tocar el suelo en momentos diferentes. Y, según el saber popular, esta idea fue precisamente la que Galileo Galilei puso a prueba al lanzar dos balas de cañón de diferente masa desde la torre inclinada de Pisa (que en aquella época debía estar un poco menos inclinada).

*Espera, espera, ¿cómo que «según el saber popular»?*

Es que esta historia aparece narrada por primera vez en la biografía de Galileo que escribió uno de sus alumnos, Vincenzo Viviani, pero Galileo nunca mencionó haber realizado esta prueba en ninguno de sus escritos y, además, aún no había formulado la versión final de sus estudios sobre la caída libre en las fechas en las que Viviani sitúa este experimento.

Lo que Galileo sí había predicho es que dos objetos del mismo material pero de diferente masa que estuvieran precipitándose a través del mismo medio deberían caer a la misma velocidad. Para proponer esta hipótesis se basó en un experimento mental que describe en su libro de 1590, *De motu (Sobre el movimiento)*, en el que imagina dos objetos con una masa muy distinta unidos por una cuerda desplomándose desde las alturas: si los dos objetos realmente cayeran a velocidades distintas, entonces el objeto ligero quedaría atrás, tensando la cuerda y ralentizando la caída del más pesado. Pero, a su vez, este nuevo conjunto tendría una masa mayor que la bola más grande, así que el conjunto debería caer aún más rápido...<sup>3</sup> Algo que no tendría mucho sentido, porque entonces el objeto pequeño estaría cayendo más rápido de lo que su naturaleza le permite.

De la contradicción entre ambos fenómenos, Galileo dedujo que dos objetos hechos del mismo material pero con distinta masa que se precipitan a través del mismo medio no pueden caer a velocidades distintas. A lo largo de su vida, viendo los resultados de los experimentos y que la influencia del rozamiento con el aire no se podía despreciar, Galileo terminó postulando su hipótesis definitiva: en el vacío, independientemente de su masa, forma o densidad, todos los objetos son acelerados hacia el suelo de manera idéntica.



Pero el experimento sí que fue llevado a cabo, en el siglo XVI, por dos científicos neerlandeses, Simon Stevin y Johan de Groot, quienes dejaron caer dos bolas de plomo desde lo alto de la torre de la Nieuwe Kerk de Delft, a una altura de 30 metros, una de ellas diez veces más masiva que la otra. Los resultados del experimento revelaron que la bola más ligera no tardaba diez veces más que la otra en llegar al suelo, sino que ambas aterrizaban al mismo tiempo, por lo que los científicos concluyeron que la teoría de Aristóteles era errónea.

Si estáis interesados en observar el principio de Galileo en acción, os aconsejo que veáis un par de vídeos muy interesantes. En el primero,<sup>4</sup> el comandante David Scott, de la misión Apolo 15, deja caer una pluma y un martillo en la superficie de la Luna, donde no hay atmósfera, y los dos objetos tocan el suelo al mismo tiempo. En el otro vídeo,<sup>5</sup> el físico Brian Cox visita la cámara de vacío más grande del mundo (propiedad de la NASA) y presencia el mismo experimento: en su interior se dejan caer una bola de bolos y una pluma al mismo tiempo... y, de nuevo, ambos objetos llegan al suelo a la vez.

Galileo también añadió a su teoría que la distancia que recorre un objeto al caer es proporcional al cuadrado del tiempo que dicho objeto pasa en el aire. En otras palabras: doblando el tiempo de tu caída llegarás cuatro veces más lejos. El descubrimiento de esta relación entre el tiempo de caída y la distancia recorrida tenía una importancia tremenda, porque era el primer paso para cuantificar en qué medida actúa la gravedad sobre los objetos. Conocer esta relación ayudaría a entender cómo la gravedad afecta al resto del universo... Una tarea en la que Newton contribuiría enormemente.

A Isaac Newton (1643-1727) se le ocurrió la idea de tratar la gravedad como si fuera una fuerza atractiva invisible que aparece instantáneamente entre dos masas, algo que nadie había pensado hasta este momento. Modelando la gravedad con la ayuda del cálculo matemático, una herramienta que él mismo inventó, no sólo pudo cuantificar la magnitud de esta fuerza según la masa de los objetos involucrados y la distancia que los separa, sino que además propuso que el fenómeno que hacía caer las manzanas de los árboles era el mismo que mantenía los planetas en órbita alrededor del Sol. Como dijo el físico y escritor Ernesto Sabato: «Un genio es alguien que descubre que la piedra que cae y la Luna que no cae representan un solo y mismo fenómeno».

Newton había dado en el clavo teórico, haciendo que nuestra comprensión de la gravedad y su efecto sobre el universo acelerara de cero a cien en un momento (en la escala histórica, claro).

*Espera, espera. Pero ¿por qué la teoría de Newton tenía más validez que las ideas de los griegos sobre la gravedad?*

Pues porque las fórmulas con las que Newton modeló el comportamiento de grandes masas permitían predecir con exactitud el movimiento de los planetas por primera vez en la historia... Además de servir para calcular las trayectorias que adoptaban las cosas que la gente lanzaba habitualmente de un lado a otro, aunque esto resulte menos glamuroso.

En 1754, un astrónomo francés llamado Alexis Clairaut tomó por un lado las observaciones del paso del cometa *Halley* que se habían hecho hasta la fecha y, por otro, las ecuaciones de la gravedad de Newton. En colaboración con dos de sus discípulos, madame Lepaute y Joseph Lalande, pudo reconstruir la trayectoria del cometa y calcular cómo interactuaría éste con el campo gravitatorio del resto de los planetas del sistema solar conocidos hasta la fecha (Neptuno aún no había sido descubierto). De esta manera, los astrónomos lograron deducir cuándo volvería a pasar el cometa *Halley* con un margen de error de sólo un mes.

*Bueno, pero es que...*

Ya sé lo que dirás: que este cálculo no tiene ningún mérito porque se sabe que el cometa *Halley* pasa una vez cada 76 años, así que Clairaut y su equipo no necesitaban las ecuaciones de Newton para predecir su llegada.

*Correcto.*

Pues te equivocas, *voz cursiva*, porque resulta que la órbita del cometa *Halley* lo lleva muy lejos, hasta la órbita de Neptuno y, durante su camino alrededor del Sol, el campo gravitatorio de los demás planetas del sistema solar le da pequeños empujones o tirones. El efecto acumulado de estas perturbaciones hace que el cometa *Halley* tarde entre 74 y 79 años en volver a aparecer en nuestro cielo, según la disposición de los planetas durante ese tiempo. O sea, que esos 76 años no son más que una cifra media.

Clairaut y sus colaboradores calcularon que el cometa tardaría 618 días más en aparecer en el cielo que en su último período, admitiendo un margen de error de 27 días. Finalmente, el cometa *Halley* apareció en el cielo terrestre en mayo de 1759, casi un mes después de lo que los astrónomos habían predicho,<sup>6</sup> pero dentro de su margen de error, confirmando que las ecuaciones de Newton describían correctamente el movimiento de los astros. Otras predicciones, como la que permitió descubrir el planeta Neptuno después de que su posición se calculara a

partir de las perturbaciones en la órbita de Urano, terminarían de afianzar la teoría gravitatoria de Newton... O, al menos, hasta que llegó Einstein y dio un giro a estas ideas.

