LAS 4 FUERZAS QUE RIGEN EL UNIVERSO



JORDI PEREYRA

AUTOR DE «EL UNIVERSO EN UNA TAZA DE CAFÉ»

PAIDÓS

Índice

Portada
Prólogo
Primera parte. LA GRAVEDAD
Segunda parte. EL ELECTROMAGNETISMO
Tercera parte. LAS FUERZAS NUCLEARES
Cuarte parte. HACIA UNA TEORÍA DEL TODO
Más bibliografía de interés
Notas
Créditos

Gracias por adquirir este eBook

Visita **Planetadelibros.com** y descubre una
nueva forma de disfrutar de la lectura

¡Regístrate y accede a contenidos exclusivos!

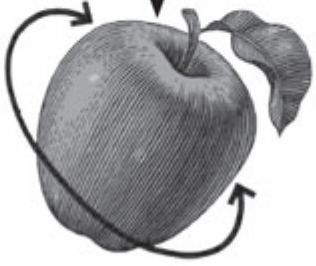
Primeros capítulos
Fragmentos de próximas publicaciones
Clubs de lectura con los autores
Concursos, sorteos y promociones
Participa en presentaciones de libros

PlanetadeLibros

Comparte tu opinión en la ficha del libro
y en nuestras redes sociales:

Explora **Descubre** **Comparte**

PRÓLOGO



El mundo será un poco distinto cuando acabes de leer este prólogo. No mucho, por supuesto, ni siquiera te vas a dar cuenta, pero a tu alrededor habrán ocurrido una cantidad inimaginable de cosas que habrán cambiado un poco el aspecto de nuestro planeta.

Millones de toneladas de agua se habrán evaporado a través de los 361.000.000 km^2 de superficie oceánica, quedando suspendidas en el aire en forma de nubes. La erosión provocada por los ríos, el viento y las mareas moverá una cantidad aún más vertiginosa de material de un lado a otro y algunos volcanes añadirán nuevas rocas a la superficie en forma de lava. En el núcleo del Sol, miles de millones de toneladas de hidrógeno se habrán convertido en helio, proporcionándole a nuestra estrella la energía que necesita para brillar y permitir que, en la cara iluminada de la Tierra, los árboles y las plantas hayan crecido un poco más utilizando la fotosíntesis para fijar en su estructura el carbono contenido en la atmósfera.

Y no sólo tus alrededores: tu propio cuerpo habrá cambiado. Los microorganismos que viven en tu sistema digestivo te ayudarán a descomponer parte de lo que has comido, tu corazón habrá estado llevando oxígeno y nutrientes a tus células a través del torrente sanguíneo y muchas de ellas habrán terminado de reproducirse mientras lees estas líneas, creando tejidos nuevos. Más aún: estos mismos procesos habrán ocurrido en el interior de cada uno de los 7.000 millones de habitantes del planeta, además de en los otros seres vivos que...

¡Vale, vale, lo he captado! ¡Ve al grano, por favor te lo pido!

Perdona, *voz cursiva*, la emoción me había hecho entrar en bucle. Menos mal que estás aquí para llevarme por el buen camino.

Lo que quería decir es que todos esos fenómenos que ocurren a nuestro alrededor cada día y que cambian poco a poco el mundo en el que vivimos tienen una causa. Ya sé que es algo muy obvio pero, desde que los seres humanos empezamos a razonar, nuestra visión

del universo ha estado condicionada por esta idea de que «las cosas no ocurren porque sí». Y no estoy hablando del concepto del destino, ni nada por el estilo, sino sobre por qué los fenómenos naturales se producen de la manera en la que lo hacen.

Es por eso que llevamos miles de años intentando averiguar cuáles son esas causas, no sólo por el placer de entender mejor el mundo en el que vivimos, sino también por necesidad. Aunque nuestro *modus operandi* ha cambiado mucho con el tiempo.

Nuestra percepción del mundo ha estado limitada por nuestros sentidos durante la mayor parte de la historia. De hecho, no empezaríamos a darnos cuenta de la cantidad de información que nuestros cerebros se pierden hasta que, en el año 1800, William Herschel descubrió la luz infrarroja, invisible a nuestros ojos, al descomponer un haz luminoso a través de un prisma.

Al no contar con herramientas que les proporcionaran más información sobre el mundo de la que sus limitados sentidos les suministraban, nuestros antepasados reaccionaron ante los misterios que les rodeaban atribuyéndoles causas sobrenaturales: había quien defendía la existencia de un único ente omnipotente que controlaba todo lo que ocurre en el planeta o quien postulaba que toda la complejidad que nos rodea era obra de varias divinidades distintas. En cualquiera de las dos interpretaciones, al final el viento soplaba y el agua caía del cielo cuando a algún tipo de inteligencia superior le venía en gana.

Esta interpretación no sólo nos daba una explicación satisfactoria de lo que ocurre a nuestro alrededor a partir de los pocos datos de los que disponíamos, sino que además nos ofrecía cierto consuelo al crearnos la ilusión de que podíamos negociar con estas entidades que controlan el mundo para que nos proporcionaran cosechas abundantes o procuraran mantener las enfermedades al margen, por ejemplo. No imaginábamos que todo ese tiempo invertido implorando al cielo o sacrificando otros seres vivos les importaba bien poco a los mecanismos que rigen los procesos naturales.

Por suerte, esta tendencia empezó a cambiar en el siglo VII a.C., cuando el filósofo griego Tales de Mileto sugirió que, a lo mejor, los fenómenos que nos rodean tenían un origen natural y que podríamos encontrar sus causas si prestábamos suficiente atención a nuestro entorno, en vez de utilizar la excusa de lo sobrenatural para responder a cualquier pregunta que se nos ocurriera. Vale, algunas de sus ideas no fueron especialmente acertadas (incluso sus contemporáneos criticaban su teoría de que «la Tierra es plana y flota sobre un océano como lo hace un tronco de madera») pero, sin duda, sus intenciones eran de lo más nobles.

Y, así, los griegos empezaron a echar mano de una gran variedad de hipótesis (algunas más descabelladas que otras) para intentar explicar el mundo en el que vivían... O incluso el origen del mismo.

Por ejemplo, a un pensador llamado Anaximandro se le ocurrió la idea del *apeiron*, una especie de fuente de la que brotaban continuamente los opuestos (como el calor y el frío o la luz y la oscuridad), que se introducían en el mundo mientras la materia vieja era destruida por él. No se sabe muy bien cómo Anaximandro imaginó esta fuente de material. Algunas interpretaciones de los escritos posteriores que hablan sobre este concepto incluyen «una reserva sin límites desde la cual los residuos de la existencia se hacen buenos continuamente», «una masa inmensa e inagotable que se extiende eternamente en todas las direcciones» o «una masa enorme que rodea el mundo entero».[1]

Los pitagóricos (no se sabe si también el propio Pitágoras, porque encontrar referencias fiables sobre la vida de un tipo que vivió hace dos mil años es una tarea más difícil de lo que parece)[2] estaban obsesionados con las matemáticas y creían que a través de ellas podían explicar todo lo que ocurre en el mundo. En palabras del propio Aristóteles:[3]

> Los llamados pitagóricos, que fueron los primeros en abordar las matemáticas, no sólo lograron avances en este campo, sino que se saturaron con él, defendiendo que los principios de las matemáticas eran los principios

de todas las cosas.

A este planteamiento no le falta razón: se pueden utilizar las matemáticas para describir en qué medida afectan a un fenómeno las diferentes variables de las que depende. Así que, sí, el universo está gobernado por las matemáticas en el sentido de que existe una proporcionalidad entre todo lo que ocurre en él (o, lo que es lo mismo, que no vas a tumbar un muro de hormigón de un estornudo). Sin embargo, la filosofía pitagórica incluía numerosos elementos abstractos,[4] como la relación que se le asignaba a ciertos números con conceptos del mundo real (por ejemplo, el 4 representaba la justicia; el 5, el matrimonio, etc.). Y, en ese sentido, esta interpretación metafísica no se corresponde con la realidad.

Otro asunto que intrigaba a los filósofos de todo el mundo era la composición de la materia. Ya fuera por las mutuas influencias que ejercían unas sobre otras o fruto de sus propias reflexiones, muchas culturas llegaron a la conclusión de que todo lo que nos rodea está formado por una serie de elementos básicos que podían cambiar según la tradición que los enumerara. Los griegos creían que eran el agua, la tierra, el fuego y el aire, los cuatro elementos clásicos, mientras que los budistas no incluían este último elemento en su lista. En China, en cambio, sustituyeron el aire por la madera y añadieron el metal. Algunas de estas culturas también incluyeron elementos más abstractos en la lista, como el éter o el vacío.

Se creía que estos elementos fundamentales se podían transformar unos en otros y que se combinaban para dar lugar a todas las sustancias que nos rodean. Aunque hoy en día sabemos que la idea no tiene mucho sentido, no parecía tan descabellada para alguien que vivía en épocas pasadas y veía cómo el agua desaparecía en el aire cuando se evaporaba o se convertía en un bloque sólido si se enfriaba lo suficiente. De hecho, el humo que desprende la madera al arder o el metal convirtiéndose en líquido al calentarlo eran fenómenos que debían reforzar esta creencia.

Pero había quien no se conformaba con estas respuestas e intentó ir un poco más allá, buscando los bloques aún más fundamentales que componen la materia.

Las ideas de Demócrito fueron especialmente interesantes. Ya en los siglos V y IV a.C., este filósofo griego defendía que la materia estaba compuesta por unas unidades indivisibles de distintos tamaños llamadas átomos (que en griego significa algo así como «indivisibles») que podían adoptar formas diferentes y que se unían entre sí para formar todos los objetos que nos rodean.

En la India también le daban vueltas a la idea de que la realidad está formada por pequeñas partículas indivisibles, aunque ellos las denominaban *parmanu*. Algunos hindúes creían que estas unidades básicas no se podían ver a simple vista y que aparecían y se desvanecían continuamente, aunque también había quien decía que estas unidades elementales de la materia no eran más que simples puntos sin dimensión en el espacio.

En una época en la que los seres humanos dependíamos únicamente de nuestros sentidos para descifrar los misterios del universo, estas ideas tenían su mérito, pero no por ello eran más válidas. Con el tiempo fue tomando forma el método científico, un sistema que consiste simplemente en poner a prueba nuestras ideas para ver si realmente se ajustan o no al fenómeno que intentan explicar.

Utilizando este método para refinar nuestras interpretaciones del mundo que nos rodea, poco a poco hemos ido descifrando las causas de los fenómenos que ocurren a nuestro alrededor. Ahora sabemos que los cuatro, cinco o seis elementos que las distintas culturas proponían como la base de la materia son en realidad 118 y los llamados *átomos* no tienen el aspecto que describieron las culturas antiguas. Hemos descubierto, por ejemplo, por qué las sustancias cambian de estado, la Luna da vueltas alrededor de la Tierra, el Sol brilla o, incluso, cómo reaccionan diferentes elementos para mantenernos vivos. Y la verdad es que nos hemos llevado muchas sorpresas por el camino.

El estudio detallado de la naturaleza nos ha permitido descubrir que, en realidad, todos los fenómenos que ocurren a nuestro alrededor tienen su origen en sólo cuatro fuerzas fundamentales. De hecho, cualquier incógnita que se nos ocurra tiene su respuesta en alguna (o una combinación) de estas cuatro fuerzas: la gravedad, el electromagnetismo, la fuerza nuclear fuerte y la fuerza nuclear débil.

En este libro veremos cómo llegamos a descubrir cada una de estas fuerzas, cómo dan forma al universo o influyen en nuestras vidas y cómo, con el tiempo, hemos sido capaces de aprovecharlas para avanzar como sociedad. Y, por supuesto, al final veremos si los modelos que describen estas fuerzas se podrán unificar algún día en una gran Teoría del Todo.

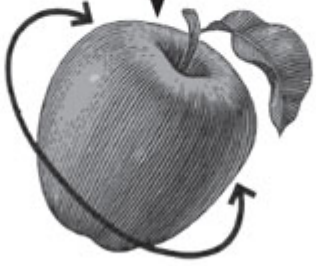
Pero para eso aún queda un rato. Sin más dilación, zambullámonos de cabeza en la historia para conocer los detalles de una realidad que nos ha llevado miles de años descubrir... Y que continuamos descubriendo mientras estás leyendo estas líneas.

De acuerdo, pero si sigues hablando como el narrador de un documental voy a cerrar aquí mismo el libro.

Vale, *voz cursiva*, ya lo dejo.

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*:[1]

> 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[2] 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, Vicenzo 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...[3] 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,[4] 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,[5] 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 interaccionaría 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,[6] 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.[7]

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,[8] 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.[9]

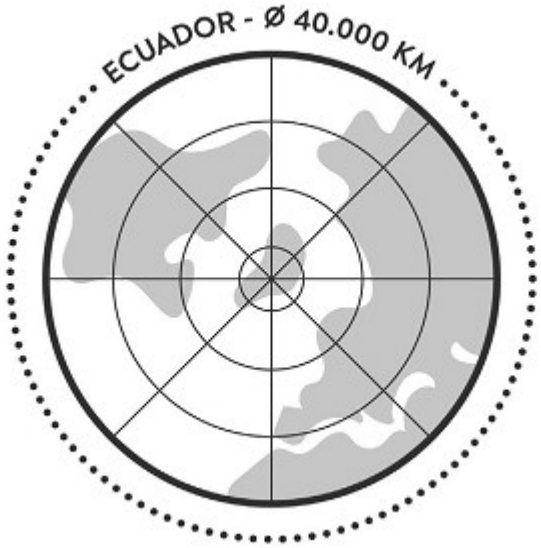
Pero ni Galileo ni su hijo Vincenzo fueron los primeros en introducir los péndulos en los relojes. Y aunque Vincenzo dejó un prototipo inacabado, fue el matemático y astrónomo holandés Christiaan Huygens, muy interesado en utilizar la precisión de estos relojes para determinar las distancias longitudinales 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°) 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° 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...[10] 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° 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°. 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.[11] 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.

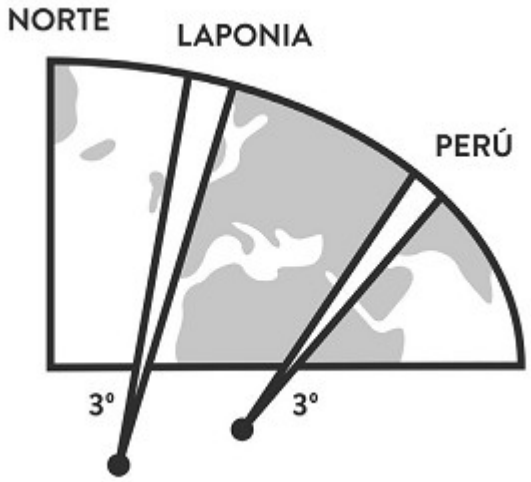
Durante los siguientes años se atribuyó la discrepancia del péndulo a un error en las observaciones de Richer. Pero, tres lustros después de sus experimentos, a Newton se le ocurrió una hipótesis alternativa: como la frecuencia con la que oscila un péndulo sólo depende de la longitud de su cuerda y de 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.[12]

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°, lo que confirmaba la hipótesis de Newton.[13]



¿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.

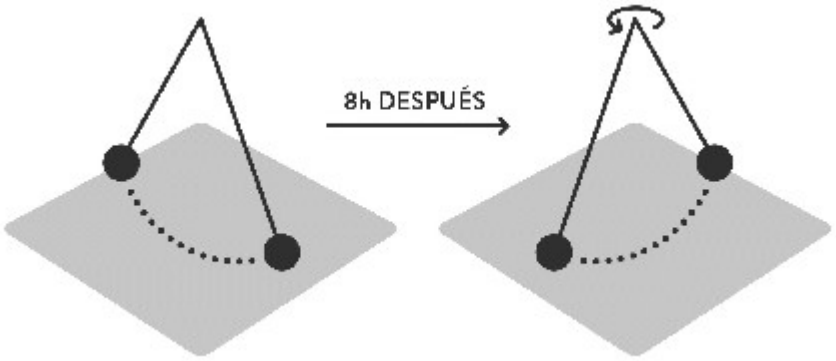
Pues resulta que ese mismo montaje es el que utilizó Foucault en 1851 para demostrar por primera vez que, en efecto, la Tierra rota. Aunque, bueno, su cuerda medía 67 metros de altura y estaba colgada del Panteón de París.

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

Hay péndulos de Foucault repartidos por todo el mundo[14] 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 °C. El trabajo no fue fácil, como explican en la página web de la South Pole Station:[15]

> 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°.

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[16] 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.[17]

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.

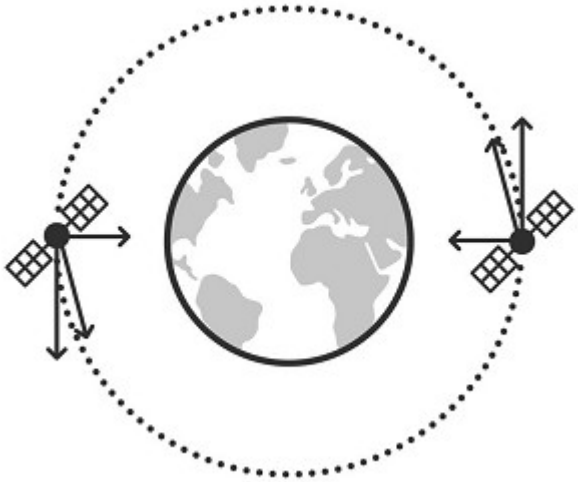
La mayoría de los satélites que están en órbita alrededor de nuestro planeta se encuentran en órbita baja terrestre (a una distancia de entre 160 y 2.000 kilómetros de la superficie). Con tal de conseguir la energía cinética suficiente para alcanzar esa altura, un objeto se tendría que lanzar al espacio 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 frena 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[18] 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...?

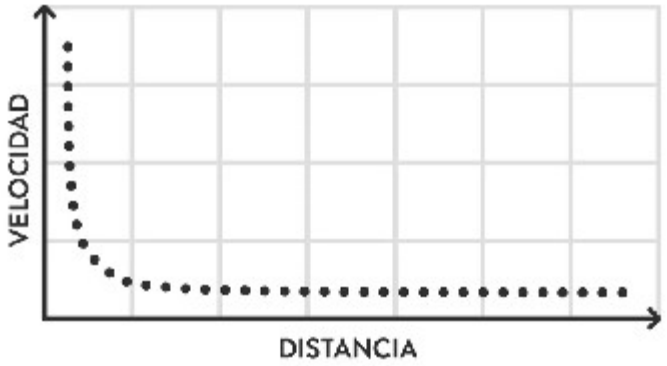
Nada, *voz cursiva*, simplemente significa que la intensidad de la gravedad se debilita con la distancia de manera que, si doblas la distancia que hay entre tu cuerpo y el centro del planeta, notarás un tirón gravitatorio cuatro veces menor, en vez de la mitad. Por ejemplo, la Tierra frena el movimiento 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 Tierra, 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,[19] 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.[20] 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 regiones 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,[21] 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.[22]

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.

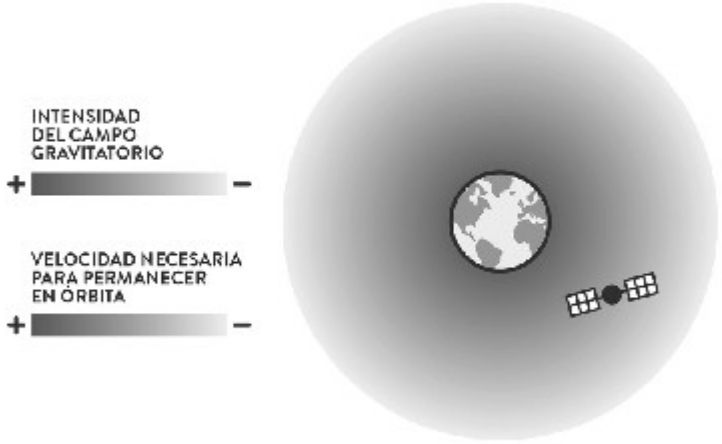
Por un lado, como ya he comentado, la rotación de la Tierra hace que las zonas cercanas al ecuador se muevan más deprisa que las regiones polares. Por este motivo, las misiones espaciales se suelen lanzar desde plataformas cercanas al ecuador, la región donde la superficie les da un empujón más sustancial...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

La intensidad de un campo gravitatorio es mayor cuanto más te acercas al objeto que lo produce. Como resultado, cuanto más cerca esté un satélite de un planeta, más rápido tendrá que moverse para

sobreponerse a su tirón gravitatorio y adoptar una órbita estable a su alrededor.

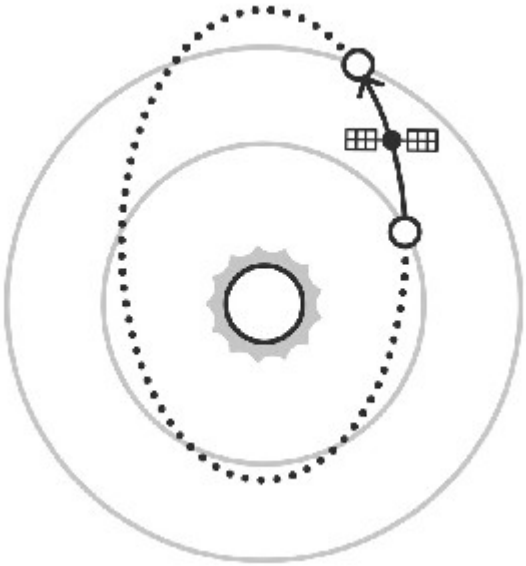


Por este motivo cualquier cambio en la velocidad de un satélite que está en órbita tiene un efecto sobre su trayectoria. Si su velocidad aumenta, entonces su energía cinética superará a la energía potencial gravitatoria a la altura que se encuentra y ese exceso de energía lo alejará del planeta. Si la velocidad del satélite disminuye, la energía potencial gravitatoria se sobrepondrá a la cinética y se verá arrastrado hacia la superficie.

Ninguna de estas dos situaciones tiene por qué conducir necesariamente a la catástrofe. Si el satélite recibiera un golpe mientras está en órbita, la gravedad podría llegar a ralentizarlo lo suficiente mientras se aleja como para que adoptara una nueva órbita a una distancia mayor del planeta. Del mismo modo, si el satélite perdiera velocidad podría llegar a adquirir la velocidad suficiente durante la caída como para adoptar una nueva órbita más cerrada.

Y aquí viene lo importante: en realidad, todos nuestros satélites están en órbita alrededor del Sol incluso antes de que sean lanzados porque la Tierra gira a su alrededor a una velocidad media de casi 30 km/s. Siendo más concretos, se desplaza a 29,29 km/s en su punto más alejado del Sol (152.000.000 km) y a 30,29 km/s en el más cercano (147.000.000 km).[23]

O sea, que mandar un satélite a otro planeta consiste en ajustar la órbita que ya sigue alrededor del Sol por el mero hecho de encontrarse sobre la Tierra, de manera que su nueva órbita intercepte el planeta de destino. Y para eso basta con aumentar o reducir su velocidad (dependiendo de si queremos alejarnos o acercarnos al Sol) y dejar que la gravedad haga el resto del trabajo. Al final, las órbitas de las misiones interplanetarias acaban teniendo esta apariencia:



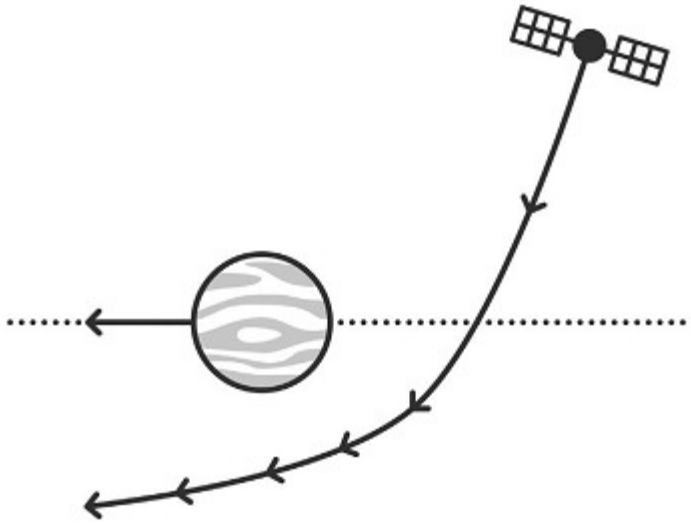
Estas trayectorias permiten ahorrar la cantidad absurda de combustible que gastarían los satélites moviéndose en línea recta, acelerando de manera constante para luchar contra la gravedad solar. Teniendo en cuenta cuánto cuesta mandar cosas al espacio, algo tan simple como cambiar el tipo de órbita que sigue un satélite alrededor del Sol nos permite ahorrar mucho tiempo y dinero. Pero existe otra manera muy ingeniosa de aprovechar la gravedad que permite a los satélites ahorrar combustible e incluso llegar más rápido a su destino.

LAS ASISTENCIAS GRAVITATORIAS

Dependiendo de la dirección en la que se encuentre el planeta al que se dirige una nave que ha partido de la Tierra, pueden ocurrirle dos cosas bastante molestas. Si va dirigida hacia un planeta del sistema solar interior, el Sol la podría acelerar tanto durante el camino que llegara a su destino a una velocidad demasiado alta como para ser capturada por el campo gravitatorio del planeta. Si por el contrario el planeta que queremos alcanzar está más lejos del Sol que la Tierra, entonces es posible que la gravedad de nuestra estrella redujera tanto la velocidad del satélite que terminara siendo arrastrado de nuevo hacia el sistema solar interior antes de alcanzar su destino.

Por suerte, no hace falta cargar combustible extra para compensar las variaciones de velocidad que nuestras naves sufren por el camino porque podemos acelerarlas o frenarlas utilizando las llamadas asistencias gravitatorias.

Un satélite se puede acelerar conduciéndolo hasta las inmediaciones de algún otro planeta en el mismo sentido en el que éste da vueltas alrededor del Sol. En esta situación, el campo gravitatorio del planeta tirará del satélite en la dirección de su movimiento, acelerándolo en mayor o menor medida dependiendo de cuánto se acerque a él.



Espera, que aquí hay algo que no me cuadra. El tirón acelerará la nave cuando se acerque al planeta, pero ¿no debería frenarla en la misma medida mientras se aleja? En ese caso, la velocidad final de la nave no debería haber cambiado.

Muy buena observación, *voz cursiva*. Eso es precisamente lo que ocurriría si la nave se dirigiera hacia un planeta que estuviera totalmente quieto. Pero, como los planetas se mueven alrededor del Sol, transfieren parte de ese movimiento a la nave y, como resultado, la nave sale del dominio gravitatorio del planeta a una velocidad mayor que aquella con la que había entrado. Por otro lado, si lo que se quiere es frenar una nave, entonces bastará con realizar esta maniobra al revés, adentrarse en el campo gravitatorio de un planeta en el sentido contrario a su movimiento.

Las asistencias gravitatorias se utilizan a menudo para aumentar la velocidad de las misiones destinadas a los planetas exteriores del sistema solar. Por ejemplo, en 2015 la sonda *New Horizons* se convirtió en la primera misión en sobrevolar un planeta enano al pasar a 12.500 kilómetros de la superficie de Plutón. Como Plutón está treinta veces más lejos del Sol que la Tierra, la sonda tuvo que despegar a una velocidad de 16,5 km/s, mucho más rápido que ninguna otra nave hasta la fecha.[24] Si a esto le añadimos los 30 km/s impartidos por el movimiento de la Tierra alrededor del Sol, la nave se empezó a alejar de nuestra estrella a 46 km/s.

Pero cuando la *New Horizons* había alcanzado Júpiter, esa velocidad se había reducido hasta los 19 km/s, por lo que tuvo que utilizar la gravedad del planeta gigante para acelerar hasta los 23 km/s. Este impulso adelantó la fecha de llegada a Plutón nada más y nada menos que tres años. Con esta velocidad añadida, la sonda logró sobrevolar Plutón a 14 km/s[25] y, de paso, aprovechó para estudiar la atmósfera de Júpiter, su campo magnético y algunas de sus lunas por el camino.

La reina de las asistencias gravitatorias es la *Voyager 2*, la única sonda que ha sobrevolado Urano y Neptuno. La sonda despegó el 20 de agosto de 1977 y, después de utilizar los campos gravitatorios de

Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, a día de hoy tiene la trayectoria y la velocidad necesarias para abandonar el sistema solar. Sin embargo, la *Voyager 2* no es el invento humano que ha llegado más lejos: ese título le corresponde a la *Voyager 1*, lanzada dieciséis días después y que sólo recibió asistencia gravitacional de Júpiter y Saturno.

A fecha de enero de 2015, las sondas *Voyager 1* y *Voyager 2* se estaban alejando del Sol a velocidades de 17 y 15,5 km/s, respectivamente, y se encontraban a una distancia de 19.400 y 16.000 millones de kilómetros de él, lo que las convierte en los artefactos humanos que más lejos han llegado hasta la fecha.[26]

¿Y alguna de ellas ha escapado ya del sistema solar?

No, no. Aunque en 2012 o 2013 aparecieron titulares que anunciaban que la *Voyager 1* había abandonado el sistema solar, en realidad ninguna de las dos sondas lo ha hecho.

El Sol emite en todas las direcciones y de manera constante un flujo de partículas cargadas al que los astrónomos se refieren como *viento solar*. Hablaré sobre este detalle más adelante, pero por ahora nos basta con saber que estas partículas se extienden alrededor del Sol formando una gigantesca burbuja magnética, llamada heliosfera. Mientras el Sol da vueltas alrededor del centro de la galaxia, la heliosfera choca con todo el gas y el plasma que flota por el espacio interestelar, de manera que en su frontera aparece una zona turbulenta. Más allá de esta región nos encontramos con la heliopausa, la zona del medio interestelar que aún no ha sido perturbada por el paso del Sol. Y esta región del espacio es la que ha cruzado la sonda *Voyager 1*.

Pero el sistema solar no termina aquí: las sondas *Voyager* no habrán escapado del sistema solar hasta que lleguen más allá de los objetos más alejados del Sol que siguen bajo su influencia gravitatoria.

El Sol está rodeado por la nube de Oort, un enjambre de pequeños cuerpos congelados que dan vueltas a su alrededor a una distancia de entre 50.000 y 200.000 UA. Una UA es una Unidad

Astronómica, una medida que equivale a la distancia que separa la Tierra del Sol (unos 150.000.000 km). Para poner esta cifra en perspectiva, Plutón se encuentra a 30 UA y la heliopausa a unas 100 UA así que, como podéis imaginar, las sondas *Voyager* aún están muy lejos de atravesar la nube de Oort y, por tanto, de salir del sistema solar. De hecho, al ritmo que van, las *Voyager* tardarán unos trescientos años en alcanzar la zona interior de la nube de Oort... Y alrededor de 30.000 años en salir de ella.[27]

Así que, de momento, los titulares tendrán que esperar.

En cualquier caso, hay que decir que los astrónomos han aprendido a aprovechar la gravedad de una manera extremadamente precisa. Por ejemplo, la sonda *Juno*, que llegó a Júpiter a mediados de 2016, alcanzó el planeta con sólo un segundo de diferencia respecto a la fecha que se había programado. Un hito impresionante, teniendo en cuenta que el viaje duró cinco años y que la sonda había recorrido 1.800 millones de kilómetros en el momento de su llegada.[28]

Pero, cambiando de tema, hay que tener en cuenta que la gravedad también es la fuerza que da forma a los planetas a los que queremos llegar en un primer lugar.

LA GRAVEDAD Y LA FORMA DE LOS PLANETAS

Si os gusta la astronomía, sabréis que nuestro vecindario cósmico no sólo está compuesto por el Sol, los planetas y sus lunas, sino que también contiene una miríada de cuerpos pequeños repartidos por distintas regiones del sistema solar. Por ejemplo, entre las órbitas de Marte y Júpiter podemos encontrar el cinturón de asteroides, un anillo que contiene entre 700.000 y 1.700.000 asteroides con un tamaño superior a un kilómetro de diámetro (y millones de trozos de roca mucho más pequeños) que dan vueltas alrededor del Sol a una

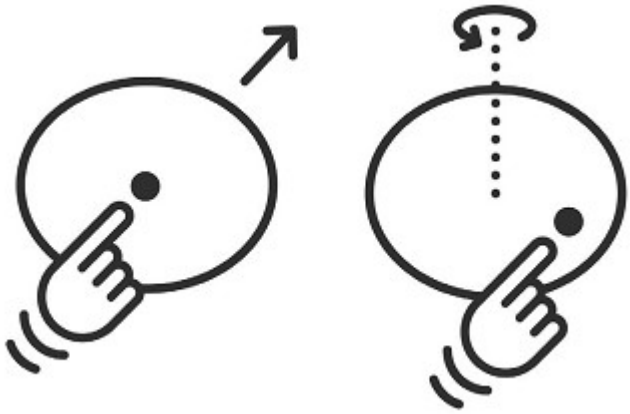
distancia de entre 2,2 y 3,2 UA. Aunque el número asusta, lo cierto es que la masa combinada de todos los asteroides del cinturón apenas representa el 4% de la masa de nuestra Luna.[29]

Los asteroides grandes son mucho menos abundantes que los pequeños. De todos los que se han descubierto hasta la fecha sólo unos doscientos tienen un diámetro superior a 100 kilómetros y el más grande de todos, Ceres, tiene un diámetro de 940 kilómetros. Pero, si os fijáis, habréis notado que la gran mayoría de los asteroides comparten una característica: tienen forma de patata.

¡Es verdad! ¿Y por qué los asteroides tienen forma de patata y los planetas no?

Pues porque cualquier material rígido tiene cierta resistencia estructural y mantendrá su forma a menos que una fuerza suficientemente intensa actúe sobre él. En el caso de los asteroides y los planetas rocosos, esa fuerza que moldea el material rígido que los compone es la gravedad.

La gravedad es una fuerza central, lo que significa que la magnitud de la fuerza que notará un objeto en un campo gravitatorio está determinada por la distancia que lo separa del «foco» gravitatorio, que se encuentra en el centro de masas del sistema. Por decirlo de una manera gráfica, el centro de masas representa el punto en el que, gracias a la distribución de la masa a su alrededor, puedes aplicar un esfuerzo sin provocar que el objeto empiece a rotar. En el caso de un planeta, este «foco» está literalmente en el centro.



Los asteroides tienen una forma muy irregular porque su campo gravitatorio es muy débil, así que la fuerza que tira del material que los compone hacia el centro de masas no es lo suficientemente intensa como para sobreponerse a la resistencia estructural.

Pero, si un objeto crece lo suficiente, la intensidad de su campo gravitatorio podrá llegar a superar la resistencia del material del que está hecho. En este caso, toda su masa se verá atraída hacia el centro de masas en la mayor medida posible. La única forma geométrica en la que todos los puntos de la superficie están lo más cerca posible del centro de masas es la esfera... Y así es como la gravedad da forma esférica (o casi esférica, como ya hemos visto) a los planetas.

¿Y qué tamaño determina si un cuerpo celeste será o no esférico?

El límite ronda entre los 200 o 300 kilómetros de radio.[30] Por debajo de este radio, los cuerpos celestes parecen patatas de hielo, roca y metal. De ahí que en inglés llamen a este límite «*Potato Radius*», que se traduciría como «*Radio Patata*», aunque personalmente, me gusta más el término «*Radio de Patatización*».

Y, ya que estamos, éste es el mismo motivo por el que la Tierra no puede ser plana[31] (ni cuadrada ni de ninguna otra forma):[32] la gravedad hace que cualquier objeto con una masa considerable, como un planeta, se colapse sobre sí mismo hasta formar una esfera, así que un planeta plano nunca podría existir.

¡Pero hace un rato has dicho que los planetas no tienen una forma del todo esférica! ¿No te estás contradiciendo?

Tienes toda la razón, *voz cursiva*. Los planetas están achatados, lo que significa que su diámetro de polo a polo es menor que su diámetro ecuatorial. Pero esta forma es posible precisamente porque, como he comentado antes, hay otra fuerza (la fuerza centrífuga) que actúa sobre el material en la dirección opuesta a la gravedad.

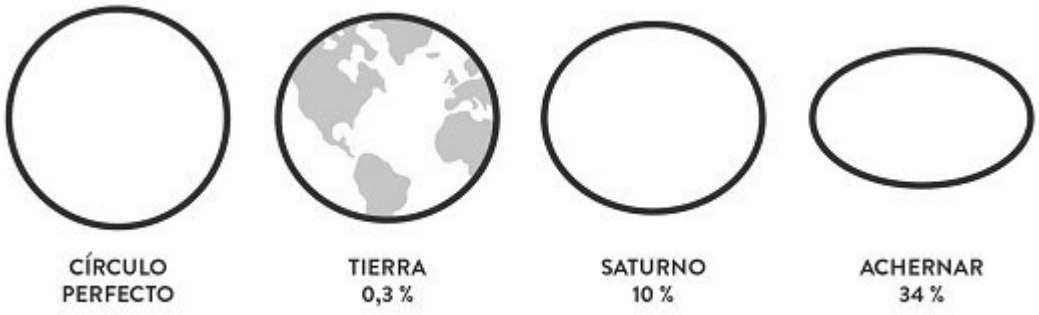
Entonces, esto es un poco como las órbitas, ¿no? No hay ninguna órbita perfectamente circular ni ningún planeta esférico.

No creas, *voz cursiva*. Ya hemos visto que el diámetro polar de la Tierra (12.713 km) es un 0,3% menor que el ecuatorial (12.756 km) y que el factor que más contribuye en este achatamiento es la fuerza centrífuga creada por la rotación del planeta. Pero la fuerza centrífuga depende tanto del tamaño de un objeto como de su velocidad de rotación. Curiosamente, Venus tiene un tamaño muy similar al de la Tierra, pero rota increíblemente despacio: tarda casi 244 días en completar una vuelta alrededor de su propio eje. De hecho, su rotación es tan lenta que tarda más en dar una vuelta sobre sí mismo (243 días) que en completar una órbita alrededor del Sol (224,7 días).

Como resultado, la fuerza centrífuga en el ecuador de Venus es prácticamente inexistente y, a efectos prácticos, el planeta se puede considerar una esfera perfecta.[33] Lo mismo ocurre con Mercurio, que tiene menos de la mitad del radio de Venus o la Tierra y completa una vuelta sobre su propio eje cada 58,8 días.

En el extremo opuesto de la perfección esférica, Saturno tiene un achatamiento del 10%, así que su diámetro polar es un 10% menor que el ecuatorial. Este achatamiento se puede apreciar perfectamente en las fotos del planeta, aunque supongo que no nos solemos dar cuenta de este hecho porque nos quedamos mirando sus impresionantes anillos. Pero eso no es nada comparado con Achernar, la estrella más achatada que se conoce:[34] su diámetro

ecuatorial es un 56% mayor que su diámetro polar, por lo que tiene un perfil como el de la siguiente figura (donde, de paso, añado a la Tierra y Saturno).



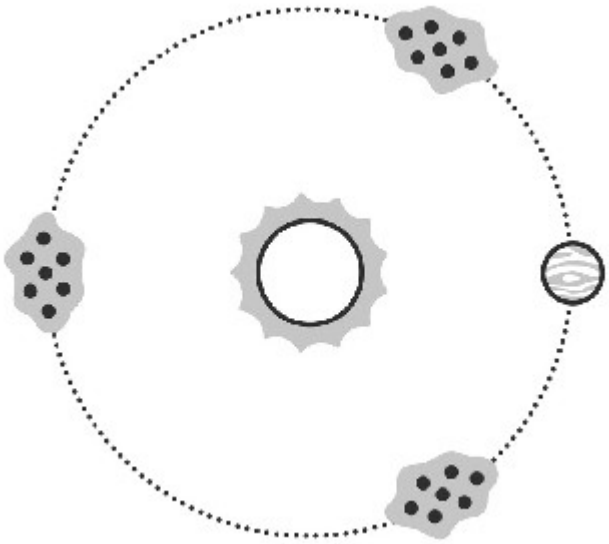
Como podréis imaginar, una estrella o un planeta gigante gaseoso tienen achatamientos más pronunciados porque se pueden deformar en una medida mucho mayor debido a que el material del que están compuestos no es rígido como el de un planeta rocoso.

Pero centrémonos ahora en estos cuerpos rocosos pequeños y apatatados de los que hablaba al principio de este apartado, porque guardan una historia muy interesante.

LOS ASTEROIDES TROYANOS

Hemos visto que entre Marte y Júpiter hay una cantidad tremenda de asteroides dando vueltas alrededor del Sol a entre 2,2 y 3,2 UA de distancia. Pero el cinturón de asteroides no es el único lugar de nuestro sistema solar donde se pueden encontrar pedazos de roca sobrantes de la época en que se formaron los planetas. Se han descubierto hasta 6.000 asteroides que comparten su órbita con Júpiter... Aunque se cree que esta cifra podría ascender hasta alrededor de un millón.[35]

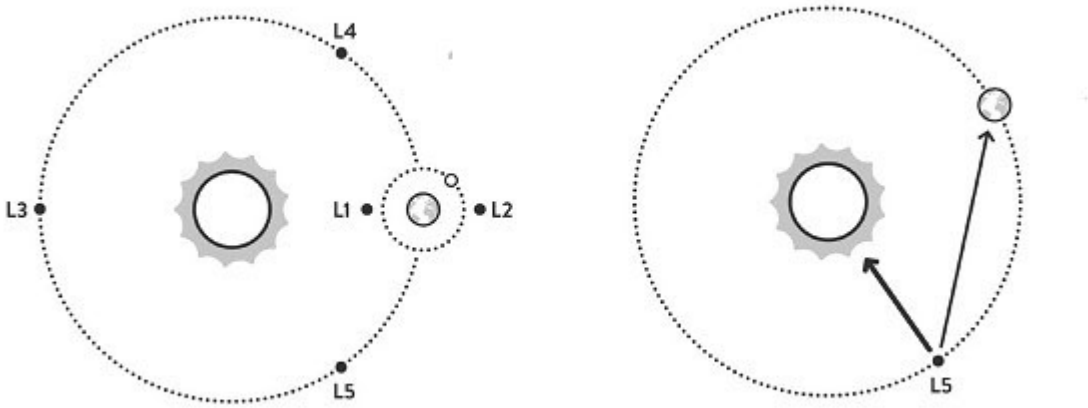
Pero lo curioso del asunto es la distribución en la que estos asteroides, bautizados con el nombre de troyanos, acompañan a Júpiter en su camino alrededor del Sol: a 60° por delante y por detrás del planeta y en el extremo opuesto de su órbita.



¿Y por qué en esas posiciones tan concretas?

Pues porque, en un sistema formado por tres cuerpos, como pueden ser una estrella, un planeta y un troyano, la posible localización de este último estará limitada por la magnitud del tirón gravitatorio que recibe por parte de los otros dos cuerpos, que son mucho más masivos.

Imaginemos que tu intención es colar un asteroide en la órbita de un planeta para que le haga compañía durante su camino alrededor de la estrella. Lo primero que deberías tener en cuenta es que el asteroide terminará siendo arrastrado por la gravedad del planeta o la estrella en la mayor parte de los puntos en los que lo coloques.



Pero existen cinco puntos en la órbita de un planeta, los llamados puntos de Lagrange, donde el campo gravitatorio de la estrella tira de los objetos que se encuentren en ellos en la misma medida que el del planeta, de manera que no se ven atraídos hacia un cuerpo u otro y pueden mantener una órbita estable. En otras palabras, si eres un asteroide troyano que está en un punto de Lagrange, el planeta te acelerará en su dirección en la misma medida que el Sol te intentará arrastrar hacia el sistema solar interior. De esta manera, tu velocidad se mantendrá constante y podrás dar vueltas alrededor de la estrella a la misma distancia que el planeta al que acompañas.

Entonces... ¿eso quiere decir que todos los planetas están acompañados por varios enjambres de asteroides?

No, no; por lo que sabemos de momento, Júpiter es la excepción en este sentido. El número de asteroides troyanos descubiertos alrededor del resto de los planetas del sistema es bastante decepcionante en comparación: el siguiente de la lista, Neptuno, tan sólo tiene trece troyanos y Marte tiene siete, mientras que Venus y Urano tienen sólo uno.