Pero sobre Einstein y la verdadera naturaleza de la gravedad hablaré más adelante. De momento no pasa nada si seguimos mirando la gravedad con los ojos de Newton: como una fuerza invisible que aparece de manera instantánea entre dos objetos y que depende de la masa de dichos objetos y del cuadrado de la distancia que los separa.

## EL PASO DEL TIEMPO

En 1581, Galileo Galilei ingresó en la Universidad de Pisa, donde empezó a estudiar Medicina para terminar convirtiéndose en catedrático de Matemáticas. Según la leyenda, uno de sus mayores descubrimientos se le ocurrió mientras observaba el movimiento del incensario que colgaba del techo de la catedral, que se balanceaba como lo haría cualquier otro peso suspendido en el aire por una cuerda. A Galileo le llamó la atención una peculiaridad muy interesante de ese movimiento: parecía que el incensario siempre invertía la misma cantidad de tiempo en completar cada una de sus oscilaciones, incluso a medida que el arco que describía se iba haciendo más pequeño.<sup>7</sup>

Sus primeras notas sobre este fenómeno datan de 1588, pero no lo empezó a investigar seriamente hasta 1602. Ese año, Galileo detalló su trabajo en una carta que envió a un amigo, el médico veneciano Santorio Santorio, quien utilizó este principio para crear una variación del péndulo que le permitía medir el pulso de sus pacientes y que bautizó con el nombre de *pulsilogium*.

El invento era muy simple: un péndulo que se soltaba desde distintas alturas hasta que su período de oscilación coincidía con el ritmo del latido del corazón del paciente. Por primera vez en la historia,<sup>8</sup> el médico podía seguir la evolución del pulso del paciente apuntando las diferentes alturas desde las que había tenido que soltar el péndulo a lo largo del día.

*¡Qué novedad! ¿No sabes que los chinos inventaron los relojes en el año 725 d.C.? ¡Galileo llegó casi mil años tarde!*

Es cierto que se han utilizado una gran variedad de métodos para medir el tiempo a lo largo de la historia, pero eran bastante imprecisos hasta la llegada de los péndulos. Había quien tomaba como referencia el tiempo que varias velas de distintos tamaños tardaban en apagarse; quien usaba la sombra que proyectaba la manecilla de un reloj solar y

quien metía arena entre dos bulbos de cristal. Incluso la duración del turno de los guardias babilonios estaba determinada por el tiempo que tardaba el agua en vaciarse de un recipiente llamado clepsidra.

Antes de que los péndulos irrumpieran en el mundo de la horología, los aparatos que medían el tiempo de la manera más precisa eran los relojes mecánicos. Su funcionamiento estaba basado en la lenta caída de un peso enrollado alrededor de un eje que movía los engranajes conectados a las manecillas del reloj.

Pero este diseño presentaba algunos problemas. La caída del peso se veía acelerada a lo largo del día, por lo que los segundos se sucedían cada vez más deprisa. Las variaciones de temperatura a lo largo del año, o incluso del día, podían provocar la expansión o contracción térmica de los engranajes, lo que afectaba también al ritmo con el que éstos se movían. Incluso engrasarlos terminaba dando problemas porque el lubricante acababa acumulando polvo y suciedad que, a la larga, ralentizaba el movimiento de los engranajes. Todo esto se traducía en que los relojes mecánicos podían acumular un desfase de hasta 15 minutos diarios, así que cada día había que ajustarlos con la ayuda de un reloj de sol.

Pero tras el descubrimiento de Galileo se empezaron a añadir péndulos a los relojes mecánicos, creando un mecanismo que controlaba el ritmo al que caía el peso y aseguraba que el engranaje tardara siempre el mismo tiempo en girar un paso. Esta idea tan simple aumentó muchísimo la precisión de los relojes, que ahora sólo se desajustaban unos 15 segundos cada día.<sup>9</sup>

Pero ni Galileo ni su hijo Vincenzo fueron los primeros en introducir los péndulos en los relojes. Y aunque Vincenzo dejó un prototipo inacabado, fue el matemático y astrónomo holandés Christiaan Huygens, muy interesado en utilizar la precisión de estos relojes para determinar las distancias longitudinales durante los viajes por mar, quien se llevó el mérito del invento después de construir el primer reloj de péndulo en 1656.

*Pero ¿qué tiene que ver el tiempo con las distancias?*

Pues mucho más de lo que parece, *voz cursiva*.

Un marinero que se encuentra en medio del océano puede conocer su *latitud* (la distancia que le separa del ecuador del planeta) con relativa facilidad, pero su *longitud*, la distancia hacia el este o el oeste respecto al meridiano de Greenwich, es un parámetro más difícil de calcular. Aun así, no se trata de un problema sin solución.

La duración de un día (24 h) equivale al tiempo que tarda un punto cualquiera de la superficie terrestre en completar un giro completo

( $360^\circ$ ) alrededor del eje de rotación del planeta. Por tanto, medir el tiempo también sirve para saber qué ángulo ha girado la Tierra durante un período concreto. A su vez, hay que tener en cuenta que el perímetro del planeta es diferente en función de la latitud a la que nos encontremos, siendo máximo en el ecuador (40.000 km) y reduciéndose con la latitud a medida que nos acercamos a los polos.



Esto significa que puedes calcular qué distancia te has desplazado hacia el este o el oeste por la superficie terrestre si tienes alguna referencia temporal y sabes a qué latitud te encuentras. Por ejemplo, puedes llevar encima dos relojes, uno que marca la hora del lugar desde donde has zarpado y otro que puedas ajustar cada día a la hora local, observando la posición del Sol a medida que avanzas. Debido a la relación que existe entre la rotación de la Tierra y el tiempo transcurrido, sabrás que cada 4 minutos de diferencia entre la hora local y la que marca el reloj que conserva el tiempo de tu lugar de origen equivalen a recorrer un ángulo de  $1^\circ$  sobre la superficie del planeta, lo que en el ecuador equivale a unos 110 kilómetros.

*Ah, bueno, pues así estaba tirado ser marinero en la Antigüedad.*

No creas, *voz cursiva.*

Los marineros podían calcular fácilmente la latitud a la que se encontraban con la ayuda de unas tablas que les indicaban la inclinación del camino del Sol respecto al horizonte cada día del año, así que podían compararla con la que ellos veían para deducir si se encontraban más cerca de alguno de los polos o del ecuador. Si las cosas se torcían también podían fijarse en las estrellas, ya que las constelaciones que se

pueden ver en el cielo van cambiando a medida que nos desplazamos de un polo a otro del planeta.

Pero calcular la longitud, la medición que te indica qué distancia has avanzado hacia el este o el oeste, era mucho más complicado.

Al principio, los marineros trataban de saber más o menos qué distancia habían surcado a juzgar por su velocidad y su rumbo. El sistema dependía mucho de la intuición y huelga decir que era de todo menos exacto, especialmente durante los viajes largos en los que no veían tierra firme durante mucho tiempo.