Pero, también hay que tener en cuenta que el resto de los planetas del sistema solar son mucho menos masivos que Júpiter o se encuentran muy lejos de la Tierra, lo que dificulta la detección de

los posibles asteroides pequeños que les acompañan en su camino alrededor del Sol.

¿Y qué hay de nosotros? ¿No tenemos ningún troyano que nos haga compañía?

Pues sí, resulta que en 2011 se descubrió que la Tierra tiene al menos un troyano propio, bautizado con uno de esos nombres poéticos que tanto les gustan a los astrónomos: 2010 TK7. Se trata de un asteroide de unos 300 metros de diámetro que da vueltas alrededor del Sol a una distancia de entre 120 y 180 millones de kilómetros (la órbita de la Tierra tiene un radio de 150 millones de kilómetros) y que se acerca y aleja de la Tierra durante su órbita, pasando del punto L3 al L4 de la ilustración anterior cada cuatrocientos años. No sé si te habrá asaltado la duda, *voz cursiva*, pero por si acaso te diré que no tienes por qué preocuparte, porque 2010 TK7 nunca se acerca a menos de 20 millones de kilómetros de la Tierra, así que no se va a estrellar contra nosotros.

No me preocupaba en absoluto. Pero, oye, ¿y si en vez de un asteroide troyano fuera algo más masivo, como por ejemplo un planeta? ¿Podrían existir dos planetas dando vueltas alrededor de una estrella en la misma órbita?

Eso es bastante más complicado porque la masa de un planeta es muchísimo mayor que la de un asteroide y, por tanto, su campo gravitatorio es mucho más intenso.

Una estrella y un planeta tienen una gran influencia sobre la velocidad de un asteroide troyano pero, debido a su minúscula masa, éste no puede alterar la velocidad de los otros cuerpos y, por tanto, el sistema alcanza la estabilidad muy fácilmente. Pero resulta que la cosa se vuelve un poco más complicada en el caso de los planetas troyanos.

En primer lugar, los puntos de la órbita en los que se puede colocar un planeta troyano son muy limitados, ya que los únicos puntos de Lagrange estables a largo plazo son los L4 y L5. Un objeto que se encuentre en L1, L2 o L3 (sea un asteroide o un planeta) irá perdiendo velocidad con el tiempo y terminará abandonando la

órbita. Por otro lado, los campos gravitatorios del resto de los planetas del sistema solar harían poco por contribuir a la estabilidad de la órbita de un planeta troyano... Y más teniendo en cuenta que, como hemos visto, los planetas no siguen órbitas perfectamente circulares.

Para rematar la dificultad del asunto, al colocar un segundo planeta en la órbita de otro, los dos empezarían a interaccionar gravitacionalmente, alterando sus velocidades y, por tanto, desestabilizando sus órbitas. Como resultado, los dos podrían terminar adoptando órbitas diferentes, precipitándose hacia la estrella o incluso chocando entre ellos.

Si unimos todos estos factores limitantes descubrimos que, aunque en teoría podrías colocar dos planetas en los puntos exactos de una órbita de manera que pudieran compartirla de manera indefinida, la realidad es que es tan difícil que estas condiciones se den en la naturaleza que se trataría de una situación extremadamente infrecuente. No es de extrañar entonces que de los 2.571 sistemas solares que se han descubierto más allá del nuestro, en ninguno se hayan encontrado señales de que dos planetas compartan la misma órbita.

Pero aquí viene un giro argumental que te va a gustar, *voz cursiva*.

EL ORIGEN DE LA LUNA

El origen del Sol y la Luna siempre ha intrigado a los seres humanos, así que cada cultura ha inventado sus propios mitos para poder explicarlo. En uno de los mitos egipcios, por ejemplo, el Sol y la Luna eran los ojos de Horus, el dios del cielo. Según este, el brillo desigual de los dos astros se podía explicar porque, en el pasado, el dios Seth le robó un ojo a Horus y lo cortó en seis trozos. Otro dios llamado Toth intentó «curar» ese ojo, pero nunca llegó a recuperar su brillo... Y por eso la Luna brilla menos que el Sol.[36]

Es una explicación bastante intrincada para explicar el origen del Sol y la Luna, pero no de las más enrevesadas que he leído. Creo que ese mérito se lo llevan los inuit.

Según uno de los mitos inuit, en tiempos remotos, cuando aún no existían el Sol ni la Luna y la Tierra estaba sumida en una oscuridad perpetua, había unos hermanos llamados Igaluk y Malina que estaban muy unidos. Pero, cuando alcanzaron la mayoría de edad, los hermanos fueron separados y conducidos a las barracas de los hombres y de las mujeres. Con el tiempo, Igaluk se fue dando cuenta de que su hermana era la más atractiva de las chicas de la aldea, así que una noche se coló en su cama y abusó sexualmente de ella (los mitos de los inuit suelen ser bastante oscuros).

Malina no pudo ver la cara de su agresor en la oscuridad, pero se le ocurrió una idea para descubrir su identidad. Decidió embadurnarse las manos con hollín y, cuando Igaluk volvió a la noche siguiente, le manchó la cara sin que éste se diera cuenta. Cuando todo acabó, Malina cogió una lámpara y fue al edificio de los hombres para ver quién tenía la cara pintada de negro, descubriendo así que su agresor había sido su propio hermano. Malina agarró una antorcha y salió corriendo. Igaluk tomó otra y empezó a perseguirla, pero no consiguió encenderla correctamente y obtuvo una llama muy débil. Según este mito, los dos hermanos acabaron corriendo tan rápido que algún tipo de magia hizo que ascendieran hacia las estrellas, convertidos en el Sol y la Luna, condenados a perseguirse para siempre.

Y, claro, eso explicaba por qué la Luna brilla menos que el Sol, el origen de las manchas oscuras de su superficie y lo que ocurría durante los eclipses que, según los inuit, eran momentos en los que Igaluk conseguía alcanzar a Malina.

Eeeeh... OK.

Recordemos que, en la época en la que se inventaron estos mitos, la gente aún no había desarrollado la tecnología necesaria para abordar objetivamente los misterios que les intrigaban, *voz*

cursiva. De hecho, no se encontrarían evidencias que permitieran avanzar sustancialmente en las hipótesis sobre el origen de la Luna hasta mediados del siglo xx.

Cuando los astronautas de las seis misiones Apolo que aterrizaron sobre la superficie de nuestro satélite empezaron a traer rocas de vuelta, su análisis indicó algo muy curioso: la composición química de las rocas lunares es similar a la de la Tierra. Más aún, la proporción entre los diferentes isótopos de oxígeno es prácticamente idéntica (aclararé qué son los isótopos en el último capítulo).

Esto es interesante, porque el resto de los planetas del sistema solar tienen composiciones químicas muy distintas. Es por eso que la similitud química entre la Tierra y la Luna nos permite descartar una de las hipótesis sobre el origen de nuestro satélite: no es probable que se formara en algún otro lugar del sistema solar y luego hubiera sido capturada por el campo gravitatorio de la Tierra, porque entonces su composición sería menos parecida a la de nuestro planeta.

La composición similar de los dos cuerpos se puede explicar de dos maneras: o bien la Luna y la Tierra se formaron a la vez a la misma distancia del Sol o, de alguna manera, la Luna salió del interior de la Tierra.

¡Ufff! ¡La Luna saliendo del interior de la Tierra! ¡No me hagas reír!

Bueno, echemos un vistazo a las evidencias.

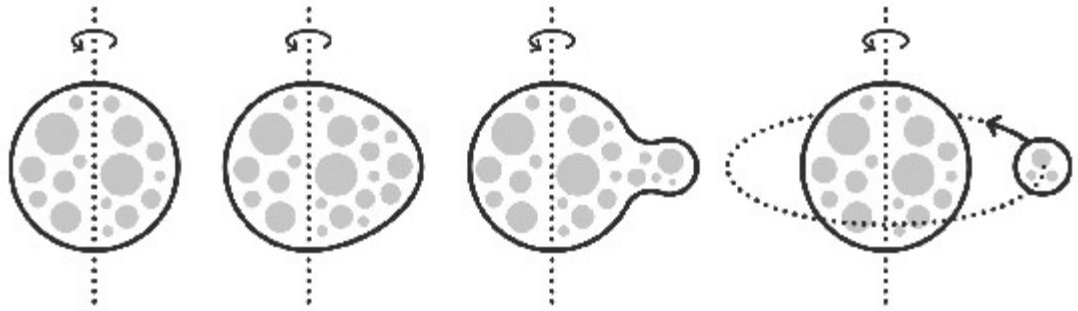
La primera hipótesis parece tener mucho sentido a primera vista pero, si los dos cuerpos se formaron en una región que contenía proporciones similares de cada elemento, no explica por qué el núcleo metálico de la Luna es tan pequeño en comparación con el de la Tierra. Por otro lado, como veremos en breve, el sistema Tierra-Luna contiene un montón de momento angular, lo que significa que su movimiento aún no se ha ajustado del todo desde el momento de su formación, algo que no tendría mucho sentido si los dos cuerpos se hubieran empezado a formar uno alrededor del otro

mientras sus campos gravitatorios se iban adaptando mutuamente. La existencia de estos dos fenómenos hace que esta hipótesis no sea probable.

Entonces...

Sí, la Luna debió salir de la Tierra, pero no lo hizo como en la famosa película donde los alienígenas salen disparados de los estómagos de sus víctimas... Aunque algo así es lo que insinuó en 1898 el astrónomo británico George Darwin, hijo del famoso Charles Darwin.

George Darwin sugirió que, en la época en la que se formó la Tierra, el planeta se encontraba en estado líquido y que su rotación era tan rápida (una vez cada 2,5 horas)[37] que la fuerza centrífuga hizo que expeliera un glóbulo de material a través del ecuador que salió al espacio y quedó dando vueltas a su alrededor, produciendo así la Luna y dejando un hueco en la superficie terrestre que se convertiría en el océano Pacífico.



Hoy en día sabemos que este mecanismo no es dinámicamente posible, pero era una idea que tenía mérito a finales del siglo XIX. Curiosamente, Darwin predijo que, si su teoría era cierta, la Luna habría dado vueltas muy cerca del planeta en el momento de su formación y se habría estado alejando de nosotros durante todo este tiempo... Una predicción que resultó ser correcta, como comprobaron científicos americanos y soviéticos cuando empezaron a medir la distancia que nos separa de la Luna mandando pulsos láser contra unos espejos que varias misiones espaciales colocaron sobre la superficie de nuestro satélite.

En la actualidad, la mayoría de los científicos se decantan por la hipótesis del gran impacto para explicar la formación de la Luna, llamada así porque, como su nombre indica, hay una colisión enorme involucrada en el proceso.

Esta hipótesis sugiere que todas estas características curiosas de la Luna podrían explicarse si ésta se hubiera formado a partir de la colisión de la Tierra con un cuerpo de un tamaño similar al de Marte poco después de su formación. Un impacto de esta magnitud habría lanzado al espacio gran cantidad de material, tanto del propio objeto como del manto terrestre, y parte de él podría haber sido atrapado por el campo gravitatorio de la Tierra, quedando en órbita a su alrededor. Con el tiempo, los fragmentos de material que quedaron en órbita se unirían para finalmente formar la Luna.

Además de encajar con los fenómenos ya comentados y que las otras ideas no pueden explicar, la hipótesis del gran impacto explica por qué algunos elementos que contiene la Luna, como el zinc o el potasio, se encuentran en una forma que cabría esperar si en algún momento el material que compone la Luna hubiera sido vaporizado.

Y resulta que, si esta hipótesis es correcta, el ángulo con el que el objeto chocó contra la Tierra debió ser muy cerrado porque, de lo contrario, no habría lanzado suficientes escombros al espacio como para dar lugar a nuestro satélite. De hecho, ese ángulo sería compatible con la idea de que el planeta que impactó con la «proto-Tierra» compartía órbita con ella.

Quieres decir que...

Sí, *voz cursiva*: se cree que este cuerpo del tamaño de Marte, bautizado como Theia, podría haber sido un planeta troyano que compartía órbita con la Tierra, pero que terminó desestabilizándose poco después de que se formara el sistema solar y estrellándose contra nuestro planeta. O sea que, aunque hoy en día no hayamos encontrado ningún sistema planetario que contenga algún planeta troyano, es posible que nuestro propio sistema solar contara con uno en el pasado y que incluso, si no fuera por él, el mundo tal y como lo conocemos hoy en día no existiera.

Y, ya que estamos hablando de la Luna y la gravedad, intentaré aclarar unos cuantos conceptos que he tratado y responder a alguna pregunta que tal vez os haya rondado alguna vez por la cabeza.

LAS MAREAS Y LA LUNA

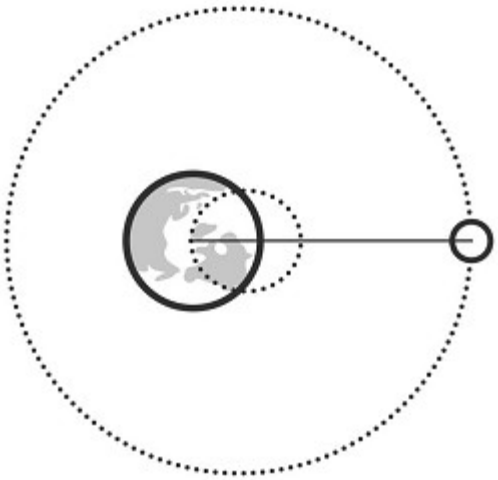
Como he mencionado de pasada, y me extraña que no hayas dicho nada al respecto, *voz cursiva*, la Luna se ha estado alejando de la Tierra desde el momento en que se formó, y sigue haciéndolo hoy en día.

Ah, sí, disculpa, los troyanos me estaban distrayendo... ¿Cómo se supone que podemos saber que la Luna estaba más cerca hace 4.500 millones de años, si nadie estaba presente en aquella época para verlo? ¿...O sí?

No, claro, en aquella época no había nadie que pudiera comprobar con qué tamaño aparecía nuestro satélite en el cielo y es difícil imaginar cómo nos podría haber transmitido esa información. En realidad, la prueba de que la Luna estaba más cerca de la Tierra en el pasado está en las mareas. En las mareas fosilizadas, para ser más concretos.

Eeeeeh...

Tienes razón, vayamos por pasos.



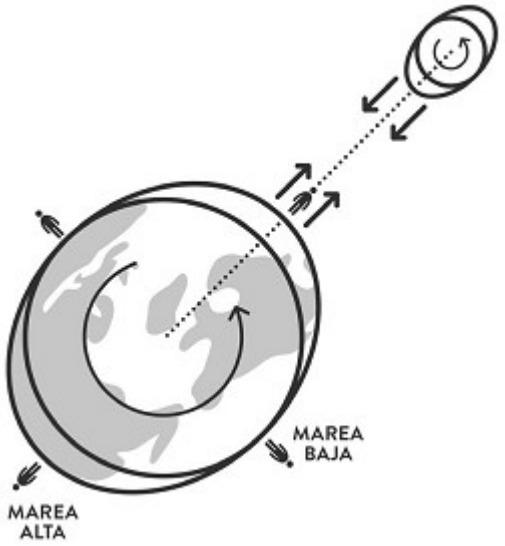
Técnicamente, la Luna no da vueltas alrededor de la Tierra. En realidad, los dos cuerpos dan vueltas alrededor de un centro de gravedad común, pero no lo notamos en nuestro día a día porque el círculo que describe la Tierra alrededor de este punto es muy pequeño. Al fin y al cabo, con una masa 81 veces mayor que la de la Luna, nuestro planeta es el cuerpo dominante en el sistema y, por tanto, el centro de gravedad está más cerca de nosotros.

Esto les ocurre en mayor o menor medida a todos los objetos que están en órbita, ya sean un planeta y un satélite o una estrella y los planetas que la orbitan. Incluso nuestro Sol, que acapara el 99% de toda la masa contenida en el sistema solar, se mueve alrededor de un centro de gravedad cuya posición va cambiando según la distribución de la masa de los planetas a su alrededor en ese momento. Dependiendo de la posición de los planetas, la posición del centro de gravedad del sistema solar va cambiando, pudiendo encontrarse tanto en el núcleo de nuestra estrella como hasta 500.000 kilómetros por encima de su superficie, en el caso más extremo en el que todos los planetas estuvieran alineados en la misma dirección.

El caso es que la intensidad de la gravedad que sienten los dos cuerpos que están en órbita no es constante en todo su volumen: las caras que están más cerca entre sí sienten una fuerza gravitatoria mayor que las que están más alejadas. Esta diferencia de fuerzas entre sus extremos hace que los objetos del sistema se estiren hacia el centro de gravedad común, por lo que terminan adoptando una forma ovoide (similar a la del huevo) en esa dirección.

Pero no hay que olvidar que estos bultos gravitatorios no están fijos en la estructura del planeta, sino que son una perturbación que siempre está (o intenta estar, como veremos en un momento) alineada con la línea imaginaria que une los centros de los dos planetas con el centro de gravedad del sistema. Es decir que, a

medida que la Tierra rota, cada región de la superficie del planeta va entrando y saliendo de estos bultos, deformándose por el camino y adoptándose a su forma.



Y la tendencia a adoptar esta forma ovoide es la causa de las mareas: al encontrase en estado líquido, los océanos se adaptan muy fácilmente a la forma de este bulto gravitatorio cuando pasan a través de él. El suelo también se deforma, por supuesto, pero al ser rígido lo hace en una medida mucho menor.

Como resultado, el nivel del mar sube respecto al de tierra firme a medida que se adentra en el bulto gravitatorio. Cuando la marea está más alta significa que la región en la que nos encontramos está pasando por el punto en el que la Tierra está más estirada mientras que, a medida que abandonamos el bulto gravitatorio, el agua vuelve a su posición inicial y la marea va bajando hasta alcanzar su altura mínima a medio camino entre los dos bultos.

Hay que decir que la magnitud de la subida o bajada del nivel del mar durante la marea también depende de las características geográficas de la zona. En un mar relativamente pequeño y poco profundo, como el Mediterráneo, la diferencia media entre estos dos niveles es de sólo 40 centímetros.[38] En el extremo opuesto, en el

lugar donde la marea tiene la mayor amplitud, la bahía de Fundy (situada en la costa atlántica de Canadá), la diferencia entre la marea alta y la baja llega a los 16,3 metros.

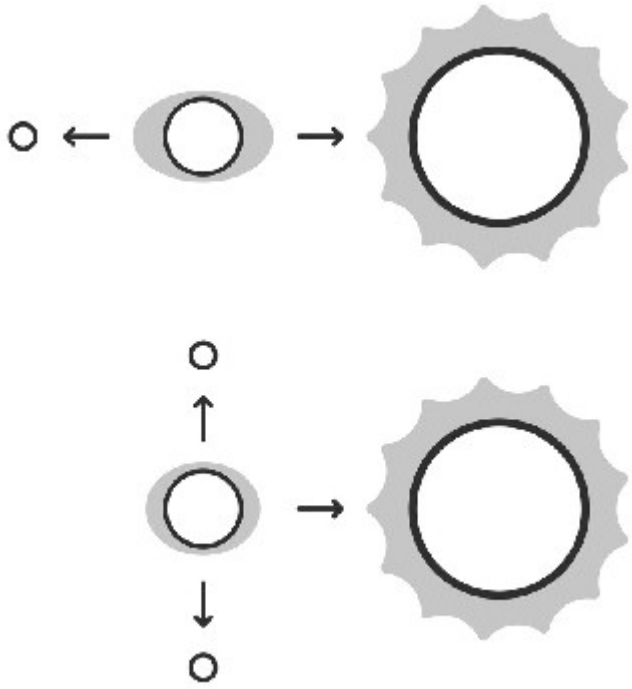
Como comentaba, la masa rígida del planeta también se deforma ante el efecto de la gravedad, pero no notamos cómo el suelo sube y baja bajo nuestros pies porque la diferencia es de tan sólo 40 centímetros entre los momentos en los que la marea es más alta y más baja.[39]

Ahora que sabemos cuál es la causa de las mareas, veamos cómo se pueden fosilizar.

Existen un tipo de rocas llamadas ritmitas que están formadas por una gran cantidad de capas cuyo grosor se repite en un patrón cíclico. Esto significa que, en el pasado, los sedimentos que formaron estas capas se acumulaban unos encima de otros en períodos regulares. A medida que cada nueva capa de material se depositaba sobre la anterior en escalas de tiempo geológicas, éstos se fueron compactando y convirtiendo en rocas que vemos hoy en día. Y hay una clase particular de ritmitas que está formada por el apilamiento del material arrastrado por el agua cada vez que sube la marea.

Espera, espera, ¿cómo se puede saber que una roca ha sido formada por las mareas y no por algún otro fenómeno cíclico?

Pues porque las mareas no dependen sólo de la Luna, sino también del Sol, así que no siempre tienen la misma intensidad. Igual que la Tierra se estira hacia el centro de gravedad que comparte con la Luna (y viceversa), nuestro planeta también se estira un poco hacia el Sol. Por esta razón, dependiendo de la posición del Sol, la Luna y la Tierra a lo largo del año, el bulto gravitatorio del planeta se vuelve mayor o menor, las mareas ganan o pierden intensidad y, en consecuencia, la cantidad de sedimentos que depositan sobre la costa va variando.



Y precisamente sabemos que fue la marea la que formó las capas que componen estas rocas porque sus diferentes grosores se repiten en una secuencia que refleja los momentos de mayor y menor intensidad de las mareas a lo largo del año.

¿Y cómo se supone que podemos deducir que la Luna estaba más cerca en el pasado a partir de estas rocas?

Pues porque sabiendo que éstas diferencias de intensidad dependen de la posición de la Luna y el Sol en relación con la Tierra, es posible deducir cuántos ciclos lunares tenían lugar en el pasado cada vez que nuestro planeta completaba una órbita alrededor del Sol (o cada año, que es lo mismo) observando bajo el microscopio el grosor de las distintas capas de las ritmitas.

De esta manera se ha podido descubrir que la Luna completaba más órbitas alrededor de la Tierra cada año en el pasado, lo que significa que debía dar vueltas a nuestro alrededor más deprisa y, por tanto, que tenía que encontrarse mucho más cerca.