Establecer un sistema para calcular la longitud con precisión era tan importante que en 1567 Felipe II ya había prometido una recompensa a quien lograra encontrar un método fiable para encontrar la longitud en el mar. A esta iniciativa se sumó en 1598 Felipe III, quien ofreció una recompensa de 6.000 ducados, además de una pensión de 2.000 ducados anuales más 1.000 para gastos. Teniendo en cuenta que en la actualidad el precio del oro ronda los 40 euros por gramo y que cada ducado contenía 3,54 gramos de oro, hoy en día estos premios equivaldrían a alrededor de 850.000, 280.000 y 140.000 euros, respectivamente. Pero hay que pensar que el valor del oro va cambiando con el tiempo, así que, casi con total seguridad, estas cifras no representan el valor real de las recompensas en aquella época.

En cualquier caso, la gente imaginaba que idear un método que permitiera calcular la longitud con precisión se reducía a desarrollar una herramienta que fuera capaz de medir el tiempo de manera bastante exacta.

Galileo aprovechó la oportunidad y en 1616 sugirió un sistema con el que medir la longitud que consistía en observar el movimiento de las lunas de Júpiter que acababa de descubrir, que a través de un telescopio o un catalejo aparecen como cuatro puntos brillantes que se mueven de un lado a otro del planeta, siempre sobre la misma línea (porque vemos sus órbitas de perfil).

El método consistía en utilizar un reloj de péndulo para cronometrar cuánto tarda cada luna en completar su órbita y elaborar una tabla en la que se predijera la hora y el día que se esconderían detrás de Júpiter o saldrían detrás de él, al observarlas desde un lugar determinado. De esta manera, se podría comparar la hora a la que ocurren esos mismos fenómenos en cualquier otra parte del mundo y, por tanto, determinar la diferencia horaria entre los dos lugares, lo que le permitiría calcular la distancia que los separa.

Por desgracia, la monarquía española no hizo mucho caso a Galileo

y, tras dieciséis años intercambiando correspondencia (casi nada), el tema cayó en el olvido.

En 1636 los Países Bajos ofrecieron una recompensa de 10.000 florines a quien pudiera solucionar el mismo problema y Galileo volvió a proponer su idea para ver si esta vez tenía más éxito...<sup>10</sup> Pero, por desgracia, en esta época se encontraba bajo arresto domiciliario y la Inquisición no permitió que la delegación que enviaron los holandeses hablara con él. Galileo murió un par de años más tarde y, de nuevo, su idea fue olvidada.

Por suerte, el astrónomo Giovanni Cassini estaba trabajando en la misma línea que Galileo y, tras dieciséis años observando cuidadosamente el movimiento de las lunas de Júpiter, pudo publicar unas tablas mucho más precisas que las que Galileo había obtenido en 1668. El resultado fue tan bueno que, en 1669, sus tablas se utilizaron para calcular el diámetro de la Tierra con una precisión sin precedentes. Para ello, otro astrónomo llamado Jean Picard observó el movimiento de las lunas de Júpiter con la ayuda de dos péndulos y determinó que el pabellón de Malvoisine y el reloj de la torre de Sourdon están separados por un ángulo de  $1^\circ$  sobre la superficie curvada de la Tierra, realizando de esta manera la primera medición de un meridiano de Francia. Conociendo la distancia que separaba ambos puntos, dedujo que nuestro planeta tiene un diámetro de unos 12.554 kilómetros, una cifra muy cercana a los 12.756 kilómetros de diámetro ecuatorial que conocemos en la actualidad.

El método era tan preciso que se convirtió en el preferido de los exploradores para elaborar mapas de la superficie del planeta cuando se encontraban en tierra firme. Puesto que ahora los cartógrafos contaban con un método realmente fiable con el que determinar las distancias, en esta época se dibujaron los mapas más fieles a la realidad que se habían hecho hasta entonces.

Conociendo este historial de éxitos en tierra firme, no es de extrañar que Huygens estuviera empeñado en desarrollar un reloj de péndulo que se pudiera utilizar en los barcos para medir la longitud... Pero su intento terminó fracasando estrepitosamente: tras realizar varias pruebas en el océano, el resultado más exacto que pudo arrojar su péndulo daba un desajuste de casi  $1^\circ$ . Teniendo en cuenta que ese error puede equivaler a más de 110 kilómetros en zonas cercanas al ecuador, no era un margen de error del que pudieran depender la vida de los marineros y el cargamento de un barco.

El empeño de Huygens estaba destinado a fracasar por culpa del vaivén de las olas que sacuden a los barcos de manera constante. Sus relojes sólo funcionaban correctamente si el mar estaba en calma durante toda

la travesía, algo que, obviamente, no ocurría con demasiada frecuencia. Por tanto, sus péndulos con aspiraciones marineras fueron sucedidos rápidamente por los llamados cronómetros marinos, muchísimo más precisos porque utilizaban muelles cuya descompresión simulaba una «fuerza gravitatoria artificial».

Aun así, Huygens puede estar contento, porque en tierra firme los relojes de péndulo que inventó continuaron siendo los reyes hasta bien entrado el siglo xx, cuando los osciladores electrónicos (cristales de cuarzo que vibran siempre a la misma frecuencia cuando una corriente eléctrica pasa a través de ellos) conquistaron el mercado al reducir tanto el tamaño de los relojes como su coste.

El reloj de péndulo es uno de los inventos que ha tenido un mayor impacto en el curso de la historia de la humanidad. Es posible que la revolución industrial nunca hubiera ocurrido sin estos mecanismos que permitían medir el paso del tiempo con una precisión sin precedentes.

La invención del reloj y la posibilidad de sincronizar a los trabajadores en una cadena de producción permitieron organizar el trabajo de una manera completamente nueva.<sup>11</sup> Ya no se necesitaban individuos que produjeran la máxima cantidad posible de productos al final de una jornada, sino gente que trabajara durante una cantidad de horas fija realizando una única tarea muy simple y a un ritmo de producción determinado.

Este nuevo sistema para medir el tiempo nos volvió más independientes de la naturaleza. Ahora los días estaban organizados siguiendo una plantilla abstracta, independiente de las condiciones climáticas o de la duración variable de los días y las noches a lo largo del año. Lewis Mumford explica muy bien el efecto de los relojes sobre nuestras vidas en su libro *Technics and Civilization*, publicado en 1934:

Cuando uno piensa en el día como un lapso abstracto de tiempo, no se va a la cama con las gallinas en una noche de invierno: inventa mechas, chimeneas, lámparas, luces de gas y lámparas eléctricas para usar todas las horas que pertenecen al día. Cuando uno piensa en el tiempo no como una secuencia de experiencias, sino como una colección de horas, minutos y segundos, las costumbres de añadir tiempo y ahorrar tiempo aparecen. El tiempo asumió el papel de un espacio cerrado: podía ser dividido, podía ser llenado y hasta podía ser expandido con la invención de instrumentos que permiten ahorrar tiempo.