Hoy en día la Luna se encuentra, de media, a unos 384.000 kilómetros y se aleja de la Tierra a un ritmo de 3,8 centímetros anuales. Pero sabemos que la Luna no ha estado alejándose siempre

al mismo ritmo, porque si así fuera no podría tener una edad superior a 1.500 millones de años... Algo que sabemos que no es cierto, porque la datación de las rocas lunares da una cifra de unos 4.500 millones de años (Ma).[40] Por tanto, la Luna debe haber estado alejándose más despacio en el pasado, aunque no se sabe exactamente cómo ha evolucionado el ritmo al que se ha estado alejando de la Tierra a lo largo del tiempo.

Los datos derivados de las ritmitas de distintas épocas sugieren que el eje semimayor de la Luna, el punto de su órbita en el que se encuentra más lejos de la Tierra, era de unos 350.000 kilómetros hace 1.000 Ma, unos 325.000 kilómetros hace 2.000 Ma y 275.000 kilómetros si nos remontamos 3.000 Ma en el pasado.[41] Es muy difícil obtener datos de rocas más antiguas, porque a lo largo de todo este tiempo las placas tectónicas han estado renovando el material de la superficie terrestre, tragándose continentes enteros y escupiendo otros nuevos pero, en cualquier caso, las simulaciones sugieren que la Luna pudo haberse encontrado tan sólo a una distancia de entre 20.000 y 30.000 kilómetros de la Tierra en el momento de su formación, así que pudo existir un período en el pasado en el que se alejó de nosotros a un ritmo más acelerado.

Hubiera estado bien poder presenciar el panorama, pero ¿por qué la Luna se está alejando de nosotros?

Te responderé con otra pregunta: ¿te has fijado alguna vez en que siempre vemos la misma cara de la Luna en el cielo?

Ah, sí, ahora que lo dices es verdad.

Pues resulta que el motivo por el que nuestro satélite se está alejando es el mismo por el que siempre vemos su misma cara.

La Luna no sólo se ha estado alejando con el tiempo sino que, además, la rotación de la Tierra se está ralentizando a medida que lo hace. Y esto lo sabemos gracias a los corales. A los corales fosilizados, para ser más concretos.

Muchas especies de coral aumentan sus probabilidades de sobrevivir a través de las relaciones simbióticas que establecen con una especie de alga: el coral caza presas microscópicas con sus

tentáculos y libera dióxido de carbono y nitratos que el alga necesita para realizar la fotosíntesis. A cambio, el alga le proporciona al coral parte de los nutrientes que sintetiza con la luz del Sol.

Por otro lado, los corales crecen muchísimo más durante el día que durante la noche gracias a la energía extra que les proporciona la actividad fotosintética de las algas. Como resultado, el grosor de la nueva capa de carbonato de calcio que depositan en su estructura cada día depende de los nutrientes de los que dispongan: en verano depositan capas más gruesas de material que en invierno, ya que en esta época del año las algas disponen de más horas de sol.

Por tanto, se puede conocer la edad de un coral contando cuántas capas ha depositado en el arrecife, igual que si contáramos los anillos de un árbol. Pero, además, como el grosor de cada capa depende de las horas que el Sol estuviera brillando ese día, en la secuencia de capas de un coral se puede distinguir el paso de las estaciones y cuántos ciclos de día y noche transcurrían cada vez que las estaciones completaban uno de sus ciclos. En otras palabras, se puede saber cuántos días tiene un año analizando los estratos del coral.

Por suerte, las estructuras de carbonato de calcio se fosilizan muy fácilmente y los corales empezaron a aparecer sobre la Tierra hace unos 500 millones de años, de manera que hoy en día podemos calcular cuántos días tenía un año en el pasado observando estas capas fosilizadas. Y de su estudio se ha descubierto que, hace 400 millones de años, cada año tenía 400 días en vez de 365,[42] lo que significa que la Tierra debía completar una rotación sobre su eje en 21,9 horas en vez de las 24 horas actuales.

La Tierra es mucho más antigua, por supuesto, así que esta técnica no nos permite remontarnos hasta épocas anteriores al origen de los corales, pero nos permite corroborar que, en efecto, su rotación se ha estado ralentizando con el tiempo. Para estudiar la evolución de la rotación del planeta con el tiempo en el pasado más lejano también se pueden utilizar las ritmitas, pero me parecía interesante exponer otro sistema que da los mismos resultados.

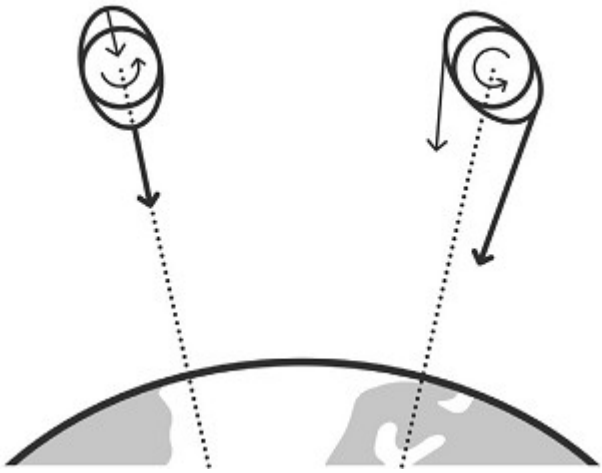
Total, que las ritmitas nos dicen que hace 900 millones de años el día duraba alrededor de 20 horas y hace 2.450 millones de años esta cifra era aún menor, con 17,5 horas.[43] Tampoco se sabe exactamente cuál era la velocidad de rotación de la Tierra poco después de su formación por el mismo motivo que he comentado antes pero se estima que, al principio, el día pudo llegar a durar hasta 5 o 6 horas.

Y la Luna es la causante de que los días se hayan alargado durante todo este tiempo.

Había comentado que los bultos gravitatorios de dos objetos que dan vueltas alrededor de un centro de gravedad común intentan estar alineados en dirección a éste pero, en realidad, hubo un tiempo en el que los bultos gravitatorios de la Tierra y la Luna estaban desviados.

Siempre vemos la misma cara de la Luna porque nuestro satélite completa una rotación sobre su propio eje en el mismo tiempo que tarda en dar una vuelta a nuestro alrededor. Pero esto no siempre fue así: cuando la Luna se formó después del gran impacto, debía rotar mucho más deprisa que ahora.

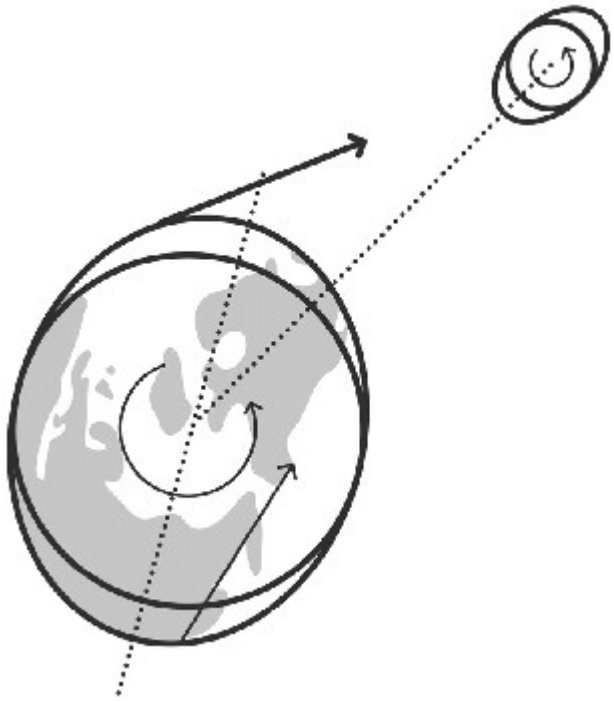
Debido a su cercanía a la Tierra en el momento de su formación, la Luna estaba mucho más deformada por el efecto de las mareas y su rápida rotación descentró totalmente su bulto gravitatorio. Pero, curiosamente, como el bulto estaba descentrado, el campo gravitatorio de la Tierra tenía una influencia mayor sobre uno de los extremos de la Luna que sobre el otro. Este tirón gravitatorio descompensado actuaba en dirección contraria a la rotación de la Luna y, con el tiempo, fue frenando la rotación de nuestro satélite hasta su ritmo actual mientras alineaba su bulto gravitatorio en la dirección que le correspondía.



Este fenómeno se llama *acoplamiento de marea* y es el motivo por el que nuestro satélite ha terminado rotando al mismo ritmo que da vueltas a nuestro alrededor y, por tanto, siempre vemos la misma cara de la Luna. De hecho, hasta 1959, cuando la misión soviética Luna 3 dio la vuelta a la Luna y tomó fotografías de su viaje, ningún ser humano había podido observar la cara oculta de nuestro satélite.

Pero ahí no acaba la historia: el bulto gravitatorio de la Tierra tampoco quedó orientado en la dirección correcta tras el impacto que dio lugar a nuestro satélite y hoy en día sigue estando descentrado con respecto al bulto de la Luna.[44] Como resultado, la Luna recibe un tirón gravitatorio un poco mayor en la dirección en la que da vueltas a nuestro alrededor y, consecuentemente, su velocidad va aumentando ligeramente con el tiempo.

Y, como hemos visto, aumentar la velocidad de un objeto que está en órbita hace que éste migre hacia una órbita más alejada. Así que ahí lo tienes, *voz cursiva*: la Luna se aleja de la Tierra porque nuestro planeta la está acelerando lentamente y seguirá alejándose hasta que la gravedad de nuestro satélite consiga alinear el bulto gravitatorio de la Tierra. Llegados a ese punto, nuestro satélite ya no recibirá un empujón extra en ninguna dirección y dejará de alejarse.



De hecho, el efecto «alineador» de la Luna es lo que está ralentizando la rotación de nuestro propio planeta y lo seguirá haciendo hasta que haya cumplido su objetivo, aunque tampoco es que el fenómeno tenga una magnitud apreciable durante el transcurso de una vida humana: en la actualidad, la Luna alarga nuestros días aproximadamente 2,3 milisegundos cada siglo.[45]

Cuando llegue el día en el que los bultos se alineen, la Luna se habrá alejado tanto que tardará 47 días en completar una vuelta alrededor de la Tierra y, además, los dos objetos rotarán a la misma velocidad, lo que significa que nuestro satélite permanecerá para siempre encima del mismo punto del planeta y sólo la mitad del mundo podrá contemplarla. Pero, bueno, aún faltan unos 50.000 millones de años para que esto ocurra.

EL EFECTO DE LA GRAVEDAD SOBRE LA VIDA

Todas las formas de vida que se pueden encontrar hoy en día en la Tierra son los descendientes de incontables generaciones de organismos que se han visto obligados a adaptarse a su entorno cambiante desde que aparecieron las primeras bacterias, hace unos 3.700 millones de años.[46] Las fluctuaciones del clima (que ocurren con frecuencia en escalas de tiempo geológicas) han sido el principal causante de estos cambios que, durante miles de millones de años, han diezmado las poblaciones de incontables especies, llevándose por delante a los individuos que estaban peor preparados para sobrevivir en el nuevo paradigma. Cuando esto ocurría, la descendencia de los supervivientes heredaba las características ventajosas de sus progenitores y poco a poco iban ocupando los nichos que habían dejado sus compañeros caídos... Hasta que las condiciones volvían a cambiar y tocaba enfrentarse de nuevo al siempre amenazante fantasma de la extinción.

Pero, curiosamente, hay algo que ha permanecido constante al margen de todo este cambio: la intensidad del campo gravitatorio de nuestro planeta. Esto significa que la misma intensidad gravitatoria que moldeó la vida en sus primeros momentos ha seguido condicionándola durante miles de millones de años a medida que la evolución iba dando lugar a organismos cada vez más complejos.

Por supuesto, es obvio que la gravedad tiene un gran impacto sobre la vida de manera indirecta, ya que su influencia rige muchos procesos químicos, biológicos y ecológicos a gran escala que afectan directamente a la evolución de los seres vivos. Permite que la lluvia caiga, determina la dirección en la que fluye el agua y su influencia separa las sustancias por densidad, lo que a su vez permite que el aire y el agua circulen debido a las diferencias de temperatura, por poner algunos ejemplos. No me voy a andar por las ramas en esa dirección porque es obvio que estos fenómenos producidos por la gravedad han condicionado la evolución de la vida en la Tierra.

Vaya, esto es nuevo, una excusa para no andarte por las ramas.

Qué gracia, *voz cursiva*. Pero algo que resulta menos obvio es cómo ha influenciado el campo gravitatorio de la Tierra a los propios cuerpos de los organismos que llevan miles de millones de años adaptándose a él.

Por ejemplo, no es ninguna casualidad que el animal con más masa que jamás haya existido en nuestro planeta, la ballena azul, viva en el océano: al pasar la vida en el agua, el peso de sus 200 toneladas queda repartido de manera uniforme por toda la superficie de su piel, de manera que cada centímetro cuadrado de su cuerpo tiene que soportar una fracción minúscula de su peso total.

Pero los límites que la gravedad impone en tierra firme son más estrictos.

Elevar una masa en el aire y añadirle unos soportes articulados móviles con los que se pueda apoyar contra el suelo (una manera enrevesada de decir «un cuerpo con piernas y pies») es un modo muy eficiente de mover un cuerpo través de un terreno irregular, el tipo de terreno predominante en nuestro planeta hasta que empezamos a construir carreteras. Pero, si tu idea es convertirte en el organismo con mayor masa que jamás ha existido, esta estrategia tiene un problema: el peso de todo tu cuerpo estará concentrado en unos pocos puntos de apoyo bastante pequeños. Como resultado, los esfuerzos que tendrán que soportar tu esqueleto y tu musculatura serán muchísimo mayores que los que aguanta un organismo acuático.

Espera, que he encontrado un fallo en tu «narrativa oficialista». ¿Cómo explicas entonces la existencia de dinosaurios? ¿Cómo pudieron volverse tan grandes sin que la gravedad fuera más débil en el pasado? ¿Y por qué hoy en día no vemos animales tan grandes en tierra firme?

Pues resulta que los dinosaurios tenían estrategias que les permitían alcanzar tamaños colosales sin que sus cuerpos se desmoronaran.

Los dinosaurios más pesados que se conocen son del género *Argentinosaurus* y vivieron hace entre 94 y 97 millones de años. Al parecer, estos animales eran tan grandes que el ganadero que encontró el primer fósil de una pierna en su rancho la confundió con el tronco de un árbol petrificado. El más grande de este género de dinosaurios fue el *Argentinosaurus huinculensis*, una bestia que cargaba entre 70 y 100 toneladas sobre sus patas y medía 40 metros de longitud.[47]

Cien toneladas es una barbaridad para un animal terrestre, claro. Y más para un mamífero. El mamífero más grande del que tenemos constancia en el registro fósil es el *Indricotherium transouralicum*,[48] una especie de rinoceronte de 4,8 metros de altura, 8 de longitud y una masa estimada de entre 15 y 20 toneladas.

Qué injusticia, ¿no? ¿Por qué los mamíferos no podemos ser tan grandes y fuertes como los dinosaurios?

Pues porque por el mero hecho de no ser mamíferos, los dinosaurios podían usar una serie de triquiñuelas evolutivas que les permitirían alcanzar tamaños colosales.

En primer lugar, en comparación con su tamaño, los dinosaurios no eran tan pesados (o, mejor dicho, masivos). Por ejemplo, el célebre *Tyrannosaurus rex* medía entre 4,6 y 6 metros de altura y hasta 12,4 metros de longitud desde el hocico hasta la cola, pero tan sólo pesaba entre 5 y 7 toneladas. En comparación, el elefante africano más grande del que conocemos con precisión la masa medía 4 metros de altura y pesaba 10,4 toneladas.[49]

Esto se debe, en parte, a que los huesos de los dinosaurios estaban llenos de huecos que les permitían aligerar el peso a la vez que mantenían su resistencia estructural.[50] O sea que, aunque las 100 toneladas del dinosaurio más grande parezcan una barbaridad, proporcionalmente su esqueleto estaba soportando un esfuerzo mucho menor del que un mamífero de ese tamaño tendría que soportar.

Conociendo el efecto que tiene la gravedad sobre el tamaño de los animales, no os extrañará descubrir que esta fuerza también impone un límite a la altura de los árboles, una cifra que ronda entre los 130[51] y 138[52] metros: si la copa de un árbol se encuentra a una altura mayor, el agua no podrá subir hasta ella a través del tronco y sus hojas se secarán.

Pero, en el otro extremo de la balanza, se cree que el efecto de la gravedad también determina el tamaño máximo que pueden alcanzar las células.

¿Qué dices? ¿Las células? ¿Con lo pequeñas que son?

En efecto, *voz cursiva*. Las células eucariotas, aquellas que contienen un núcleo donde guardan el ADN y que son capaces de unirse entre sí para formar organismos multicelulares, no suelen superar los 10 micrómetros de diámetro. Y resulta que las investigaciones recientes sugieren que la causa de esta limitación de tamaño podría ser la gravedad.

Los óvulos (que son células eucariotas) de la especie de rana *Xenopus laevis* llegan a alcanzar 1 mm de diámetro y su núcleo está rodeado por una estructura hecha de una proteína llamada actina que actúa como una especie de esqueleto celular (citoesqueleto es su nombre técnico). Dos investigadores de la Universidad de Princeton, Marina Feric y Clifford Brangwynne, se dieron cuenta de que cuando eliminaban esta estructura que rodea el núcleo, éste caía hasta el fondo de la célula, donde terminaba pegándose a la membrana celular. Por tanto, los investigadores creen que la mayoría de las células no superan las 10 micras de diámetro porque no han desarrollado esta estructura que les permite contrarrestar el efecto de la gravedad y que, sin ella, los óvulos de esta rana no llegarían a alcanzar su tamaño anormalmente grande.[53]

Más allá de estos descubrimientos, también hemos podido aprender mucho sobre el efecto de la gravedad sobre la vida desde que somos capaces mandar organismos al espacio y ponerlos en órbita alrededor de la Tierra a bordo de nuestros satélites.

LAS PRUEBAS ORBITALES

Dicen que no sabes lo que tienes hasta que lo pierdes. De manera parecida, los seres humanos nos dimos cuenta de lo importante que es la gravedad cuando empezamos a poner seres vivos a la órbita baja terrestre.

En 1947, un globo sonda que iba cargado de semillas ascendió 30 kilómetros a través de la atmósfera. Aunque las semillas no llegaron oficialmente al espacio, cuya frontera se considera que se encuentra a unos 100 kilómetros de altura, posiblemente batieron el récord de altura alcanzada por cualquier organismo desde que emergió la vida en nuestro planeta (suponiendo que el meteorito que extinguió a los dinosaurios no colocara algún animal en órbita, claro). El objetivo de esta prueba era estudiar el efecto de la radiación cósmica sobre las semillas.

El efecto de esta radiación sobre los seres vivos tenía un gran interés médico porque el objetivo final era enviar seres humanos al espacio y había que saber a qué nos enfrentábamos, así que para 1960 se habían mandado 90 globos aerostáticos hacia las alturas cargados con todo tipo de organismos para ver cómo respondían ante ella. Y cuando digo todo tipo, me refiero a todo tipo: en los documentos que he encontrado se detallan experimentos con semillas de una gran variedad de plantas, ratas, hámsteres, gatos y perros (tanto anestesiados como despiertos), moscas de la fruta, cebollas, patatas, trozos de piel humana, huevos fertilizados de gallina, monos, conejillos de Indias (no podían faltar), varios cultivos de distintos tejidos, huevos de saltamontes, albúmina de huevo, hojas, pétalos, huevos de artemia (un tipo de crustáceo), peces de colores, mohos, algas, huevos de mosquito, células inmortales HeLa, muestras de tuétano o bacterias de E. Coli, por poner algunos ejemplos.

Lo que más me ha llamado la atención del documento del que he sacado la información[54] es lo aleatoriamente que parecía organizada la «carga» de los globos en cada una de las pruebas. Por

ejemplo, aparece registrado un globo aerostático lanzado desde Dakota del Sur el 1 de noviembre de 1953 que llevaba encima «14 hámsteres, 30 ratones blancos, 1.000 moscas de la fruta, 13 ratones negros, 3 cebollas rojas, 1 cebolla marrón y 2 cebollas blancas».

Estos experimentos, que algunas veces terminaban en tragedia para los animales involucrados, sirvieron para desarrollar los sistemas vitales y de recuperación de los vehículos que empezarían a llevar (y traer de vuelta) humanos al espacio en 1957, además de dar a los investigadores una idea de cuál podría ser su respuesta psicológica.

Como podéis imaginar, estos globos no se alejaban lo suficiente de la superficie terrestre como para que sus «pasajeros» sintieran algún cambio significativo en la gravedad. De hecho, a 30 kilómetros de altura la intensidad de la gravedad es prácticamente la misma que en la superficie terrestre.

Pero para eso estaban los cohetes.

Tras la Segunda Guerra Mundial, los aliados se apropiaron del arsenal de misiles V-2 que tenían los nazis y que, en su época, eran una tecnología única en el mundo. En Estados Unidos empezaron a aprovechar estos misiles nada más terminar la guerra, mandando unas semillas a 134 kilómetros de altura el 9 de julio de 1946, con lo que oficialmente se había cruzado la frontera del espacio. Las semillas no pudieron recuperarse, pero esto les animó para seguir haciendo pruebas. El día 30 de ese mismo mes ya habían conseguido lanzar y recuperar semillas de maíz.

Los siguientes astronautas oficiales fueron unas moscas de la fruta que alcanzaron los 109 kilómetros de altura (en sólo 3 minutos y 10 segundos) el 20 de febrero de 1947... Y volvieron a la Tierra sanas y salvas.[55] A finales de 1950 ya se estaban mandando cohetes al espacio con regularidad, pero se trataba de vuelos suborbitales que estaban lejos de completar una vuelta alrededor de la Tierra. Básicamente, trazaban una trayectoria parabólica más o menos amplia y volvían a caer hacia la superficie, de manera que los

organismos que contenían en su interior (en su mayoría ratas y monos, aunque se seguían mandando cebollas de vez en cuando) no experimentaban la ingravidez durante largos períodos de tiempo.