Sin duda, la dirección en la que avanzaba la civilización cambió muchísimo cuando aprendimos a medir el tiempo con precisión. Pero los péndulos tenían preparadas otras sorpresas inesperadas.



## LA FORMA DE LA TIERRA

Oye, *voz cursiva*, ¿sabes que la Tierra no es una esfera?

¿Cómo? ¿En serio? ¿Así que esa gente de internet que defiende que la Tierra es plana tiene razón? ¡Muerte a la conspiración del globo!

No, no, cálmate, que no van por ahí los tiros. Quería decir que la Tierra no es una esfera perfecta.

*Ah, vale, me habías asustado.*

Respira hondo, *voz cursiva*. Deja que te cuente la historia.

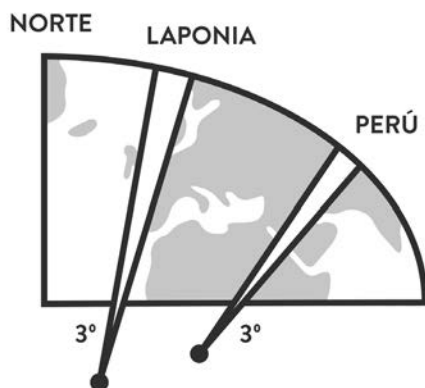
En 1672, el astrónomo francés Jean Richer fue enviado a la ciudad de Cayenne, en la Guyana Francesa, con objeto de realizar observaciones astronómicas. Para ello se había llevado consigo un reloj pendular muy preciso pero, una vez allí, el reloj empezó a retrasarse 2,5 minutos cada día, lo que significaba que, por algún motivo desconocido, el péndulo estaba oscilando más despacio que en París. No obstante, Richer no le dio muchas vueltas al tema: cortó 2,8 milímetros de cuerda y dio el problema por solucionado.

Durante los siguientes años se atribuyó la discrepancia del péndulo a un error en las observaciones de Richer. Pero, tres lustros después de sus experimentos, a Newton se le ocurrió una hipótesis alternativa: como la frecuencia con la que oscila un péndulo sólo depende de la longitud de su cuerda y de la intensidad gravitatoria que actúa sobre él, sugirió que Cayenne se encuentra más lejos del centro de la Tierra que París y que, por tanto, la fuerza gravitatoria que actúa sobre ese lugar es ligeramente menor.

Newton acababa de proponer que la Tierra no era una esfera perfecta, sino un esferoide oblato. Es decir, una esfera achatada. Tampoco era una idea descabellada, teniendo en cuenta que los astrónomos John Flamsteed y Giovanni Cassini ya habían observado que el disco de Júpiter parecía achatado por los polos.

Newton estimó que el diámetro polar de nuestro planeta debía de ser un 0,5 % más corto que el ecuatorial, una cifra que no se aleja tanto del 0,3 % real, medido con herramientas modernas. Para poner a prueba esta hipótesis, la Académie Royale des Sciences patrocinó dos expediciones científicas, una de ellas a Laponia y la otra a Perú o, lo que es lo mismo, lo más cerca posible del polo norte y del ecuador, en 1736-1737 y de 1735 a 1748. Cada expedición tenía como objetivo desplazarse 3° de latitud y medir qué distancia cubría... Una tarea que literalmente consistía en medir el suelo con unas reglas muy largas durante unos 344 kilómetros, en el caso de la expedición de Perú.<sup>12</sup>

Al comparar la distancia que había recorrido cada expedición durante su viaje se descubrió que, en efecto, los miembros de la expedición de Perú (más cerca del ecuador) habían medido una distancia menor que los de Laponia (cerca del polo norte) a lo largo de esos  $3^\circ$ , lo que confirmaba la hipótesis de Newton.<sup>13</sup>



*¿Y por qué la Tierra tiene esta forma, con lo fácil que es ser una esfera y no complicarse la vida?*

Newton también tenía una respuesta a esta pregunta: según él, la Tierra está achatada por los polos porque la rotación del planeta provoca una fuerza centrífuga mayor en la franja ecuatorial.

Esto se debe a que, en una esfera que está rotando, los puntos más cercanos al ecuador se mueven a una mayor velocidad que los que están alrededor de los polos. Es un fenómeno fácil de visualizar si se mira de la siguiente manera.

La Tierra completa una vuelta sobre su propio eje cada 24 horas. Durante ese tiempo, cualquier punto sobre su ecuador habrá recorrido 40.000 kilómetros (el perímetro del planeta en esa zona) alrededor del eje de rotación, lo que le da una velocidad de unos 1.667 km/h, mientras que un punto más cercano a los polos, como puede ser Reikiavik, habrá trazado un círculo más pequeño. Es por eso que la capital islandesa se mueve alrededor del eje de la Tierra a «sólo» 732 km/h. Como la fuerza centrífuga depende de la velocidad de un punto y su distancia al eje de rotación, los puntos más cercanos al ecuador sufren una fuerza centrífuga mayor que los que están cerca de los polos porque se mueven más deprisa y, por tanto, se ven empujados «hacia afuera» en mayor medida. Y ésta, según Newton, era la causa de que la Tierra estuviera achatada por los polos.

Pero, para estar totalmente seguros de que Newton estaba en lo cierto, alguien tendría que demostrar que la Tierra rota sobre su propio eje.

## LA ROTACIÓN DE LA TIERRA

*Pero es que eso resultaba obvio incluso en esa época, ¿no?*

Es cierto que en aquel entonces la gente estaba dejando atrás el geocentrismo y la concepción de que todo gira a nuestro alrededor. La idea no era nueva, ya en la Grecia del siglo V a.C., a los miembros de la escuela pitagórica les resultaba inconcebible que fuera el universo entero el que gira alrededor de la Tierra día tras día (y eso que «su» universo era muchísimo más pequeño que el que conocemos hoy en día). El problema es que, aunque en el siglo XIX todo el mundo asumía que el firmamento se mueve de un lado a otro del horizonte porque la Tierra da vueltas sobre su propio eje, nadie podía demostrar inequívocamente que eso era así... Al menos hasta que a Jean Bernard Léon Foucault observó una propiedad muy curiosa de los péndulos.

Es probable que alguna vez os hayáis encontrado una bola de metal enorme colgando del techo junto a la entrada de algún museo, oscilando lentamente en medio de un círculo delimitado por cilindros de madera o metal. También puede ser que la mitad de los cilindros estuvieran tirados por el suelo cuando llegasteis y que alguien os dijera que el péndulo los había estado tumbando a lo largo del día. Y tal vez os fuisteis a una sección más emocionante del museo tras aburriros de esperar a que el péndulo noqueara alguno de esos cilindros.

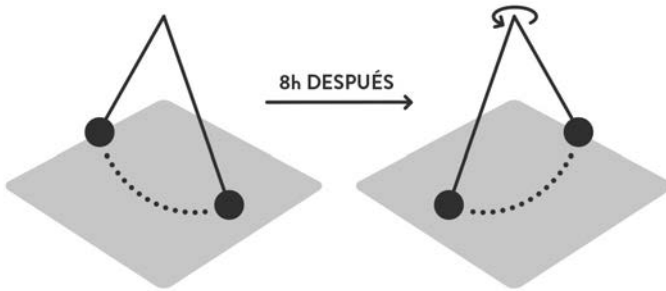
Pues resulta que ese mismo montaje es el que utilizó Foucault en 1851 para demostrar por primera vez que, en efecto, la Tierra rota. Aunque, bueno, su cuerda medía 67 metros de altura y estaba colgada del Panteón de París.

*Ya me explicarás tú cómo vas a demostrar que el planeta da vueltas con una piedra atada a un cordel.*

Pues, en efecto, te lo voy a explicar, *voz cursiva*.

Los péndulos siempre oscilan en el mismo plano: si de la cuerda colgara un lápiz en vez de una bola, pintaría el suelo una y otra vez sobre la misma línea recta. Esto significa que si se nos ocurriera rotar el suelo, el péndulo y la estructura que lo sujeta, entonces el plano en el que oscila el péndulo giraría al unísono y, por tanto, seguiría dibujando la misma línea en el suelo durante el proceso.

Pero Foucault tuvo la ingeniosa idea de unir el péndulo a la estructura mediante una junta universal, una articulación que permite al péndulo oscilar libremente en cualquier dirección. Y descubrió que al soltar este péndulo, que siempre debería oscilar en el mismo plano y, por tanto, sobre la misma línea en el suelo, el camino que trazaba sobre la superficie iba rotando a lo largo del día: al cabo de ocho horas, el plano en el que el péndulo oscilaba había girado  $90^\circ$ , a las 16 horas parecía girar en sentido contrario y, pasadas 32 horas, el péndulo volvía a oscilar en la dirección inicial.



*Pero si los péndulos siempre oscilan sobre el mismo plano, ¿qué podía estar pasando?*

Gracias por canalizar la narrativa de una manera tan oportuna, *voz cursiva*.

El hecho de que el péndulo se pudiera mover libremente respecto a la estructura que lo mantenía sujeto y, por tanto, respecto al resto del planeta, significaba que en realidad el plano de oscilación del péndulo estaba quieto mientras la Tierra rotaba por debajo de él. Por raro que suene, nos encontramos ante un sistema de referencia que es completamente independiente al movimiento de la Tierra.

*Sí, es estupendo, claro. Pero si la Tierra rota una vez cada 24 horas sobre su propio eje, ¿por qué entonces el péndulo de Foucault tardaba 38 horas en completar una vuelta? ¿No desmonta eso un poco esta teoría?*

Muy buena observación, *voz cursiva*. El plano de oscilación de un péndulo de Foucault tan sólo rota al mismo ritmo que la Tierra si lo colocas sobre uno de sus polos geográficos, ya que son los únicos lugares del planeta donde la rotación está centrada sobre el mismo eje en el que está montado el péndulo. La rotación del plano de oscilación va ralentizándose a medida que acercamos el péndulo al ecuador y, por tanto, tarda cada vez más en realizar una vuelta completa. Si colocas el péndulo so-

bre el propio ecuador, el plano de oscilación del péndulo ni siquiera cambiará con el tiempo.

Hay péndulos de Foucault repartidos por todo el mundo<sup>14</sup> y su comportamiento encaja con una regla muy sencilla: el plano de rotación del péndulo tarda 24 horas en completar una rotación sobre los polos del planeta y este tiempo se va prolongando a medida que nos acercamos al ecuador.

De todos los péndulos de Foucault que hay en el planeta, quizá el más extremo sea el que en 2005 se construyó temporalmente en la base Amudsen-Scott, en la Antártida, que estaba a tan sólo 100 metros del polo sur geográfico (no he encontrado datos más actuales, pero la estación se halla sobre un glaciar en movimiento que se aleja unos 10 metros cada año del polo sur) y a 3.400 metros de altitud.

El péndulo se montó en el interior de la estructura cilíndrica y estaba formado por un contrapeso de 25 kilos y un cable de 33 metros de longitud. Como la estructura metálica no tenía sistema de regulación de temperatura, los operarios que montaron el experimento tuvieron que hacerlo nada menos que a  $-67^{\circ}\text{C}$ . El trabajo no fue fácil, como explican en la página web de la South Pole Station:<sup>15</sup>

Hace un frío apestoso en el Polo Sur y el aire es muy poco denso. Después de subir cinco pisos a 3.400 metros de altura tuvimos que parar y descansar, pero mientras descansábamos el frío nos empapó y tuvimos que bajar de nuevo y calentarnos. Para nuestro segundo intento subimos las escaleras más despacio y descansamos durante menos tiempo y pudimos empezar la construcción del péndulo. Tras subir y bajar varias veces los cinco pisos, el cable del péndulo estaba finalmente suspendido y el resto de la construcción podía llevarse a cabo a nivel del suelo. Aun así teníamos que entrar a calentarnos aproximadamente cada 10 minutos. De media, se tarda seis veces más tiempo en hacer las cosas en el Polo Sur que en cualquier otro lugar del mundo.

Pero al menos el esfuerzo les sirvió para comprobar que, como predicen las leyes de la física, el plano en el que oscilaba este péndulo tardaba 24 horas en completar una rotación de  $360^{\circ}$ .

La rotación del plano de un péndulo de Foucault sólo se puede explicar si la Tierra está rotando bajo él porque, si la Tierra estuviera en el centro del universo y fuera el cielo el que diera vueltas a nuestro alrededor, la dirección del plano de oscilación del péndulo no cambiaría en absoluto. Por supuesto, en el siglo XIX todo el mundo daba por sentado que la Tierra rotaba y daba vueltas alrededor del Sol, pero siempre es

de agradecer tener nuevas pruebas experimentales que confirmen una hipótesis.

En cualquier caso, con el cambio de siglo, los seres humanos pasamos de usar la gravedad para medir el tiempo y comprobar que la Tierra rota a utilizarla para poner objetos en órbita alrededor del planeta.

## ESCAPAR DE LAS GARRAS DEL PLANETA

Poner un satélite en órbita alrededor de la Tierra no es una tarea tan fácil como puede parecer. En primer lugar, se debe colocar a una altura mínima (muy mínima) de 160 kilómetros porque, por debajo de este límite, la fricción con la poca atmósfera que lo rodea hará que pierda velocidad y, por tanto, altura muy rápidamente. La atmósfera sigue siendo una molestia para los satélites a alturas superiores, pero la magnitud de la fuerza de fricción que genera es suficientemente baja como para que su efecto se pueda contrarrestar con «empujones» ocasionales. Por ejemplo, a una altura media de 400 kilómetros, la Estación Espacial Internacional (EEI) tiene que encender sus propulsores de vez en cuando para compensar la pérdida de velocidad por el rozamiento con la atmósfera.

O sea que, en realidad, en un momento dado la EEI puede encontrarse a entre 370 y 460 kilómetros de altura, dependiendo de cuánto tiempo haya pasado desde la última vez que ajustara su órbita.