Ningún organismo experimentó una exposición a la ingravidez prolongada superior a unas pocas horas hasta que se logró colocar un vehículo tripulado (por animales) en una órbita estable el 19 de agosto de 1960. El vehículo en cuestión era el *Sputnik 5*, que llevaba a bordo a los perros *Belka* y *Strelka*, además de un conejo gris, 40 ratones, 2 ratas y 15 frascos llenos de moscas de la fruta.[56] Y, como novedad, volvieron todos vivos. Lamentablemente, ninguna cebolla formó parte de este momento histórico.

Con este nuevo hito, los soviéticos acababan de abrir la puerta para estudiar cómo reacciona la vida ante largos períodos de ingravidez.

Por ejemplo, a bordo de la misión Apollo 14 de 1971, una de las seis que aterrizarían en la superficie lunar, se mandaron quinientas semillas de distintos tipos de árboles. Las semillas no bajaron hasta la superficie de la Luna, sino que se quedaron en el módulo lunar dando vueltas alrededor de nuestro satélite durante la misión. De vuelta en la Tierra, las semillas de los llamados «árboles lunares» se plantaron por todo el país y no se observó ninguna diferencia en su crecimiento respecto a los árboles cuyas semillas se habían quedado en Tierra.

Ufff... Mandar plantas al espacio para ver qué pasa cuando las traemos de vuelta me parece una pérdida de tiempo y dinero.

Pues no creas, *voz cursiva*. Estudiar el efecto de la ingravidez en las plantas nos permite identificar qué factores les impiden desarrollarse en el espacio e idear soluciones para superarlos.

Y así, de paso, tener la Estación Espacial Internacional bien decorada con el dinero de los contribuyentes, ¿verdad?

Teniendo en cuenta que mandar un kilo de material al espacio cuesta entre 4.300 y 40.000 euros,[57] en un futuro las plantas podrían ayudarnos a reducir costes al sustituir parcialmente tecnologías pesadas y complejas que cuesta un ojo de la cara sacar

del planeta. Dos de esas tecnologías son los equipos hidrolíticos que producen el oxígeno que los astronautas respiran a partir de la electrólisis del agua o los trozos de zeolita que atrapan el dióxido de carbono de la cabina y que tienen que ser expuestos al vacío periódicamente para regenerarlos. Las plantas no sólo atrapan dióxido de carbono y producen oxígeno, sino que además proporcionan alimento que, de otra manera, tiene que ser enviado desde Tierra.

Pero la agricultura espacial ha resultado ser una cuestión más complicada de lo que se creía.

Lo primero que necesita una planta para crecer correctamente en el espacio es un contenedor que simule las condiciones que la gravedad crea en la Tierra. Sin un suelo compacto que retenga la humedad y los nutrientes de manera más o menos uniforme, las raíces no sólo tienden a desperdigarse en alguna dirección aleatoria en vez de hundirse de manera vertical y simétrica, sino que las semillas tampoco saben hacia dónde proyectar sus tallos para empezar a crecer.[58] Las condiciones de ingravidez (o mejor dicho, microgravedad) que experimenta un satélite en órbita también dificultan la convección del aire alrededor de la planta, lo que puede terminar rodeándola con el propio aire pobre en dióxido de carbono que acaba de procesar.

Esto puede resultar especialmente perjudicial porque el ambiente que rodea las plantas puede acabar cargado de etileno, una hormona que ellas mismas producen pero que puede causar muchos problemas (desde un mal crecimiento hasta la esterilidad) si no son capaces de deshacerse de ella a través de la circulación del aire.[59]

Después de intentar plantar cebollas, guisantes, lechuga, rábanos, trigo, ajo, pepinos, perejil y eneldo sin éxito, los rusos consiguieron por primera vez que una planta desarrollara semillas en el espacio en 1982. Se trataba de plantas del género *Arabidopsis*, elegidas porque sólo tardan cuarenta días en alcanzar la madurez. Aun así, las semillas que dio esta planta resultaron ser estériles,

precisamente porque la estación espacial rusa en la que se desarrolló el experimento, la Salyut 7, no tenía la ventilación adecuada.[60]

Las primeras plantas que completaron todo su ciclo vital en el espacio (desde la siembra) pertenecían a la especie *Bressica rapa* y produjeron semillas fértiles en la estación espacial MIR en 1997.[61]

¿Y cómo pudieron dar semillas sin abejas que polinizaran sus flores?

Se polinizaron a mano, claro. El primer intento se fue al traste porque, mientras tenía lugar el experimento, la estación espacial pasó tres días sin luz ni ventilación y a una temperatura de unos 5 °C por un fallo eléctrico, así que las semillas que dio la planta fueron pequeñas y muy débiles. Por suerte, las plantas producidas en una segunda prueba dieron varias semillas viables: cuatro de las seis semillas que se plantaron en la estación espacial crecieron hasta convertirse en plantas adultas y las otras dos lo hicieron en tierra firme.

Hoy en día los astronautas dominan mucho mejor la agricultura espacial. Aún se están investigando varios sistemas de cultivo, pero el más simple de todos es el Vegetable Production System (VEGGIE) de la NASA,[62] que no son más que unos «cojines» llenos de tierra compacta y bolitas de fertilizante en los que las semillas se insertan en la orientación adecuada para que la planta crezca verticalmente de manera natural. Las plantas están iluminadas por LEDs y, aunque la luz azul y la roja les basta para realizar la fotosíntesis, el montaje también incluye luces verdes para que los astronautas puedan ver mejor el color de las hojas, que de lo contrario presentan un tono violeta oscuro.

Este sistema dio sus mejores resultados en 2015 cuando, por primera vez, los astronautas de la Estación Espacial Internacional pudieron comer lechuga producida en el espacio.[63] Eso sí, no se pudieron comer las primeras lechugas que consiguieron producir

porque tuvieron que mandarlas a la Tierra para comprobar que eran seguras, así que se tuvieron que conformar con la segunda ronda que cultivaron.

Aún queda mucho para empezar a producir frutas y verduras más complejas en el espacio pero, sea como sea, está claro que vamos a tener que llevar plantas con nosotros cuando empecemos a colonizar otros mundos, porque estaremos demasiado lejos de la Tierra como para depender de las provisiones que nos puedan enviar ocasionalmente.

Pero, por supuesto, mandar plantas al espacio es sólo una parte de nuestra aventura de salir del planeta Tierra. En última instancia, el factor más crítico que debemos estudiar de cara a la colonización de otros mundos es la influencia de la gravedad (y la radiación del espacio) en nuestros propios cuerpos.

Más allá de los experimentos que se realizaron entre 1946 y 1960, en tiempos más recientes se han colocado muchos animales en órbita baja terrestre para estudiar tanto su reacción como su viabilidad reproductiva en condiciones de ingravidez, ya que podrían servir como alimento para los astronautas a largo plazo. Entre ellos, los rusos estaban especialmente interesados en criar codornices en órbita debido a su tamaño reducido y el alto contenido nutricional tanto de sus huevos como de su carne.[64]

En 1979 llevaron los primeros huevos de codorniz a la estación espacial MIR. En la superficie de la Tierra, las aves dan la vuelta a los huevos varias veces cada día para evitar que la yema se adhiera a la pared interior de la cáscara, lo que puede provocar malformaciones en el embrión. Pero la incubadora que los rusos mandaron al espacio no ofrecía la posibilidad de girar los huevos de vez en cuando y, como resultado, cuando se devolvieron a la Tierra se descubrió que todos los embriones que se habían desarrollado eran acéfalos. O sea, que no tenían cabeza.

Una segunda tanda de sesenta huevos se mandó en una nueva incubadora que sí permitía rotar los huevos manualmente. Por desgracia, no se pudieron sacar muchas conclusiones de este

experimento porque 59 de los sesenta huevos habían sufrido una grave deshidratación o se habían roto durante la reentrada del vehículo en la atmósfera. El único huevo que sobrevivió contenía un embrión aparentemente normal... Pero, claro, estadísticamente, un solo individuo no proporciona mucha información sobre el grupo al que pertenece.

El tercer intento de incubar codornices espaciales tuvo que esperar hasta 1990, cuando ocho polluelos salieron del cascarón de entre los 33 huevos que se enviaron a la MIR ese año. Sin saberlo, estos polluelos se habían convertido en los primeros animales vertebrados en nacer en condiciones de ingravidez desde que apareció la vida en la Tierra (suponiendo de nuevo que el meteorito que extinguió a los dinosaurios no mandara al espacio ningún huevo que estuviera a punto de eclosionar). Ese mismo año se llevaron otras siete codornices adultas a la estación espacial rusa para ver cómo respondían ante la ingravidez y los resultados fueron... Bueno, curiosos.

Los polluelos de codorniz son muy activos y empiezan a caminar y alimentarse por sí mismos nada más nacer, así que no necesitan quedarse quietos en un nido mientras sus padres los alimentan. En las condiciones de ingravidez, los polluelos siguen tan activos como lo están en tierra... Pero el tema del movimiento es bastante más enrevesado.

Después de nacer e intentar caminar, los polluelos se pasaban el rato dando vueltas sin control de un lado a otro de su cámara, moviendo las alas y las patas para intentar estabilizarse mientras chocaban unos contra otros y contra las paredes del habitáculo. Se había instalado una redecilla en su compartimento con la esperanza de que las codornices se fijarían a ellas con las garras, pero las expectativas de los astronautas nunca se cumplieron. Además, los polluelos sólo eran capaces de comer si algún astronauta los sujetaba porque, de lo contrario, picotear la comida sólo les servía

para propulsarse en la dirección contraria. En resumen, según palabras de uno de los tripulantes que llevó a cabo el experimento: «vivían en un estado continuo de confusión».

En general, en los experimentos realizados entre 1990 y 1998 se observó que las condiciones de ingravidez orbitales tenían un efecto significativo en el desarrollo fetal de los pájaros, ya que el 50 % de los huevos enviados a la estación espacial nunca llegaban a eclosionar debido a las complicaciones derivadas del desarrollo de anomalías fisiológicas (malformaciones en la cabeza y extremidades o los órganos desplazados). Estas cosas también pasan de vez en cuando en tierra firme, claro, pero en el espacio la incidencia es mucho mayor. Además, también se ha notado que los embriones que se han desarrollado en el espacio tienen una masa corporal un 30 % menor que los que se quedan en Tierra.

Otro tipo de animales que se han llevado al espacio con consecuencias «interesantes» han sido los insectos. En concreto, insectos voladores.

Por ejemplo, en un documento[65] de 1982 se describen los resultados de varias pruebas en las que se pretendía observar el comportamiento de las moscas, las polillas y las abejas (tres insectos que tienen distintas formas de volar) en situaciones de ingravidez. Los insectos se cargaron en unas cajas que contenían varios compartimentos en los que podían comer y beber y, además, sus caras interiores estaban cubiertas tanto de superficies de plástico liso como de mallas a las que los insectos podían agarrarse. El experimento se llevó a cabo a bordo del *STS-3*, la misión del Space Shuttle que permanecería en órbita del 22 al 30 de marzo de ese mismo año. El experimento contaba con la colaboración de 12 moscas y 24 polillas que nacerían durante el transcurso del mismo y de 24 polillas y 14 abejas que se llevaron al espacio ya en fase adulta.

Al tercer día en órbita empezaron a nacer las moscas y las polillas. Según los astronautas, las moscas pasaban la mayor parte del tiempo caminando por las paredes de la caja, separándose para

volar durante unos 4 segundos, sin presentar demasiada dificultad para moverse de un lado a otro. El comportamiento de las polillas jóvenes, en cambio, era bastante más absurdo: fueron observadas flotando en la caja sin mover las alas (tanto extendidas como encogidas) en períodos de entre 5 segundos y 3 minutos. Curiosamente, las polillas que habían llegado al espacio en fase adulta no exhibían esta «afición». Tendían a perder su ángulo durante el vuelo, pero se podían mover por la caja y agarrarse a cualquier superficie sin demasiados problemas.

La actuación de las abejas fue bastante más caótica, ya que éstas no sólo parecían incapaces de pegarse a las superficies lisas de las cajas, sino que además terminaban girando sin control cada vez que intentaban volar. En el documento se puede leer:

> En una ocasión, dos abejas fueron observadas juntas en la red. Las dos abejas abandonaron la red «enganchadas» y girando rápidamente, una situación que duró unos 25 segundos. Tras separarse, las dos abejas se alejaron girando en direcciones diferentes.

Un análisis posterior de los cuerpos de los insectos reveló que el comportamiento de las abejas podría haber sido provocado en parte por la falta de comida, ya que la solución que se les suministró parecía no contener suficiente azúcar.

Como una nota aparte, me gustaría citar esta otra frase del documento:

> [en Tierra], las heces de las polillas cubrían el área del perímetro de la caja, con la mayor concentración cerca del comedero. En la de 0 g [sometida a la ingravidez], una cobertura homogénea de heces estaba presente por toda la caja.

Una observación curiosa, sin duda.

¡Bah! ¡Otro gasto de dinero absurdo! ¡Molestar a unos bichos mandándolos al espacio!

No, claro que no. Si el único objetivo de las agencias espaciales fuera molestar a los insectos, podrían hacerlo en tierra firme sin gastar un dineral. Llevar a los insectos al espacio sirve para estudiar su reacción ante la ingravidez y observar cómo se ve afectada su mecánica de vuelo, que son datos que pueden resultar útiles tanto para entender mejor la anatomía de estos animales como para desarrollar nuevas tecnologías en el futuro. No pongas esa cara, *voz cursiva*, que ya se han diseñado drones minúsculos inspirados en la mecánica de vuelo de las abejas.[66]

Pero, si tanto te preocupa el gasto de dinero, te diré que en la actualidad existe una técnica que permite recrear las condiciones de ingravidez durante breves períodos de tiempo sin necesidad de poner ningún vehículo en órbita y, por tanto, quemar la cartera: los *vuelos parabólicos*.

Durante un vuelo parabólico, un avión es capaz de reproducir momentáneamente las condiciones de ingravidez que se dan en órbita. Esto lo consiguen elevándose en el aire en un ángulo de 45 °C con el suelo, bajando la potencia de los motores durante el pico de la parábola para simular la caída libre y bajando otra vez en el mismo ángulo, recuperando la potencia de los motores de nuevo. La sensación de ingravidez aparece durante unos 25 segundos en la parte más alta del vuelo, en la cual el avión se encuentra en caída libre. En total, la maniobra dura unos 65 segundos.



A los aviones que hacen estos vuelos se les llama oficialmente «Weightless Wonders» (Maravillas Ingrávidas) pero, extraoficialmente, la gente que los ha experimentado los suele llamar «Vomit Comets». No creo que haga falta traducir esta expresión, sobre todo teniendo en cuenta que John Yaniec, el director del Reduced Gravity Program de la NASA señaló que «un tercio de la gente [que experimenta la ingravidez en estos aviones] se pone violentamente enferma, otro tercio moderadamente enferma y el último tercio no siente nada».[67] Y por «enferma», se refería a la acción de vomitar, claro.

Estos vuelos que simulan la ingravidez durante períodos cortos de tiempo son una alternativa mucho más práctica y barata para ciertos experimentos que no requieren exposiciones prolongadas a las condiciones de ingravidez. El método es tan accesible que hay empresas que incluso ofrecen este servicio al público general (la más barata que he podido encontrar vende la experiencia por unos 5.000 dólares, por si os interesa).

Como resultado, se ha abierto una nueva dimensión de perrerías que se les pueden hacer a todo tipo de animales. Por ejemplo, se han llevado palomas adultas a bordo de estos aviones para ver cómo reaccionan ante la ingravidez. Al parecer, los pájaros no tienen ninguna manera de orientarse sin la gravedad y terminan volando en todas las direcciones, algunas veces incluso boca abajo, después de soltarlos.[68]

Lo que también notaron los investigadores que acompañaban a las palomas es que los pájaros tendían a quedarse bloqueados haciendo tirabuzones de espaldas. Los investigadores creen que esto podría deberse a que la paloma estaba notando que «caía hacia adelante» (una sensación que experimentan los astronautas humanos bajo condiciones de ingravidez)[69] y estaban intentando contrarrestar el movimiento, aunque también podría ser que intentaran crear algo de «gravedad artificial» en sus cabezas generando aceleración centrífuga.

Nuestros amigos los gatos también han sido pasajeros en los vuelos parabólicos, ya que se quería estudiar de qué manera se ve afectado el reflejo que les hace caer siempre de pie en gravedad cero. En vez de describir sus experiencias, os recomiendo que veáis directamente los vídeos.[70]

¡Basta de curiosidades! Al principio del capítulo me has dicho que Newton no había acertado del todo con su teoría gravitatoria y sigo esperando una explicación.

Ay, sí, perdona, *voz cursiva*. Me había olvidado de Einstein por completo.

LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD

Como hemos visto, Newton había planteado una descripción de la gravedad que tenía un poder predictivo respetable, pero no acertó al asumir que la gravedad es una fuerza. Ojo, que no le estoy quitando mérito a su trabajo. Su teoría gravitatoria es considerada el primer tratado científico de la historia y fue una contribución crucial para la revolución científica, alejando a la Tierra del centro del universo. Newton ayudó a que el conocimiento diera un paso de gigante, pero aún faltaban detalles por descubrir sobre este fenómeno, en apariencia tan simple.

A medida que el tiempo pasaba, los astrónomos notaron que la teoría de Newton perdía su poder predictivo en algunas situaciones. Por ejemplo, aunque describía las órbitas de los planetas con una precisión sin precedentes, tenía problemas explicando el movimiento de Mercurio, el planeta más cercano al Sol. Tomando como referencia el descubrimiento de Neptuno en función de su interacción gravitatoria con Urano, hubo quien sugirió que un planeta desconocido muy cercano a nuestra estrella estaba alterando la órbita de Mercurio e incluso se bautizó este planeta hipotético con el nombre provisional de Vulcano... Sin embargo, nunca se encontraron indicios de su existencia.

Los astrónomos empezaron a pensar que la teoría de Newton podía estar incompleta. Estaba claro que no estaba equivocada porque conservaba su poder predictivo en la mayoría de las situaciones a las que se aplicaba, pero fallaba cuando se trataba de un objeto que tenía una órbita algo más extrema de lo habitual.

El problema lo corregiría un físico alemán llamado Albert Einstein a principios del siglo XX. Einstein postuló, entre otras cosas, que la gravedad no es realmente una fuerza que aparece entre dos cuerpos, sino el resultado de la deformación sobre el tejido del espacio y el tiempo que provoca la presencia de una masa.

Me he perdido...

Ay, perdona por el salto lingüístico, *voz cursiva*. Rebobinemos un momento.

A juzgar por nuestra experiencia diaria, no nos parece que el espacio y el tiempo estén relacionados de ninguna manera. Puedes correr tan lejos como quieras, incluso hasta el otro lado del mundo, que las manecillas de tu reloj siempre se moverán al mismo ritmo. Sí, vale, a veces te puede parecer que el rato ha pasado más rápido o más despacio, dependiendo de lo que estuvieras haciendo, pero sabes que tu percepción subjetiva no ha alterado el ritmo con el que el tiempo transcurre para el resto de los relojes del planeta.

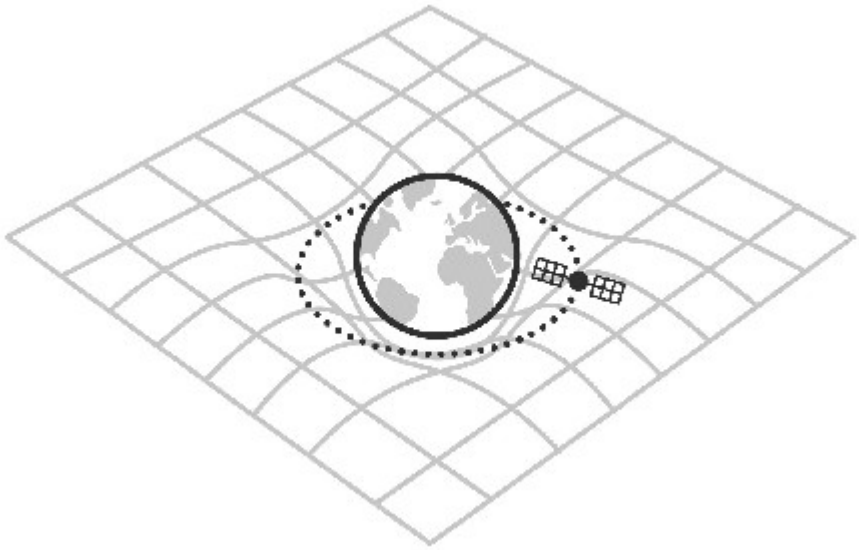
¿Incluso cuando me voy a dormir y un segundo después ya suena la alarma?

Efectivamente, *voz cursiva*, hay gente en otros lugares del planeta que experimenta el equivalente a una jornada laboral entera durante ese breve instante que parece que dura el sueño de una noche.

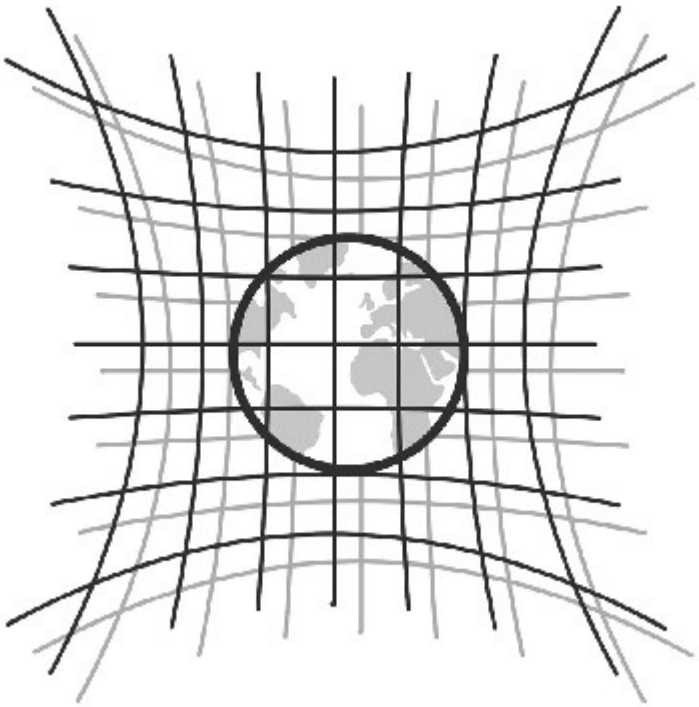
Por otro lado, el tiempo tampoco parece tener ninguna influencia sobre el espacio. Es verdad que las cosas que contiene el espacio (personas, plantas, rocas, planetas o galaxias) cambian con el tiempo, pero el espacio en sí no se ve afectado en absoluto. Dicho de otra manera: un kilómetro siempre ha sido y será un kilómetro.