La frecuencia con la que se deben realizar estos ajustes varía bastante, ya que la atmósfera no es estática y las condiciones con las que un satélite en órbita baja se va encontrando a su paso van cambiando, pero en el gráfico que registra la altura de la EEI en el período 08/2015-08/2016<sup>16</sup> se puede ver que las correcciones orbitales sustanciales que se han producido durante el último año tienen una frecuencia entre mensual y trimestral, con pequeños impulsos intermedios.

Pero colocar un satélite a la altura adecuada para que pueda empezar a dar vueltas alrededor de la Tierra no es tarea fácil. ¿Os imagináis cuánto cuesta levantar 140 toneladas de material hasta una altura de entre 160 y 2.000 kilómetros? Para que os hagáis una idea, eso es precisamente lo que era capaz de hacer el *Saturno V*, el cohete que no sólo ostenta el récord de mayor carga llevada a órbita baja terrestre sino que, además, permitió que la humanidad pusiera un pie en la Luna.<sup>17</sup>

Y la razón de que cueste subir cosas de una altura a otra es la energía potencial gravitatoria.

Todo objeto que se encuentre bajo la influencia de un campo gravitatorio tiene cierta energía potencial que dependerá de su masa y de la altura a la que se encuentre: cuanto más lejos esté de la superficie, mayor será su energía potencial gravitatoria. Por tanto, para subir un cuerpo hasta una altura determinada habrá que invertir tanta energía como sea necesaria para que dicho cuerpo adopte la energía potencial gravitatoria del punto de destino.

*¿Y cómo se nota ese aumento de energía potencial? ¿Voy a tener más vitalidad en la cima de una montaña? ¿Aumenta mi temperatura?*

No vas a notar nada en absoluto porque la energía potencial no es una magnitud perceptible. Puedes detectar la energía cinética de una pelota de fútbol que se estrella contra tu cara o la energía térmica del viento que sopla un día de verano en el que la temperatura es de 40 °C a la sombra, pero nuestros cuerpos no tienen manera de sentir la energía potencial gravitatoria porque lo único que representa esta magnitud es la cantidad de trabajo que hay que invertir para elevar un objeto desde una altura concreta hasta otra mayor.

Si, por ejemplo, estamos escalando el monte Everest, la única manifestación de la energía potencial gravitatoria que notaremos durante el camino será el esfuerzo que realizaremos al tener que arrastrar nuestros masivos cuerpos hasta la cima. Durante el proceso, convertiremos la energía química de nuestros músculos en energía cinética («de movimiento»), que a su vez se convertirá en energía potencial gravitatoria a medida que ascendamos. Pero, una vez alcanzada la cumbre, no «notaremos» nada diferente por encontrarnos en un lugar donde nuestro cuerpo tiene una energía potencial gravitatoria mayor... A menos que nos arrojemos al vacío, claro. En ese momento, toda la energía potencial que posea nuestro cuerpo se empezará a convertir en energía cinética a medida que descendamos hacia el suelo.

Este fenómeno tiene un efecto curioso, porque implica que la energía invertida en levantar un objeto se puede «guardar» en forma de energía potencial gravitatoria. Por ejemplo, al recoger una pelota del suelo y dejarla sobre una estantería, nuestros músculos convierten la energía química de la glucosa en movimiento, es decir en energía cinética. Una vez colocada en su posición, la energía cinética invertida permanecerá contenida en forma de energía potencial gravitatoria en la masa de la pelota hasta que ésta vuelva a caer, convirtiéndose de nuevo en energía cinética.

*Entonces... ¿se pueden subir cosas de un lado a otro y generar energía al dejarlas caer?*

Buena pregunta, *voz cursiva*. No podemos generar energía a partir de la caída de objetos que hayamos levantado nosotros mismos porque, incluso aunque contáramos con un sistema que no perdiera energía por el camino, tan sólo estaríamos recuperando la energía invertida. Como imaginarás, sería mucho más práctico aprovechar la energía de la que disponemos en vez de complicarnos la vida levantando otros objetos y dejándolos caer para luego recuperarla.

Pero la situación cambia si, en vez de levantar en objeto con nuestras propias manos, esperamos a que otra persona (o fenómeno) lo haga por nosotros y luego lo dejamos caer para recuperar la energía que esa persona (o cosa) ha invertido en levantarlo. De esta manera, como nosotros no habremos realizado ningún esfuerzo, podremos beneficiarnos del trabajo ajeno para generar energía... Y, de hecho, así es como generan energía las presas hidroeléctricas.

En cierta manera, una presa es como una batería gigantesca: el agua que retiene acumula una cantidad tremenda de energía potencial gravitatoria, que se extrae cuando se deja caer el líquido a través de unas turbinas que aprovechan su energía cinética para generar electricidad. Y lo mejor es que nosotros no tenemos que «recargar» esta batería manualmente, porque es el Sol el que se encarga de evaporar el agua y devolverla al río que llena de nuevo el embalse. O sea que, en este caso, generar energía a partir de la caída de un objeto sí que nos sale rentable desde el punto de vista energético porque es el Sol (y no nosotros mismos) quien se encarga de levantar el agua hasta la altura adecuada.

*Cuidado, que estás empezando a irte por las ramas. Estabas hablando de órbitas.*

Ay, sí, perdona, *voz cursiva*. La cuestión es que para que un objeto ascienda hasta una altura a la que pueda entrar en órbita necesitará obtener la energía suficiente como para igualar la energía potencial gravitatoria que le corresponderá a la altura de su punto de destino. Y esa energía la obtendrá en forma de energía cinética, una magnitud que aumenta muy rápido a medida que el objeto gana velocidad. Es por eso que los satélites se mandan al espacio a bordo de cohetes que van muy rápido.

La mayoría de los satélites que están en órbita alrededor de nuestro planeta se encuentran en órbita baja terrestre (a una distancia de entre 160 y 2.000 kilómetros de la superficie). Con tal de conseguir la energía cinética suficiente para alcanzar esa altura, un objeto se tendría que lanzar al espacio a una velocidad que ronda entre 6,9 y 7,8 km/s... Si la Tierra no tuviera atmósfera, claro. En realidad, como ese molesto aire fre-



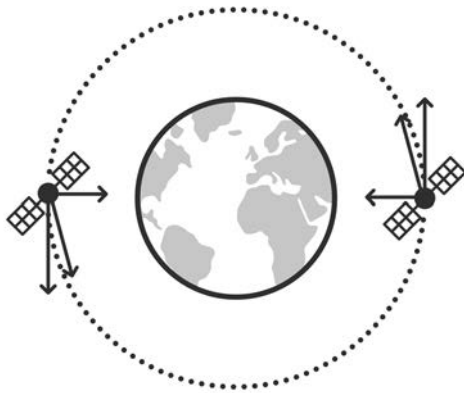
na un poco los cohetes durante su ascenso, éstos tienen que despegar a una velocidad de entre 9,3 y 10 km/s para que los satélites que llevan encima lleguen a su destino a la velocidad adecuada.

Tras ascender en vertical durante los primeros kilómetros, una maniobra que tiene como objetivo atravesar la parte más densa de la atmósfera en el menor tiempo posible, la nave empieza a adoptar una trayectoria cada vez más horizontal hasta que alcanza los 170 kilómetros de altura. En el momento en que la nave haya adoptado una trayectoria en la que la gravedad tire de ella de manera perpendicular a la dirección en la que se mueve, tan sólo necesitará conservar su velocidad para que el propio campo gravitatorio de la Tierra la mantenga en órbita.

*¿Cómo que la gravedad la mantiene en órbita? ¡Pero si hace que caiga hacia la superficie!*

Precisamente por eso, *voz cursiva*: una nave se puede mantener en órbita alrededor de un planeta cuando tiene la velocidad suficiente para alejarse de su superficie al mismo ritmo que la gravedad la acerca hacia ella. De lo contrario, la nave terminaría alejándose hacia el espacio o cayendo de nuevo a la superficie.

Como resultado, al alejarse de un planeta al mismo ritmo que la gravedad lo acerca a él, un satélite termina dando vueltas alrededor del planeta manteniéndose siempre a la misma distancia de la superficie. Es decir, trazando un círculo.



*¿Seguro? ¿No estás diciendo alguna media verdad por aquí?*

Bueno, vale, en realidad las órbitas tanto de los satélites artificiales como de cualquier otro cuerpo celeste son elípticas (círculos estirados), en mayor o menor medida. En el caso de la EEI, sólo hay 5 kilómetros de diferencia entre su punto más cercano a la superficie terrestre y el

más alejado<sup>18</sup> pero, en cambio, la distancia de la Luna al centro de la Tierra oscila entre los 356.000 y los 406.000 kilómetros. Como resultado, nuestro satélite parece tener en su punto más alejado un diámetro un 12 % menor que cuando se encuentra en la posición más cercana de su órbita.

Sea como sea, los satélites están cayendo todo el rato hacia la Tierra, pero lo hacen al mismo ritmo al que la curvatura del planeta se aleja de ellos. Visto de esta manera, poner objetos en órbita es la ciencia de hacer que las cosas caigan permanentemente sin llegar a tocar el suelo.

*Si, vale, estupendo. Pero ¿qué pasaría entonces si, en vez de adoptar una trayectoria paralela a la superficie del planeta para quedar en órbita, la nave se siguiera alejando en línea recta?*

Buena pregunta, *voz cursiva*. La intensidad con la que la gravedad de la Tierra tira de un objeto depende de la distancia a la que éste se encuentre de ella. La intensidad gravitatoria es máxima sobre su superficie, donde las cosas se ven aceleradas hacia el núcleo del planeta a un ritmo de 9,81 m/s cada segundo ( $m/s^2$ ), pero va disminuyendo de manera inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a medida que nos alejamos de ella.

*¿Inversamente qué...?*

Nada, *voz cursiva*, simplemente significa que la intensidad de la gravedad se debilita con la distancia de manera que, si doblas la distancia que hay entre tu cuerpo y el centro del planeta, notarás un tirón gravitatorio cuatro veces menor, en vez de la mitad. Por ejemplo, la Tierra frena el movimiento de una nave que acaba de despegar a un ritmo de 9,81 m/s cada segundo mientras se encuentra cerca de la superficie. Pero esa cifra se desploma muy rápidamente: cuando la nave ha doblado su distancia respecto al centro de la Tierra, a unos 6.371 kilómetros de altura, la deceleración habrá bajado hasta los 2,45  $m/s^2$ . A 19.113 kilómetros, cuando la distancia entre la nave y el centro del planeta se haya cuadruplicado desde el despegue, la intensidad de la fuerza gravitatoria habrá descendido hasta los 0,61  $m/s^2$ .

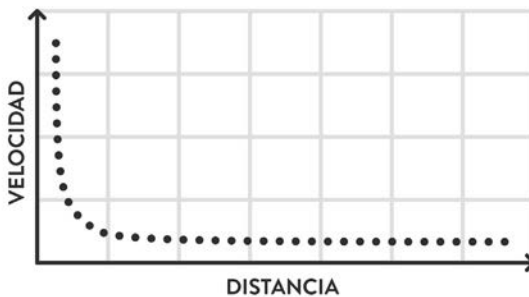
*Bueno, pero tiene que llegar algún punto en el que la nave se haya alejado lo suficiente de la Tierra como para que ésta deje de frenarla y pueda escapar de su campo gravitatorio... ¿no?*

Sí, de hecho, esto ocurre en el infinito. No es broma: el campo gravitatorio de un objeto se sigue debilitando con la distancia de manera indefinida así que, por muy lejos que te encuentres de él, éste siempre ejercerá sobre ti una atracción gravitatoria minúscula. Por supuesto, a efectos prácticos la magnitud es imperceptible si te alejas lo suficiente,

pero de este planteamiento surge el concepto de «velocidad de escape» que, en el fondo, no es más que la velocidad a la que debe alejarse un objeto de otro para que la gravedad de este último no lo haya frenado por completo cuando llegue al infinito. Dicho de otra manera: para escapar del dominio gravitatorio de un planeta, una nave debe obtener una velocidad que le proporcione una energía cinética mayor que su energía potencial gravitatoria en el infinito.

Por tanto, si tu nave no alcanza la velocidad de escape, la gravedad la detendrá por completo en algún punto entre la plataforma de despegue y el infinito y, a partir de ese momento, será arrastrada de nuevo hacia su punto de partida. De hecho, como la energía potencial se va convirtiendo en cinética durante la caída de un objeto, aumentando cada vez más su velocidad, la velocidad a la que una nave se estrellaría contra la superficie del planeta de origen sería más próxima a la velocidad de escape cuanto más lejos hubiera conseguido llegar antes de que la gravedad la hubiera hecho dar media vuelta.

En el caso que nos ocupa, una nave tiene que despegar desde la superficie a unos 11,2 km/s para escapar de las garras gravitatorias de la Tierra. A partir de entonces, suponiendo que se alejara de nuestro planeta en línea recta a esa velocidad y que no recibiera ningún impulso adicional durante el camino, su velocidad iría disminuyendo con la distancia según este perfil aproximado:



Como se puede ver en la gráfica, el planeta le resta velocidad a la nave a un ritmo muy acelerado cuando aún está cerca de la superficie pero, como la intensidad de la gravedad se reduce con el cuadrado de la distancia, la pérdida de velocidad se vuelve minúscula en cuanto nuestro vehículo se ha alejado unas pocas decenas de miles de kilómetros.

Eso sí, hay que tener en cuenta que no hace falta acelerar un satélite hasta la velocidad de escape para ponerlo en órbita alrededor de la Tie-

rra, porque en estos casos el interés reside precisamente en que permanezca dentro de su dominio gravitatorio. Las únicas misiones que necesitan superar la velocidad de escape son las que deben recorrer millones de kilómetros para llegar a otros planetas del sistema solar.