Hasta aquí todo parece muy razonable pero, a principios del siglo xx, cuando creíamos que no teníamos ningún motivo para pensar que el espacio y el tiempo tienen alguna influencia el uno sobre el otro, llegó Einstein y destrozó esta visión tan cómoda de la realidad: en su teoría de la relatividad general, Einstein planteó que el espacio y el tiempo no son independientes el uno del otro, sino que los dos están fundidos en un continuo que inunda el universo, el llamado tejido espacio-temporal... Y que el campo gravitatorio de un objeto es en realidad la deformación que provoca su masa sobre él.

El típico ejemplo que se utiliza para describir este fenómeno es una malla elástica con una bola encima que representa un planeta. La depresión que forma la bola a su alrededor cuando se coloca encima de la malla sería el equivalente al campo gravitatorio del planeta. Cualquier otro cuerpo más pequeño que se coloque en una de las paredes de este valle tenderá a rodar cuesta abajo y chocar contra la bola, igual que lo haría un objeto que se colocara en un campo gravitatorio. Si ese cuerpo está en movimiento por la superficie de la malla y se cruza con la perturbación provocada por la bola, entonces su trayectoria cambiará en diferente medida dependiendo de la velocidad que lleve: se desviará un poco si va muy rápido o caerá hacia el planeta si se mueve muy despacio. Con la velocidad y trayectoria adecuadas, incluso se podría conseguir que el objeto quedara atrapado en la depresión formada por la bola, dando vueltas alrededor de sus paredes o, como nosotros lo vemos en el mundo real, orbitando alrededor del planeta.



Hay que tener en cuenta, eso sí, que esta deformación espacio-temporal que propone la teoría de la relatividad general de Einstein se produce en un espacio en tres dimensiones, así que la analogía de la malla bidimensional no es del todo precisa. La perturbación que provoca un objeto sobre el espacio-tiempo sería algo más parecido a esto:



Pero es que, además, el hecho de que el espacio y el tiempo formen parte de una misma entidad también implica que la gravedad no sólo modifica la trayectoria de un cuerpo, sino también el ritmo con el que el tiempo transcurre para él.

Sí, claro, casi me la cuelas, Ciencia de Sofá.

No te estoy tomando el pelo, *voz cursiva*: nosotros no somos capaces de notar este tipo de fenómenos porque la evolución nos ha dotado con las herramientas necesarias para sobrevivir, no para desentrañar los secretos del universo. Pero precisamente para eso hemos desarrollado instrumentos nuevos que nos permiten experimentar con nuestro entorno y expandir nuestra visión de la realidad más allá de los límites de nuestros sentidos.

Y resulta que en 1919 apareció una oportunidad para comprobar de manera experimental si Einstein tenía razón o, al menos, si estaba más cerca que Newton de explicar el fenómeno de la gravedad.

La luz no tiene masa así que, si la gravedad era realmente una fuerza que aparece entre dos masas, como había planteado Newton, la trayectoria de un rayo de luz no debería verse afectada en absoluto al pasar a través de un campo gravitatorio. Pero, si Einstein estaba en lo cierto, entonces la luz simplemente seguiría la trayectoria curvada del espacio-tiempo cuando se cruzara con el campo gravitatorio de un objeto masivo y su trayectoria sí que debería verse alterada en su presencia. Por tanto, para ver cuál de los dos genios tenía razón, bastaba con comprobar si la luz se desvía ante la presencia de un campo gravitatorio.

Y eso es algo relativamente fácil de hacer durante un eclipse.

Los astrónomos conocían de manera muy precisa el camino que el Sol y la Luna seguirían por el cielo durante el eclipse de 1919, el momento exacto en el que se cruzarían los dos cuerpos celestes y las posiciones que deberían ocupar las estrellas a su alrededor cuando el eclipse alcanzara su punto álgido. O sea que, para comprobar si la gravedad tiene algún efecto sobre la luz, bastaba con ver si las estrellas que rodean el Sol aparecían en su posición

habitual cuando la Luna bloqueara su luz por completo. Si la posición de las estrellas no era la que cabía esperar, entonces significaría que la gravedad del Sol estaba desviando su luz y haciendo que llegara hasta nuestros ojos en un ángulo distinto.

Y eso es precisamente lo que se observó, confirmando que la teoría de Einstein describía mejor la naturaleza de la gravedad que la de Newton.

A lo largo de los años se han ido encontrando más evidencias que apoyan la teoría de Einstein. Por ejemplo, en 1971 se metieron varios relojes atómicos a bordo de aviones que dieron la vuelta al mundo en direcciones opuestas, con la esperanza de que la fuerza gravitatoria ligeramente menor a esa altura (y la velocidad de las aeronaves, otro factor que afecta al ritmo del tiempo y del que hablaré más adelante) tuviera un efecto medible en el transcurso del tiempo en su interior. Cuando los aviones aterrizaron se comprobó que, efectivamente, la hora que marcaban los relojes que habían dado la vuelta al mundo se había desfasado unos nanosegundos respecto a los que se habían quedado en Tierra y, encima, precisamente en la medida que se había predicho usando las teorías de Einstein.[71]

Un momento, un momento... ¿Qué quieres decir exactamente con que la menor gravedad y la velocidad de los aviones afectaron al transcurso del tiempo?

Se puede simplificar de esta manera: las manecillas de un reloj que se encuentre lejos de un objeto muy masivo (como una estrella o un planeta) se moverán más rápido que las de otro reloj que esté muy cerca de él.

¿Quieres decir que, si logro convencer a las autoridades para que me dejen subir a la Estación Espacial Internacional, de repente empezaré a moverme a cámara lenta?

No, no, en absoluto. En primer lugar porque este efecto es demasiado sutil para que lo apreciemos, incluso estando en órbita. Para que el fenómeno se volviera apreciable tendríamos que

acercarnos mucho a un cuerpo muy masivo, como por ejemplo un agujero negro... Y aun así no empezaríamos a movernos a cámara lenta.

Lo que este fenómeno implica en realidad es que a dos observadores que experimenten una intensidad gravitatoria distinta les parecerá que el tiempo pasa a un ritmo diferente entre ellos. Imaginemos, por ejemplo, que nos encontráramos en el borde de un agujero negro. Nuestros compañeros de misión están dando vueltas alrededor de él a una distancia segura, posiblemente a miles de kilómetros de nosotros pero, gracias a la tecnología del futuro, llevamos encima algún tipo de dispositivo que nos permite verlos a través de las ventanas del satélite en el que se encuentran.

A medida que cayéramos hacia el agujero negro notaríamos una atracción gravitatoria cada vez mayor y veríamos a nuestros compañeros moverse a cámara rápida a través de las ventanas del satélite, como si alguien hubiera pulsado el botón de avance rápido en un viejo reproductor de VHS. Desde el satélite, en cambio, les parecerá que somos nosotros los que nos estamos moviendo cada vez más despacio a medida que nos acercamos hacia el punto de no retorno.

Pero, por separado, nadie notaría que el tiempo está pasando a un ritmo distinto a menos que echara un vistazo a la otra persona: tanto los tripulantes del satélite como nosotros veríamos las manecillas de nuestros propios relojes de pulsera moviéndose a su ritmo habitual. Si tenéis curiosidad por conocer más detalles sobre esta situación, os recomiendo este artículo de 2015 en mi blog Ciencia de Sofá[72] en el que hablaba sobre lo que veríamos si cayéramos en un agujero negro.

Por supuesto, si (de alguna manera) consiguiéramos volver al satélite nos encontraríamos con una tripulación que habría envejecido mucho más que nosotros precisamente debido a esta discrepancia entre el ritmo al que el tiempo transcurriría para cada uno, algo que ocurre en una famosa película de Christopher Nolan que no quiero nombrar para no hacer *spoilers*.

Como comentaba, este efecto es imperceptible en nuestro día a día y no sólo contribuye a él la intensidad del campo gravitatorio en el que estemos metidos, sino también la velocidad a la que nos desplazamos. De hecho, la persona que ha experimentado la mayor dilación temporal, que es como se le llama a este fenómeno, es Sergei Krikalev, un astronauta ruso que pasó 748 días a bordo de la estación espacial MIR dando vueltas alrededor del planeta a unos 360 kilómetros de altura y 7,6 km/s.

¡Guau! ¿Y ahora este tipo es más viejo que nosotros? ¿Cuánto más ha envejecido? ¿Diez años? ¿Cincuenta?

En realidad, su estancia en el espacio le ha hecho 0,02 segundos *más joven*.[73]

¿Cómo que más joven? ¿No decías que el tiempo pasaría más rápido para alguien que se encuentra a mayor altura y, por tanto, que nota una atracción gravitatoria menor?

Y así es pero, como decía, la velocidad también influye en el transcurso del tiempo y, a 7,6 km/s, la MIR se movía a la velocidad suficiente como para compensar e incluso invertir el efecto de la gravedad sobre el tiempo.

Pues menudos ejemplos más inoportunos pones, la verdad.

Tienes razón, pero mi intención iba más encaminada a demostrar que no nos basta con nuestros propios sentidos para comprender los aspectos más profundos de la naturaleza, ya que ni siquiera el ritmo constante al que nos parece que pasa el tiempo es un reflejo fiable de cómo funciona la realidad.

Volviendo a Einstein, la prueba más reciente de la naturaleza de la gravedad como una perturbación en el tejido espacio-temporal es el descubrimiento de las llamadas ondas gravitacionales, cuya existencia estaba implícita en las ecuaciones de la relatividad general. Para detectar estas ondas que se propagan a través del propio espacio-tiempo se tuvo que idear el LIGO, un experimento que tenía lugar en una estructura que contaba con dos «brazos» perpendiculares de 4 kilómetros de longitud. A través de cada brazo pasaba un rayo láser que rebotaba contra un espejo al final de cada

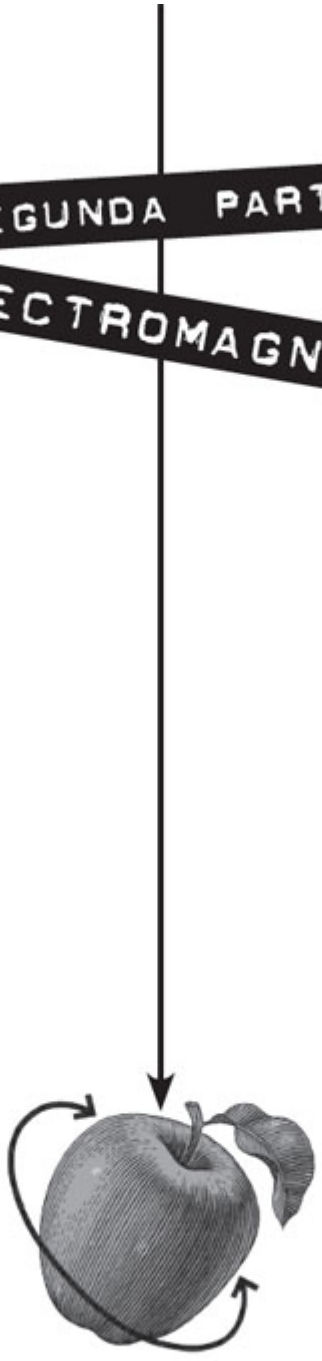
uno y volvía de nuevo hacia el centro de la estructura.[74] El paso de las ondas gravitacionales (producidas por la fusión de dos agujeros negros) a través de la instalación acortó momentáneamente la distancia entre los dos brazos, un cambio que se podía medir gracias a los rayos láser, confirmando que, en efecto, Einstein volvía a tener razón.[75]

La confirmación experimental de las ideas de Einstein no sólo revolucionó el mundo de la física, sino que también nos hizo plantearnos nuestra propia visión de la realidad. Cada vez estaba más claro que nuestros sentidos no nos bastan para investigar los misterios más profundos que esconde el universo porque no nos dan una imagen completa de lo que ocurre a nuestro alrededor.

La existencia de la gravedad es muy obvia porque la experimentamos en nuestras propias carnes cada momento de nuestras vidas, así que no es de extrañar que fuera la primera de las fuerzas fundamentales que los seres humanos empezamos a estudiar. Pero el resto de fuerzas que rigen el universo se manifiestan de maneras mucho más sutiles de modo que, para descifrar los secretos más profundos del mundo que nos rodea, los seres humanos nos hemos visto obligados a construir instrumentos capaces de detectar la información que la evolución ha considerado que no era imprescindible para asegurar nuestra supervivencia. Como resultado, hemos descubierto que muchos fenómenos que ocurren a nuestro alrededor y que parecen totalmente inconexos están estrechamente relacionados.

SEGUNDA PARTE

EL ELECTROMAGNETISMO



INTRODUCCIÓN

Es más que probable que el primer ser humano que vio un rayo no imaginara cuánto mejoraría la calidad de vida de nuestra especie el fenómeno que se esconde tras este impresionante espectáculo de la naturaleza. La electricidad alargaría nuestros días pasando a través de los filamentos de las bombillas, calentaría las épocas más frías haciendo funcionar nuestras estufas eléctricas o aparatos de aire acondicionado, sustituiría a la fuerza humana moviendo nuestras máquinas, nos permitiría comunicarnos a través de distancias que nunca habríamos soñado y expandiría los límites del conocimiento del ser humano medio con la creación de internet. Pero, claro, como se manifestaba ante el mundo de esta manera tan violenta, ruidosa y potencialmente mortal, no es de extrañar que en aquella época se le atribuyera el mérito de estos fenómenos a seres sobrenaturales.

No obstante, los rayos no son la única forma desconcertante en la que la electricidad se presentaba ante nuestros antepasados.

Más extrañados se quedaban aún los marineros cuando en los mástiles de los barcos aparecían unas llamas brillantes de color azulado o violeta. Los griegos llamaban a este fenómeno «Helena» o «Cástor y Pólux», dependiendo de si aparecía una llama o dos, en referencia una antorcha o a las estrellas más brillantes de la constelación de Géminis, por su importancia para la navegación. Otras culturas le han puesto distintos nombres a estas misteriosas llamas, como San Nicolás, San Hermes, corpusante y Corpus Santos, pero el que terminó cuajando mejor fue «fuego de San Telmo», que viene del nombre italiano para San Erasmo, «Sant'Ermo», el patrón de los navegantes.[1]

Como suele aparecer cuando las tormentas se están disipando, los marineros interpretaban este fenómeno como una señal de intervención divina. Uno de los cronistas que dieron la vuelta al mundo junto con Magallanes escribió al respecto:[2]

> Durante estas tormentas, el Santo Cuerpo, es decir san Telmo, se nos apareció muchas veces en forma de luz. Una vez apareció durante una noche excesivamente oscura, con el brillo de una antorcha llameante, en el palo mayor, donde se quedó unas dos horas o más, para nuestra consolación, ya que estábamos entre lamentos. Cuando esa luz bendita nos abandonó, tan deslumbrante era la luz que nos echó a los ojos que todos permanecimos más del octavo de una hora cegados y pidiendo clemencia, ya que creímos de verdad que éramos hombres muertos. El mar se calmó de repente.

He estado buscando documentos gráficos en los que aparezca el fuego de San Telmo porque, aunque la ilustración de 1886[3] que encontré es muy bonita, vivimos en el siglo XXI y me había quedado con las ganas de ver alguna foto del fenómeno en vivo. Si buscáis, seguramente encontraréis vídeos de Youtube grabados desde el interior de la cabina de algún avión en los que se ven pequeños rayos en la parte exterior de la ventana. Aunque en los títulos y las descripciones de estos vídeos afirmen que se trata del famoso fuego de San Telmo, en realidad no son más que descargas eléctricas causadas por la electricidad estática. El único lugar en el que he encontrado fotos verdaderas de este fenómeno es el blog de un grupo alemán llamado algo así como «Comité de Expertos en Apariciones Atmosféricas», destinado a recoger fotos de fenómenos atmosféricos inusuales. Las imágenes del fuego de San Telmo en concreto han sido captadas por las cámaras de vigilancia del observatorio meteorológico del monte Hoher Sonnblick, en Austria, alrededor de unas barras de metal de su estructura.[4]

Por otro lado, muchas culturas escribieron sobre fenómenos que les parecían extraños y que, aunque no lo supieran, también estaban relacionados con la electricidad. Por ejemplo, hay textos egipcios de alrededor del 2750 a.C. que se refieren a los peces gato eléctricos

(que pueden dar descargas de hasta 350 voltios)[5] como los «tronadores del Nilo». Plinio el Viejo, un naturalista latino que vivió en el siglo I d.C., decía sobre estos animales:[6]

> Incluso desde una distancia considerable, tocándolo con una lanza o un bastón, el pez tiene la propiedad de paralizar el brazo más vigoroso y de clavar en el suelo los pies del corredor, sin importar lo rápido que sea.

Tales de Mileto, por su parte, notó unos siglos antes que las plumas o las briznas de paja se veían atraídas hacia un trozo de ámbar si antes lo frotaba contra la lana o el pelaje de un gato. Si no tenéis ámbar y plumas a mano (me extrañaría, pero se podría dar el caso), el mismo fenómeno ocurre cuando frotáis un globo hinchado contra vuestro pelo y acercáis el globo a unos trocitos de papel higiénico, por ejemplo. Para explicar este fenómeno Tales interpretó, incorrectamente pero con muy buena intención, que, al frotarlo, el ámbar adquiría las mismas propiedades que las rocas magnéticas.

¿Pero Tales ya sabía que existían los imanes en esa época?

Claro, se conoce de la existencia de minerales de hierro magnéticos al menos desde la época griega. De hecho, se dice que la palabra «magnetismo» viene del nombre de un pastor griego llamado Magnes que notó que los clavos de sus zapatos se quedaban pegados al suelo al pasar por encima de una roca... Aunque es mucho más probable que la palabra apareciera como referencia a la ciudad de Magnesia del Meandro, en la actual Turquía, donde se extraían rocas magnéticas al menos desde tiempos de Tales de Mileto, que fue el primero en describirlas alrededor del 585 a.C.

En cualquier caso, ya en aquella época resultaba obvio que estas piedras eran capaces de atraer con fuerza los trozos de hierro. Según Tales, este fenómeno ocurría porque las rocas magnéticas tenían alma, ya que creía que cualquier cosa que fuera capaz de realizar un movimiento debía tenerla.[7] Es una explicación muy

mística para nuestros días, por supuesto, pero para la época era un pensamiento casi revolucionario porque no recurrió a la acción o la voluntad de algún dios para explicar esta atracción.

Tito Lucrecio Caro, un poeta y filósofo romano del siglo I a.C., sugirió una interpretación algo más científica del fenómeno, en el sentido de que trató de explicarlo utilizando mecanismos que había observado en la naturaleza. En sus propias palabras de la versión traducida (al inglés) de su libro *De Rerum Natura*[8] (*Sobre la naturaleza de las cosas*): «Es menester que de la piedra emanen muchas semillas o un efluvio que, con sus soplidos, separe todo el aire que hay entre la roca y el hierro. Cuando mucho espacio en el medio se vuelve vacío, el hierro empieza a moverse hacia adelante y cae en el vacío».

O sea que, según él, las piedras magnéticas generaban un vacío que succionaba el hierro. Como podéis imaginar, esta teoría presenta algún problema. ¿Por qué este vacío no atrae sustancias como el oro, por ejemplo? «Porque es demasiado pesado», respondería Lucrecio. ¿Y por qué no atrae sustancias como la madera? «Porque es demasiado ligera y los efluvios de la piedra magnética pasan a través de ella.»

Como podéis ver, las teorías que intentaban explicar cómo funcionan los imanes aún estaba en pañales.

San Agustín de Hipona hizo una observación interesante allá por el siglo V d.C. Razonó que si una piedra magnética no es capaz de mover la paja, pero sí lo hace el ámbar después de frotarlo, debía significar que los dos tipos de atracción tenían una causa distinta. Por desgracia, no intentó indagar más en este fenómeno porque defendía que a un cristiano «le basta con creer que la causa de todas las cosas creadas, tanto celestiales como terrenales, visibles o invisibles, no es más que la bondad del Creador, quien es el único y verdadero Dios».[9]

Y esa frase resume el progreso científico que se llevó a cabo durante los siguientes once siglos en el campo de la electricidad y el magnetismo. Exceptuando la invención de las brújulas, nadie volvió

a estudiar seriamente estos fenómenos hasta que, por suerte, esta mentalidad empezó a quedar atrás alrededor del siglo XVI.

LOS FENÓMENOS ELECTROMAGNÉTICOS

En el siglo XVI, un médico inglés llamado William Gilbert, que era muy aficionado a los imanes, señaló que, al contrario que las piedras magnéticas, un objeto electrificado como el ámbar no tiene polos. También observó que, a diferencia de estas rocas, que influencian a un trozo de hierro incluso aunque haya obstáculos de por medio, la atracción que ejerce un objeto electrificado sobre otro se puede detener interponiendo una simple hoja de papel. Concluyó además que la teoría de los efluvios de Lucrecio no tenía ningún sentido porque producir un vacío en el aire es un proceso que lleva tiempo, por poco que sea, pero la atracción magnética se produce de manera instantánea.

Como nota histórica adicional, a Gilbert no le gustaba el trabajo académico que se había hecho hasta la fecha porque, según él, los autores no hacían más que leer y repetir lo que otra gente había escrito a lo largo de los siglos sobre ciertos fenómenos, pero nadie se molestaba en poner a prueba esas mismas teorías por sí mismo para comprobar su veracidad. Un ejemplo de esta mentalidad es el mito de que los ajos debilitan los imanes, una afirmación que se le atribuye a Plinio el Viejo, aunque tal vez él no dijera tal cosa y se tratara de un error de traducción (*allio*, «ajo», en vez de *alio*, «otro») de alguno de sus textos. Sea como sea, en el siglo XVII aún había marineros que evitaban el ajo y la cebolla cuando les tocaba estar a cargo de las brújulas por miedo a desmagnetizarlas. Como podéis ver, no existía una mentalidad muy escéptica en la época.

Los experimentos sobre el magnetismo de Gilbert, en cambio, estaban tan bien detallados que cualquiera los podía replicar y observar los mismos fenómenos que él describía. Alrededor de esta época estaba ocurriendo lo mismo con el trabajo de Galileo en el

campo de la astronomía: «cualquiera» podía comprar un telescopio y observar el movimiento de las lunas de Júpiter para comprobar que, en efecto, no todo gira alrededor de la Tierra.

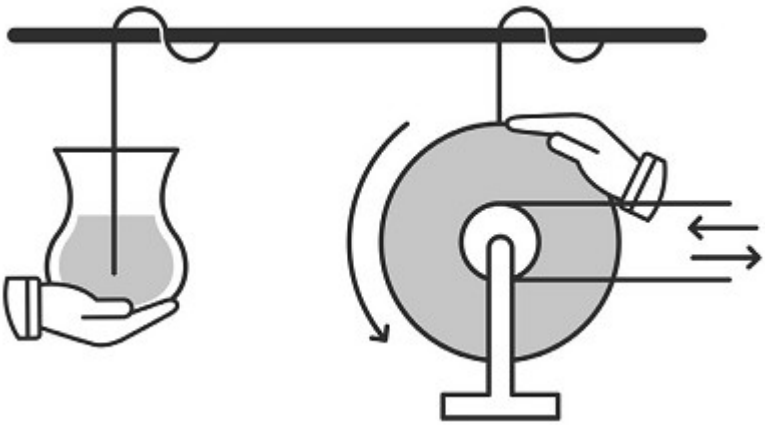
Y, precisamente, en el siglo XVII los fenómenos eléctricos y magnéticos estaban empezando a despertar el interés entre el público.

En 1663 la gente ya producía electricidad estática utilizando montajes como el de Otto Von Guericke: una bola de azufre o de cristal montada sobre un eje giratorio y que producía electricidad estática cuando se frotaba. El físico y químico francés Charles François de Cisternay du Fay observó, intrigado, cómo un trozo de pan de oro de repente se veía repelido por una esfera que momentos antes lo estaba atrayendo. Además, observó también que la lámina de oro volvía a verse atraída hacia la bola de azufre después de entrar en contacto con alguna otra superficie. Basándose en esta experiencia, Du Fay sugirió que existe un tipo de electricidad atractivo y otro repulsivo... Una idea a la que se opuso Benjamin Franklin, quien creía que «un solo fluido eléctrico» bastaba para explicar el fenómeno. Según él, los cuerpos que tenían una falta de fluido eléctrico se veían atraídos hacia los que lo contienen en exceso. En este modelo, la repulsión entre dos objetos ocurriría cuando ambos contenían un exceso de fluido eléctrico... Algo que se acercaba un poco más a la realidad, como veremos enseguida.

También se había observado que los objetos que acumulaban electricidad estática a veces emitían chispas brillantes y sonido cuando entraban en contacto con otras superficies. Es posible que el fenómeno se hubiera observado antes, ya que algunas de las primeras referencias al respecto las hizo el arzobispo de Tesalónica en el siglo XII. Según él, Woliver, rey de los godos, era capaz de producir chispas con su cuerpo y sabía de un filósofo que hacía lo mismo a través de su ropa.[10]

En 1745, un alemán llamado Ewald Georg Von Kleist sugirió que, si la electricidad era algún tipo de fluido, se debería poder almacenar de alguna manera. Sabiendo que el vidrio no conduce la

electricidad, llenó un tarro de cristal con alcohol y atravesó un clavo de metal en el corcho. El aparato se «cargaba» de electricidad poniendo la esfera que generaba la electricidad estática en contacto con el clavo a través de una barra de metal... Y utilizando seres humanos para completar el circuito, por supuesto:



Una vez cargado, a Von Kleist se le ocurrió tocar el clavo con una mano mientras sujetaba el frasco con la otra para ver si había retenido algo de corriente eléctrica. Como resultado, dijo sufrir una descarga «desagradable».

Algo parecido le ocurrió en 1754 a un científico holandés llamado Pieter van Musschenbroek, que mejoró el diseño llenando de agua el tarro de cristal y recubriéndolo con papel metálico. Al tocar el interior y el exterior de este aparato para comprobar si pasaba algo de corriente, Musschenbroek se llevó tal calambrazo que decidió que «no se daría una segunda descarga ni por la Corona de Francia». Este invento se pasó a llamar «Botella de Leyden», en honor al pueblo en cuya universidad Musschenbroek daba clases.

Los científicos que estudiaban el fenómeno se empezaron a dar cuenta de la magnitud de la fuerza con la que estaban tratando. William Watson comentó tras sufrir una descarga que[11] «la primera vez que lo experimenté me pareció, acostumbrado como estoy a

estos experimentos, que mi brazo estaba siendo arrancado por el hombro, codo y muñeca, y también mis dos piernas, en las rodillas y detrás del tobillo».

Cuando se descubrió que la electricidad podía pasar a través de varias personas, algunos científicos como Louis Guillaume Le Monnier llevaron el fenómeno al extremo, llegando a colocar a 140 cortesanos en círculo para darles una descarga a todos. Jean Antoine Nollet dio un paso más allá: para medir la velocidad a la que se propaga la electricidad unió a doscientos monjes con cables de hierro, de manera que formaban un círculo de alrededor de un kilómetro de diámetro. Cuando conectó el «montaje» a una batería de botellas de Leiden y observó que todos los monjes reaccionaban ante la descarga al mismo tiempo, Nollet concluyó que la electricidad debía propagarse a una velocidad muy alta.[12]

¿Cuál era la causa de todos estos fenómenos? ¿Por qué esa fuerza repulsiva se podía almacenar en botes para pasarla a través de unos monjes? ¿Qué relación había entre la atracción de un imán y la que provoca frotar algunos materiales con las manos?

Para responder a estas preguntas, primero habría que estudiar los bloques básicos que componen la materia.

EL ELECTRÓN, EL CAUSANTE DE LOS PROBLEMAS

En el siglo XVII, los intelectuales por fin estaban dejando atrás la (infructuosa) alquimia y su afán por dar con la receta del elixir de la inmoralidad o de convertir el plomo en oro. La creciente comunidad científica se estaba centrando ahora en el estudio de la materia en sí para investigar sus propiedades y entender un poco mejor en mundo en el que vivimos y, con suerte, encontrar alguna aplicación a ese conocimiento. En esta época se entendió que el aire está compuesto por varios gases y se aislaron elementos puros, como el oxígeno, el hidrógeno o el cobalto. Con el paso de los años, el descubrimiento de decenas de nuevos elementos químicos que no se podían separar

en otras sustancias más simples estaba demostrando por fin que la antigua teoría de los cuatro elementos estaba muy alejada de la realidad.

También se había notado que la mayor parte de la materia que nos rodea está formada en realidad por sustancias que surgen de la mezcla de varios elementos puros. Por ejemplo, cuando se mezclan dos volúmenes de hidrógeno con uno de oxígeno, el resultado es siempre un volumen de agua. La sustancia que se obtiene al mezclar dos elementos también puede cambiar según la proporción en la que se unan: mezclando la misma cantidad de átomos de carbono que de oxígeno obtienes un óxido (monóxido de carbono), pero doblando la cantidad de oxígeno obtienes un óxido diferente que tiene propiedades distintas (dióxido de carbono).

Total, que este comportamiento de la materia inspiró a un químico, físico y meteorólogo (la gente era un poco de todo en aquella época) llamado John Dalton para proponer que los elementos puros están compuestos por trozos indivisibles de materia que dan lugar al resto de las sustancias que nos rodean al combinarse en unas proporciones determinadas. A estos elementos les llamó átomos, la misma palabra que había utilizado Demócrito en la antigua Grecia y que ya hemos visto que significa, literalmente, «indivisibles». En el caso del carbono y el oxígeno, Dalton sugirió que las sustancias se diferenciaban en que una estaba formada por parejas compuestas por un átomo de carbono y uno de oxígeno (monóxido de carbono, CO) y la otra contenía uniones de un átomo de carbono y dos de oxígeno (dióxido de carbono, CO_2).

El señor Dalton iba bien encaminado, pero éste era sólo el primer paso para resolver el enigma de la causa de la electricidad y el magnetismo porque, al final, resultó que los átomos no eran tan indivisibles como se creía.

A finales del siglo XIX se habían descubierto los rayos catódicos, unos chorros luminosos que aparecen en el interior de un tubo de cristal vacío cuando una corriente eléctrica pasa a través de él. El

fenómeno tenía especialmente intrigado a un científico llamado J. J. Thomson, así que les hizo una serie de perrerías a esos rayos para ver si podía descubrir de qué estaban hechos.

Thomson observó que los rayos catódicos reaccionaban ante la presencia de un campo magnético de manera que, cuando acercaba el polo negativo de un imán al tubo, el rayo se curvaba en la dirección opuesta al imán. El polo positivo, en cambio, atraía al rayo en su dirección. Basándose en esto, Thomson concluyó que estos rayos tenían carga negativa.

Thomson también dedujo que ese fenómeno brillante debía de tener masa cuando metió unas aspas montadas sobre un eje en el tubo de vacío y se dio cuenta de que empezaban a girar cuando el chorro luminoso impactaba contra ellas, lo que significaba que les estaba transfiriendo momento.



Por último, observó que todos los rayos catódicos que producía presentaban exactamente las mismas propiedades, incluso aunque cambiara el material de los electrodos o el tipo de gas que se introdujera en el tubo antes de crear en él el mejor vacío posible. Por tanto, fuera lo que fuese que componía ese rayo, debía formar parte de la estructura de todos los metales y los gases.

Con estos datos, Thomson concluyó que los rayos catódicos estaban formados por diminutas partículas con carga negativa que salían disparadas de un extremo al otro del tubo desde los electrodos o el gas residual que contenía. Además, en 1897 calculó que estos trozos de materia tenían una masa mil veces menor que la

de las «partículas» del elemento más ligero conocido, el hidrógeno, lo que sólo podía significar que incluso estos átomos, tan fundamentales en apariencia, estaban compuestos por una partícula con carga negativa aún más pequeña.

Pero, espera, ¿cómo podía Thomson saber cuánto pesa un átomo de hidrógeno en aquella época, si aún no se sabía ni de qué estaban hechos los átomos?

Buena pregunta, *voz cursiva*.

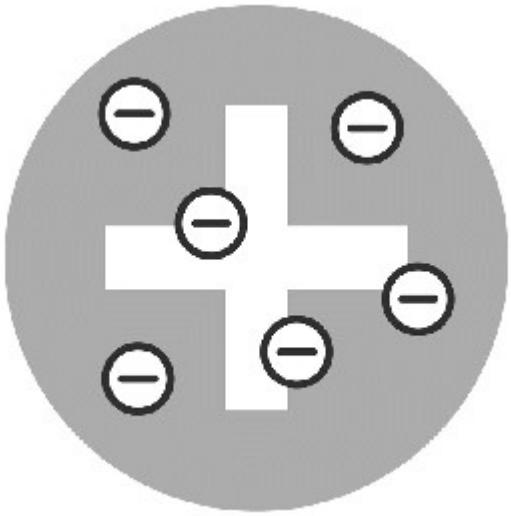
En tiempos de Thomson se había descubierto que los átomos de distintos elementos tienden a desviarse en diferente medida cuando se disparan a través de un campo magnético. La magnitud de la desviación depende de dos factores: de la carga eléctrica de un átomo y de su masa, de manera que los átomos menos masivos y con mayor carga eléctrica serán desviados de su trayectoria con mayor intensidad en presencia de un campo magnético.[13] Por tanto, lanzando un chorro de átomos cargados contra una placa fotográfica en presencia de un campo magnético y viendo dónde se iluminaba ésta, los científicos de la época podían medir fácilmente su desviación y establecer la relación entre la carga y la masa de los átomos de cada elemento.

Recibido, continúa.

El caso es que los átomos ya no eran tan indivisibles como se pensaba, sino que parecían estar formados, al menos, por unos bloques aún más simples con carga eléctrica negativa. Pero, como es obvio que la materia que nos rodea no presenta carga eléctrica (por suerte), Thomson razonó que los átomos que la componen también debían poseer algún tipo de carga positiva en su interior que compensara esta carga negativa y los hiciera eléctricamente neutros.

Basándose en todos estos datos, Thomson propuso que los átomos son en realidad una especie de masa o campo positivo que tenía incrustadas unas cargas negativas que bautizó con el nombre de corpúsculos (que terminarían llamándose electrones, que suena mejor). Esta concepción del átomo pasó a llamarse el modelo del

«pastel de ciruela», por la manera en la que la carga positiva (la masa del pastel) y las negativas (las ciruelas) estaban distribuidas. Y tenía más bien esta pinta:

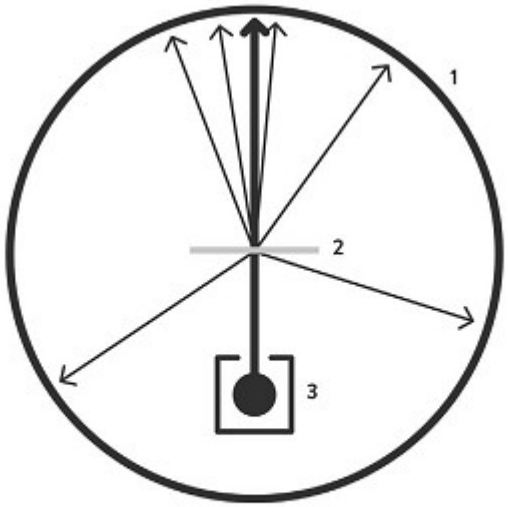


Pero, como demostró el físico neozelandés Ernest Rutherford, que fue uno de los alumnos de Thomson, este modelo no podía ser correcto.

En 1911 se sabía que los elementos radiactivos emiten unas partículas con carga positiva, las llamadas partículas alfa, de las que hablaré con más detalle en el próximo capítulo. A Rutherford se le ocurrió que, para poner a prueba la validez del modelo de Thomson, dispararía partículas alfa contra una lámina muy fina de oro. La lámina se encontraba frente a una pantalla fluorescente que se iluminaría cada vez que una de estas partículas positivas chocara contra ella. Observando qué puntos de la pantalla se iluminaban, Rutherford podría medir si las partículas se desviaban de su trayectoria recta después de pasar a través de la lámina de oro.

Si el modelo de Thomson era correcto, entonces esos campos de carga positiva del que estarían rellenos los átomos no deberían ser demasiado intensos y, según los cálculos, las partículas alfa pasarían a través de ellos sin problemas. Como resultado, todas las partículas alfa deberían chocar contra el mismo punto de la pantalla

fluorescente, iluminando siempre el punto que se encontraba justo detrás de la lámina de oro. Pero, al poner en marcha su experimento, Rutherford obtuvo un resultado distinto: la mayoría de las partículas alfa atravesaban la lámina de oro en línea recta, pero algunas de ellas se desviaban en diferentes ángulos.

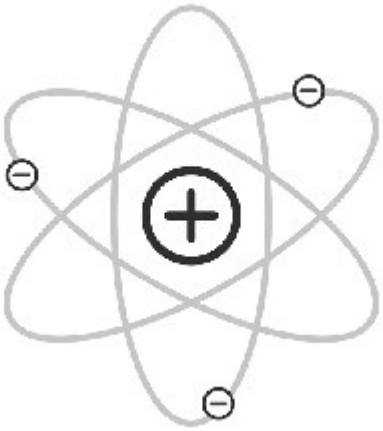


1. PANTALLA FLUORESCENTE
2. LÁMINA DE ORO
3. EMISOR DE RAYOS ALFA

El resultado no tenía mucho sentido en el modelo de Thomson, pero se podía explicar si la carga positiva del átomo estaba concentrada en un punto. En ese caso, las partículas alfa que estaban pasando a través de la lámina de oro se desviaban una medida mayor o menor dependiendo de la distancia a la que pasaran del núcleo positivo de los átomos del obstáculo. A su vez, el hecho de que la mayoría de las partículas alfa estuvieran atravesando la lámina en línea recta era una señal de que la mayor parte de las partículas estaban pasando muy lejos del núcleo atómico y, por tanto, casi todo el volumen del átomo debía ser espacio vacío. Y realmente lo es: hoy en día sabemos que, dependiendo del elemento, el diámetro del núcleo de los átomos es entre 23.000 y 135.000 veces menor que el diámetro delimitado por las órbitas de sus electrones.

Basado en este nuevo descubrimiento, Rutherford sugirió que los átomos están compuestos por un núcleo puntual con carga positiva alrededor del cual dan vueltas unas partículas con carga negativa, los electrones. De especificar cómo estaban distribuidos los electrones se encargaría el químico Niels Bohr.

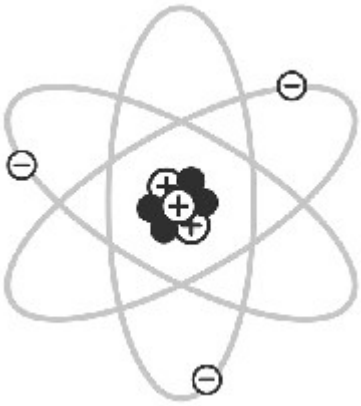
Estaba claro que esas cargas negativas no podían estar quietas, porque entonces se verían atraídas por la carga positiva central, caerían hacia el núcleo y ambas quedarían neutralizadas. Bohr sugirió que los electrones dan vueltas alrededor del núcleo en órbitas circulares igual que los planetas dan vueltas alrededor del Sol. Este modelo, llamado modelo planetario precisamente por eso, era más parecido al que todos hemos visto en los libros del colegio y el instituto:



Igual que ocurrió con la teoría gravitatoria de Newton, el enfoque de este modelo seguía sin ser del todo correcto y, con el tiempo, fue sustituido por la mecánica cuántica, que predecía con una precisión mucho mayor el comportamiento de los átomos. Pero, aun así, explicaba muchísimas cosas sobre la materia que habían estado envueltas en un halo de misterio hasta la fecha: desde cómo se produce la interacción entre diferentes sustancias para formar otras nuevas hasta cuál es el origen de la luz, pasando por la relación entre la electricidad y los campos magnéticos.

LA INTERACCIÓN ENTRE LA MATERIA

Antes de continuar quería dar un pequeño salto histórico para mencionar un detalle que trataré con más profundidad en el siguiente capítulo: más adelante, el núcleo de los átomos del modelo atómico de Bohr dejó de ser una simple masa positiva y, con los nuevos descubrimientos, pasó a estar compuesto por unas partículas con carga eléctrica positiva llamadas protones y otras neutras llamadas neutrones (aunque éstas no nos interesan por ahora).



Dicho esto, vayamos al grano.

Cuando un átomo contiene el mismo número de protones que de electrones o, lo que es lo mismo, de cargas positivas que de negativas, entonces las cargas eléctricas opuestas se contrarrestan y el átomo es eléctricamente neutro. Pero la carga eléctrica de un átomo no es lo único que determina su comportamiento.

Los electrones están confinados a unas órbitas determinadas alrededor del núcleo del átomo y deben seguir una serie de reglas para ocuparlas. Por ejemplo, sólo pueden coexistir dos electrones en cada uno de los orbitales. Estos orbitales están agrupados en varias capas alrededor del átomo y, como resultado, en cada capa cabe un número limitado de electrones (2 en la primera, 8 en la segunda, 18 en la tercera, 32 en la cuarta...). Pero la característica más

importante de esta estructura es que los átomos siempre procuran llenar por completo su capa de electrones más externa antes de empezar a llenar una capa nueva.

Y este pequeño detalle es el que posibilita la gran variedad química de la materia que nos rodea: un átomo no estará satisfecho hasta que su capa más externa esté llena de electrones, así que hará lo posible para obtener esos electrones de donde sea. Como los electrones no se encuentran en estado libre en condiciones normales, sino unidos a otros átomos, al final los átomos necesitados terminan uniéndose entre sí para compartirlos, un proceso que resulta en la formación de moléculas, sustancias formadas por la unión de varios átomos que pueden tener propiedades químicas distintas a las que tienen por separado los elementos que las componen.

Por ejemplo, dos átomos a los que les faltan electrones pueden compartir sus carencias uniendo sus capas de electrones más externas, formando lo que se llama un *enlace covalente*. Ninguno de los dos átomos queda *completamente* satisfecho con el cambio, pero esta solución los deja más completos de lo que lo estarían si cada uno continuara por su lado.

Un ejemplo de este enlace es el agua. El oxígeno (O) tiene 8 protones en su núcleo y, por tanto, 8 electrones dando vueltas a su alrededor. Con estos 8 electrones puede llenar su primera capa con los 2 electrones que le corresponden, y colocar otros 6 en la segunda capa. Pero hay un problema: en la segunda capa caben un total de 8 electrones, así que el oxígeno necesita conseguir otros dos electrones para terminar de llenarla. El hidrógeno (H), por otro lado, tiene un solo protón en su núcleo y un electrón dando vueltas a su alrededor. Por desgracia para él, un solo electrón ni siquiera le vale para rellenar su primera capa, en la que caben dos.

Por separado, las capas más externas de los dos elementos están incompletas. Pero, si un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno se cruzan, pueden compensar sus carencias uniendo sus capas más externas, de manera que el oxígeno pueda obtener los dos

electrones que le faltan a través del par de átomos de hidrógeno y, a su vez, cada átomo de hidrógeno también pueda contar con uno de los dos electrones de oxígeno.

Esta unión entre dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno es a lo que comúnmente llamamos agua (H_2O)... Y tiene propiedades muy distintas a las del oxígeno o el hidrógeno que, por separado, son gases a temperatura ambiente. De hecho, el oxígeno es muy reactivo y el hidrógeno es inflamable pero, unidos, se convierten en el líquido incoloro que posibilita la vida en la Tierra.