La velocidad de despegue necesaria para salir del dominio gravitatorio de un planeta depende de su tamaño y su masa. Por poner otros ejemplos dentro de nuestro sistema solar,<sup>19</sup> a Venus le corresponde una velocidad de escape de 10,3 km/s (posiblemente mucho mayor, si tenemos en cuenta su densa atmósfera). Con la mitad del diámetro de la Tierra, hay que desplazarse a unos 5 km/s para escapar de las garras gravitatorias de Marte y a sólo 2,4 km/s en el caso de nuestra Luna, que tiene un diámetro ocho veces menor que el de nuestro planeta. Con 56,9 km/s, Júpiter tiene la velocidad de escape más alta de entre los planetas... Aunque no tiene ni punto de comparación con los 617,5 km/s necesarios para librarse del dominio gravitatorio del Sol.

*Entonces, ¿necesitamos lanzar cohetes a más de 600 km/s para que salgan del sistema solar?*

No, no, ésa es la velocidad que tendríamos que alcanzar para escapar del sistema solar si despegáramos desde la superficie de nuestra estrella. Pero, como la Tierra se encuentra a 150 millones de kilómetros del Sol, tenemos cubierta gran parte de la energía potencial gravitatoria necesaria para escapar del sistema solar por el mero hecho de encontrarnos donde estamos. Desde nuestro planeta, «sólo» necesitamos despegar a 42,1 km/s para salir del sistema solar.

*¿Y si quisiéramos escapar del dominio gravitatorio de una estructura aún más grande? De nuestra galaxia, por decir algo.*

Desde nuestra posición, a unos 26.000 años luz del centro de nuestra galaxia, tendríamos que desplazarnos a unos 544 km/s para poder escapar al espacio intergaláctico.<sup>20</sup> Esta velocidad es más de diez veces superior a la de cualquier nave que hemos lanzado nunca al espacio así que, de momento, es un logro que queda lejos de nuestro alcance.

No sé si la humanidad llegará a salir algún día de la Vía Láctea para colonizar alguna de las galaxias cercanas, pero es bastante posible que nunca podamos aspirar a expandirnos más allá del Grupo Local, el conjunto de unas 54 galaxias al que la Vía Láctea está unido gravitacionalmente y que ocupa una región del espacio que tiene un diámetro de 10 millones de años luz.

*¿Y eso por qué?*

Pues porque resulta que, tras el Big Bang, quedaron regiones del espacio más densamente cargadas de materia que otras. En estas regio-

nes especialmente activas se formaron grupos de galaxias, como nuestro Grupo Local, que por su proximidad comparten un centro de gravedad común.

Pero resulta que el universo se está expandiendo cada vez más deprisa y la distancia que nos separa del resto de cúmulos de galaxias está aumentando a un ritmo cada vez mayor. Por tanto, todas las galaxias que se encuentran más allá del Grupo Local se irán alejando cada vez más deprisa, hasta que llegue el día en el que ni siquiera su luz sea capaz de alcanzarnos y desaparecerán de nuestra vista. Actualmente, el grupo de galaxias más cercano, el grupo Maffei, se está alejando de nuestro Grupo Local a 260 km/s,<sup>21</sup> una velocidad muy superior a la que cualquiera de nuestras naves es capaz de alcanzar con la tecnología actual. Con el tiempo, esta velocidad irá aumentando hasta que llegue el día en el que ninguna tecnología de la que dispongamos nos permitirá acercarnos al resto de los grupos de galaxias a un ritmo mayor al que se alejan de nosotros... Y nos quedaremos aislados en nuestra gigantesca y a la vez diminuta burbuja para siempre, incapaces de explorar el resto del universo.

Pero, bueno, ése es un problema para los humanos del futuro: a nuestra generación le ha tocado descubrir cómo viajar a otros planetas.

## VISITAR OTROS MUNDOS

*¿Y cómo se supone que puedo llegar a otro planeta? ¿Me meto en la nave, supero la velocidad de escape de la Tierra y sigo todo recto, al fondo a la derecha?*

La trayectoria necesaria para realizar un viaje interplanetario es un poco más complicada de lo que crees, *voz cursiva*. Como hemos visto, hace falta un montón de energía para levantar toda la masa de un vehículo hasta el espacio y, por tanto, un montón de combustible. Pero hay un problema: ese combustible también tiene masa, así que una nave cargada con una cantidad determinada de combustible necesita aún más combustible para levantar ese combustible del suelo. A su vez, ese combustible extra tamb...

*Sí, sí, lo he entendido.*

Gracias por rescatarme del bucle, *voz cursiva*. Por suerte, el bucle no continúa hasta el infinito porque el combustible se va gastando durante el ascenso y, además, los cohetes dejan caer los módulos de combustible a medida que los gastan para aligerar peso. Pero, incluso así, el combustible termina representando el 90 % de la masa de una misión espacial,

el 6 % es la estructura necesaria para transportarlo y sólo el 4 % corresponde al satélite que estamos mandando al espacio.<sup>22</sup>

A su vez, éste es el motivo por el que la nave que pretendemos enviar a otro planeta, ese 4 % de la masa restante, podrá llevar encima una cantidad de combustible muy limitada, de manera que su capacidad para maniobrar por el sistema solar usando sus propios medios de propulsión será... Bueno, también muy limitada. Por esta razón en el espacio se procura sacar el máximo rendimiento posible al combustible que la nave transporta, utilizando la mínima cantidad posible para cubrir la mayor distancia que se pueda. Pero, para hacerlo, hay que tener en cuenta la dificultad añadida de que, según la trayectoria que lleve la nave, el Sol y los planetas pueden frenarla a lo largo de su camino.

Por suerte, hay trucos que nos permiten ahorrar algo de combustible. Por ejemplo, podemos conseguir que la Tierra le dé un pequeño empujón a nuestra nave si despegamos en la dirección adecuada.

*Pero ¿qué empujón nos va a dar la Tierra, si el suelo está quieto? ¿Te has vuelto loco?*

Bueno, en realidad, nos parece que el suelo está quieto porque nosotros nos movemos a la misma velocidad y en la misma dirección que él, pero hay que tener en cuenta que nuestro planeta y, por tanto, todo lo que se encuentra sobre su superficie, se mueve a través del sistema solar.

Por un lado, como ya he comentado, la rotación de la Tierra hace que las zonas cercanas al ecuador se muevan más deprisa que las regiones polares. Por este motivo, las misiones espaciales se suelen lanzar desde plataformas cercanas al ecuador, la región donde la superficie les da un empujón más sustancial... Siempre y cuando despeguen en la dirección adecuada, claro.

Como un vehículo lanzado desde el ecuador se estará moviendo a unos 460 m/s en dirección este por el mero hecho de encontrarse sobre la superficie de la Tierra, «sólo» necesitará combustible para acelerar otros 10,73 km/s adicionales hasta alcanzar la velocidad de escape de 11,2 km/s si despega en esa misma dirección. Un cohete lanzado hacia el oeste, en cambio, no sólo tendrá que alcanzar la velocidad de escape necesaria para huir del planeta, sino que además necesitará acelerar un poco más para compensar el movimiento en dirección contraria que le imprimirá la rotación del planeta. Por tanto, una nave que despegue hacia el oeste necesitará combustible para acelerar hasta los 11,66 km/s.

Estos pequeños empujones ayudan, pero podemos ahorrar aún más combustible si utilizamos la gravedad a nuestro favor, en vez de luchar absurdamente contra ella.