Debido a la existencia de enlaces covalentes, los átomos de los gases no suelen estar sueltos por el espacio de manera individual, sino emparejados, formando moléculas que contienen dos átomos del mismo gas. En el caso más simple, dos átomos de hidrógeno a los que les falta un electrón a cada uno pueden compartir el único electrón que poseen para llenar sus respectivos primeros orbitales y convertirse en una molécula de hidrógeno diatómico (H_2).

El oxígeno y el nitrógeno —que, combinados, representan el 99% del gas de nuestra atmósfera— también se encuentran en el aire en forma de moléculas diatómicas (O_2 y N_2), igual que el flúor (F_2) y el cloro (C_2), que, por suerte, no son tan abundantes.

Pero no todos los átomos van por la vida dispuestos a compartir sus electrones.

A veces, los átomos recurren al hurto para conseguir los electrones que les faltan, algo que puede pasar cuando un átomo al que le faltan electrones se encuentra con otro al que le sobran. Si, por ejemplo, un átomo de cloro (Cl), al que le falta un electrón para completar su órbita externa, se encuentra con uno de sodio (Na), al que le sobra uno, el cloro se apropiará de ese electrón sobrante y los dos terminarán con una órbita llena.

Después del intercambio, el átomo de cloro y el de sodio forman cloruro de sodio (NaCl o sal común) pero, en este caso, los átomos no comparten ningún electrón para permanecer pegados. Esa transferencia de un electrón hace que el número de electrones de cada átomo quede descompensado con el de protones, así que cada

átomo queda cargado con una carga eléctrica opuesta. O sea, que es la atracción electrostática entre sus cargas opuestas lo que mantiene al cloro y el sodio unidos, formando un enlace iónico (porque a los átomos que tienen carga positiva o negativa se les llama iones).

Pero ¿que un átomo reaccione con otro es producto del azar? ¿O hay alguna regla que deban seguir?

Algunos elementos están más dispuestos a reaccionar con otros átomos (intercambiar electrones) que otros. Básicamente, cuantos menos electrones le falten a un átomo para completar su última capa, más violento se pondrá para conseguirlos y mayor será el número de elementos con los que podrá reaccionar.

El flúor (F), el cloro (Cl) y el bromo (Br) son los elementos más reactivos de la tabla periódica porque a todos ellos les falta un solo electrón para rellenar su capa externa. Estos elementos no sólo se unen con casi cualquier átomo que se encuentran en su camino, robándole electrones u obligándole a compartir alguno con ellos, sino que también son capaces de arrancar los átomos que forman parte de otras moléculas, destruyéndolas o transformándolas en otras.

Como nuestras células están compuestas por unas moléculas muy específicas, estos elementos son especialmente nocivos para la salud porque pueden dañarlas al convertir estas moléculas en otras sustancias. Por ejemplo, si lo respiramos en su forma gaseosa, el cloro se combinará con el agua que contiene la mucosa que cubre nuestras vías respiratorias, produciendo ácido clorhídrico que destruye las células con las que entra en contacto. El flúor en estado puro, en concreto, es altamente peligroso y durante la historia se ha llevado por delante a varios químicos que intentaron aislarlo durante el siglo XIX, además de dejar a otros científicos tullidos, ya sea porque respiraron los vapores del flúor o por su exposición directa al ácido hidrofluórico.[14]

¡Pero ¿el flúor no es eso que ponen en la pasta de dientes?! ¡¿Es que nos quieren matar?!

No, no te preocupes, *voz cursiva*, que el flúor que se encuentra en la pasta de dientes no está en estado puro. Aunque el flúor es muy reactivo cuando va solo por la vida, sus instintos asesinos se calman cuando se une con otro elemento y obtiene los electrones que necesita. En concreto, la pasta de dientes contiene fluoruro de sodio (NaF) o difluoruro de estaño (SnF_2).

Estos compuestos de flúor se añaden al dentífrico porque el mineral que forma nuestros dientes, la hidroxiapatita, reacciona con el flúor de estos compuestos para producir fluoroapatita, otro mineral mucho más resistente al ácido generado por las bacterias que, con el tiempo, llegan a producir las caries. Éste es también el motivo por el que se añaden cantidades minúsculas (e inofensivas) de flúor (entre 0,7 y 1,2 partes por millón) al agua, una práctica que se extendió cuando se observó que la gente que vivía en lugares donde el agua presenta mayores niveles de flúor de manera natural tenía los dientes mucho más sanos. Como resultado, la fluoración del agua permite reducir las caries infantiles hasta en un 60% y hasta un 35% en adultos por el módico precio de cincuenta céntimos por habitante y año.[15]

Entonces ¿el flúor del agua y de la pasta de dientes no me va a intoxicar?

Claro que no, *voz cursiva*. Como ya notó Paracelso en el siglo XVI: «Todo es veneno, nada es sin veneno. Sólo la dosis hace el veneno». Y esto no sólo se debe a que el efecto de cualquier sustancia potencialmente dañina es muy limitado en cantidades bajas sino que, además, nuestros cuerpos son capaces de filtrar y destruir muchas de ellas constantemente, evitando que se acumulen en nuestro organismo.

Por tanto, aunque el flúor pueda resultar mortal en grandes cantidades, la cantidad que está disuelta en el agua es inofensiva. Y este mismo razonamiento se puede aplicar a cualquier compuesto químico que tomamos con regularidad, claro. Desde la sal, pasando por los pesticidas (tanto los artificiales como los que producen las

plantas de manera natural) la cafeína, el alcohol e incluso el oxígeno y el agua, cualquier sustancia puede ser mortal en la dosis suficiente.

Pero, bueno, volviendo a lo nuestro.

El flúor y el resto de sus amigos que están en la parte derecha de la tabla periódica son muy reactivos porque sólo les falta un electrón para completar su capa más externa. Los elementos que están en la columna izquierda también son muy reactivos, pero por el motivo opuesto: tan sólo tienen un electrón en su capa exterior y están ansiosos por deshacerse de él para dejar expuesta su segunda capa más externa, que está llena. Esta reactividad se puede observar en la explosión que provocará un trozo de sodio, potasio o cesio al caer en el agua, por ejemplo.

Aunque no todos los elementos que tienen un solo electrón en su capa más externa son tan reactivos: algunos metales que se encuentran en el centro de la tabla periódica tienen esta configuración electrónica pero, debido a la mayor masa de su núcleo, su última capa está más contraída y ese último electrón externo queda anclado al átomo por una fuerza electrostática mayor, por lo que difícilmente podrá unirse con otros. Por esta razón, los elementos que presentan esta configuración difícilmente se unirán con otros átomos para compartir electrones y, por tanto, formar moléculas (a menos que se encuentren con elementos extremadamente reactivos como el flúor).

Entre estos elementos se encuentran, por ejemplo, el oro y el platino, dos metales muy útiles en las aplicaciones que necesitan objetos que permanezcan inalterados ante el paso de tiempo. No es de extrañar, entonces, que el oro haya sido utilizado como la moneda de cambio preferida a lo largo de la historia: además de ser un elemento escaso y fácil de moldear, su composición química no se ve alterada al ser expuesto a las sustancias corrosivas que nos rodean, como el oxígeno o la sal del mar, así que quien tenga oro en sus manos puede estar seguro de que el material que representa su riqueza no va a desaparecer por el mero hecho de existir... Algo que

ocurriría si representara su riqueza con un elemento como el hierro, que forma óxidos quebradizos al reaccionar con el oxígeno de la atmósfera.

Pero el caso más extremo de indiferencia química lo protagonizan los llamados gases nobles como el helio, el neón o el xenón, que ocupan la columna más oriental de la tabla periódica. Estos elementos no sólo tienen su capa más externa completamente llena de electrones sino que, además, poseen tantos electrones como protones, así que globalmente no tienen carga eléctrica. Como podéis imaginar, se tiene que dar una situación muy absurda para que estos elementos reaccionen con cualquier otra sustancia.

La primera molécula que incluye un gas noble en su estructura se logró sintetizar en 1961, cuando se unieron átomos de gas xenón a las moléculas de una sustancia llamada hexafluoruro de platino, formando hexafluoroplatinato de xenón,[16] mientras que el primer compuesto de argón se obtuvo el año 2000. Por otro lado, se sabe que los átomos de helio sólo pueden formar moléculas con otros elementos bajo condiciones de presión extremas que contrarrestan las fuerzas repulsivas que aparecen entre sus electrones.[17]

Dicho todo esto, el campo de la química va mucho más allá de los pocos detalles que pueda abordar en este capítulo, por supuesto. El objetivo de esta parte del libro era dar una idea sobre cómo la distribución de los electrones alrededor de los átomos es el fenómeno que les permite interaccionar para formar la cantidad astronómica de moléculas diferentes que dan variedad a la materia que contiene el universo que nos rodea... Y a la que nos compone.

LA QUÍMICA DE LA VIDA

Cuando buscamos vida más allá de la Tierra, ya sea en los mundos de nuestro propio vecindario cósmico o en sistemas solares lejanos que aún tardaremos siglos en alcanzar, interpretamos la presencia

de agua y moléculas basadas en el carbono como una señal de que existe una mayor probabilidad de que el planeta que estamos estudiando albergue vida compleja.

¡Ya te digo! Los humanos somos tan egocéntricos... Creemos que toda la vida en el universo tiene que estar moldeada igual que nosotros, cuando la vida está hecha de cualquier...

Para el carro, *voz cursiva*, que ya veo hacia dónde quieres ir.

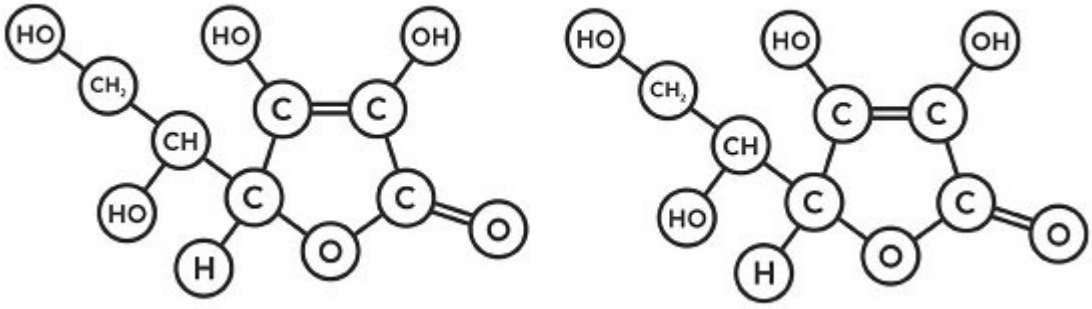
No buscamos vida extraterrestre en sitios parecidos a la Tierra simplemente porque «es como estamos hechos nosotros». Si se considera que el agua y el carbono son dos elementos fundamentales para la vida es porque suponemos que tienen las propiedades químicas idóneas para dar lugar a cuerpos capaces de realizar tareas complejas.

Y esto se debe precisamente a que la química no es un campo donde *todo vale*: la capacidad de cada elemento para formar moléculas está limitada por su configuración electrónica y, por tanto, el número de sustancias que pueden existir es finito. Y, de todas las sustancias posibles, sólo unas cuantas son compatibles con la química de la vida.

A los átomos de carbono les faltan cuatro electrones en su capa más externa, lo que significa que los cuatro que sí están presentes están deseando formar enlaces covalentes con otros átomos. Estos electrones se pueden unir a otros átomos de dos en dos, como es el caso del dióxido de carbono (CO_2) o cada uno de ellos puede ser compartido con un átomo distinto, igual que ocurre con las moléculas de metano (CH_4), que contienen un átomo de carbono y cuatro de hidrógeno. Ya que estamos hablando del metano me gustaría señalar que es un gas inodoro, contrariamente a la creencia popular, por lo que no es el responsable del olor de nuestras flatulencias. Ese peso descansa sobre los hombros de otros compuestos como el *escatol* o el *sulfuro de hidrógeno* (HS).[18]

Pero la verdadera magia (magia metafórica) de este elemento está en que sus átomos son capaces de unirse entre sí y formar larguísimas cadenas de carbono que, a su vez, forman enlaces con

átomos de otros elementos, produciendo moléculas complejísimas e inmensas. Añado a continuación la estructura química de una molécula de alcohol y otra de ácido ascórbico (también llamado vitamina C), cuya configuración está basada en el carbono (C), para que veáis a lo que me refiero:



Hay que tener en cuenta que la estructura química de estas moléculas es extremadamente simple si se compara con las enrevesadas estructuras tridimensionales que puede llegar a formar el carbono, como el ADN, pero sería imposible representar su complejidad sobre papel.

La capacidad del carbono para formar una gran variedad de compuestos complejos le viene de perlas a la vida porque, aunque aún no hayamos descubierto vida más allá de nuestro planeta, cabe esperar que el cuerpo de un organismo complejo tendrá que realizar una gran variedad de funciones para mantenerse vivo, como, por ejemplo, obtener información de su entorno. Por tanto, necesitará diferentes tipos de sensores que le permitan conocer datos como la temperatura de lo que está tocando, la presión que actúa sobre su cuerpo, la composición química de sus inmediaciones o incluso el perfil de la radiación electromagnética a su alrededor, por poner algunos ejemplos.

Además, un organismo complejo tendrá que analizar toda esa información en busca de elementos de los que se pueda beneficiar o que pongan en peligro su existencia, así que necesitará algún

órgano que pueda procesarla y tomar decisiones a partir de ella. De hecho, incluso ignorando el resto de las funciones básicas que podría llevar a cabo el cuerpo de un organismo extraterrestre para moverse, mantenerse vivo y crecer, que complicarían aún más el asunto, la vida extraterrestre también deberá disponer de algún medio para codificar las instrucciones que le dirán a su cuerpo cómo deben crecer.

Como podéis ver, un organismo complejo necesitará una gran variedad de moléculas diferentes que le permitan regular todas estas funciones y con las que, además, tendrá que construir los diferentes tejidos que compondrán su cuerpo. Y, encima, la química de todas esas moléculas tendrá que ser compatible.

Ésta es la razón por la que el carbono es el elemento ideal para la vida: además de ser capaces de formar moléculas enormes y variadas, los átomos de carbono pueden dar lugar a una variedad tremenda de compuestos químicos. De hecho, de los alrededor de 12 millones de compuestos químicos conocidos, 10 millones (el 85%) son moléculas orgánicas, que es el nombre que se les da a todas aquellas que contienen carbono. Y varios miles de esos compuestos son imprescindibles para llevar a cabo los procesos que permiten la vida.[19] Y por eso, *voz cursiva*, se considera que este elemento es el candidato idóneo para dar lugar a la vida compleja.

Bueno, pero ¿no hay ningún otro elemento que pudiera valer para la vida, aunque sea para dar lugar a alguna forma de vida un poco más simple?

El silicio (Si) es el elemento más cercano al carbono en términos de potencial para producir vida, pero aun así se encuentra a años luz (por detrás) de él. Aunque también dispone de cuatro electrones para compartir en su capa más externa, los enlaces que forma el silicio son menos estables que los del carbono, por lo que las cadenas de átomos que puede formar se degradan con mayor facilidad. Por otro lado, el pequeño tamaño de los átomos de carbono en comparación con el de los átomos de silicio permite a los

primeros encajarse de manera más eficiente en los huecos de una molécula y, en consecuencia, formar a su alrededor estructuras más grandes y variadas.

El ejemplo más claro de la complejidad de la química a la que da lugar el carbono es que puede dar lugar al ácido desoxirribonucleico, el ADN, la molécula que contiene toda la información necesaria para construir un organismo vivo. Estas gigantescas moléculas están formadas en realidad por otras cuatro más pequeñas (la citosina, la guanina, la adenosina y la timina) que se alternan a lo largo de su estructura para producir secuencias distintas.

Y, desde luego, nunca se ha observado un compuesto de silicio que sea remotamente parecido a este, en términos de complejidad y tamaño.

En cualquier caso, las diferentes moléculas necesarias para la vida no van a empezar a formar un cuerpo ni a moverse para explorar su entorno por sí solas: primero tienen que entrar en contacto en un entorno que facilite la combinación de distintos átomos. Y ahí es donde entra el agua.

Existe una razón por la que la gente (o, al menos, los astrobiólogos) llama al agua «el disolvente universal». El agua es la sustancia que más compuestos químicos puede disolver en su interior gracias a que los extremos de sus moléculas tienen cargas eléctricas opuestas.

¿Cómo? ¿El agua tiene carga eléctrica? ¿Y por qué no me electrocuto cuando me du...?

A ver, no, *reset*, *voz cursiva*.

En una molécula de agua, la manera en la que están distribuidos los electrones alrededor del hidrógeno y el oxígeno hace que el extremo en el que está contenido el átomo de oxígeno adopte una ligera carga negativa, mientras que el del hidrógeno tenga algo de carga positiva. Como resultado, los extremos de una molécula de

agua poseen una carga eléctrica opuesta. Y en consecuencia, esta diferencia de cargas tiene un efecto curioso sobre las sustancias que caen en el agua.

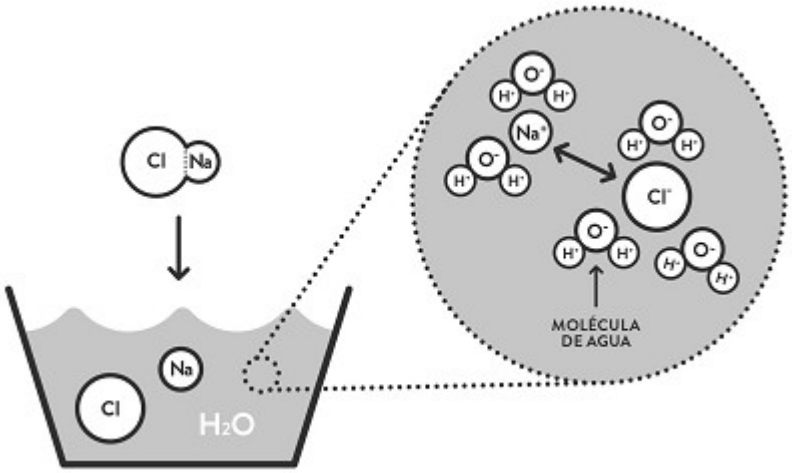
Habrás observado, *voz cursiva*, que la sal parece desaparecer como por arte de magia cuando la introduces en un vaso de agua y la agitas, ¿no?

Sí, a ver, se llama disolución, ¿sabes?

Correcto. ¿Y sabes adónde va la sal cuando se disuelve?

Pues la verdad es que nunca me lo había planteado...

Resulta que los átomos de algunas sustancias están unidos por enlaces que son más débiles que la fuerza electrostática que pueden ejercen sobre ellos los polos opuestos de las moléculas de agua. Por tanto, si una de estas sustancias se introduce en el agua, las moléculas de ésta separarán los átomos que la componen e impedirán que se vuelvan a unir.



O sea que, cuando los cristales de sal (cloruro de sodio o NaCl) se disuelven en el agua y desaparecen delante de tus narices, lo que en realidad está pasando es que el agua está deshaciendo los enlaces iónicos que mantienen los átomos de cloro y sodio unidos e impidiendo que vuelvan a juntarse. En esta situación, los átomos de cloro y sodio sólo podrán volver a formar cristales otra vez si el agua que los separa desaparece (por ejemplo, se evapora) o si se

introduce tanta sal en el agua que ya no quede espacio entre sus moléculas para poder seguir disolviéndola. Llegados a este punto, los átomos de cloro y sodio contenidos en la disolución se empiezan a unir al mismo tiempo que el material recién introducido se disuelve.

Se cree que esta capacidad para disolver compuestos iónicos es muy importante para la vida porque, desde el punto de vista químico, el cuerpo de un organismo se mantiene estable gracias a las reacciones químicas que tienen lugar en él de manera constante. Por tanto, un organismo debe contar con algún mecanismo que facilite el movimiento de los electrones a través de él para que las reacciones químicas que lo mantienen vivo se puedan realizar correctamente. Y ahí es donde entra en juego el agua.

En la Tierra, la vida ha evolucionado de manera que nuestras células utilizan el agua para mantener iones positivos (como el potasio, el sodio o el calcio) concentrados en su interior, dejando los negativos (como el cloro) fuera de ellas. De esta manera, las células crean un potencial eléctrico entre los dos lados de sus membranas que incentiva el flujo de electrones entre su interior y el exterior, proporcionando una manera de mantener en funcionamiento durante toda nuestra vida las reacciones químicas que nos permiten existir.

Pero, además, el agua proporciona un medio a través del cual las moléculas necesarias para la vida se pueden mover de un lado al otro de un cuerpo relativamente grande... De ahí que los animales complejos que pueblan nuestro planeta tengan en su interior una forma u otra de sangre, claro.

Si fuéramos masas sólidas sin sangre, entonces los nutrientes tendrían que llegar a cada célula de nuestro cuerpo difundiéndose a través nuestros tejidos desde el exterior. Ésa es precisamente la estrategia que utilizan aquí mismo, en la Tierra, las esponjas marinas, por poner un ejemplo. Como podéis suponer a partir del hecho de que estos animales no han ganado mucha complejidad

después de unos 600 millones de años de evolución, este sistema no es capaz de proporcionar, ni de lejos, la energía que necesita una forma de vida compleja.[20]

Por tanto, un sistema circulatorio líquido es posiblemente la mejor manera de transportar nutrientes de un lado a otro del cuerpo de un organismo complejo. Y, de entre todos los líquidos, el agua es el candidato ideal por su abundancia y su capacidad para disolver una gran variedad de sustancias. Eso sí, no todo lo que se encuentra en nuestro torrente sanguíneo está en disolución, por supuesto, como por ejemplo los glóbulos rojos que contienen el hierro que se combina con el oxígeno que respiramos para llevarlo hasta las células.

Éste es un pequeño resumen sobre por qué el consenso general entre la comunidad científica es que el agua y el carbono son los candidatos ideales para generar vida más allá de nuestro planeta. Por supuesto, eso no significa que tenga que ser necesariamente de esa manera pero, teniendo en cuenta que hay unos recursos limitados para buscar vida en el espacio, siempre será preferible apuntar los telescopios o mandar sondas a los lugares donde suponemos que hay una mayor probabilidad de encontrar algo.

Bueno, vale. Pero, oye, ¿y qué hay del origen de la vida en la Tierra? ¿Se sabe algo sobre eso?

La verdad es que es un tema muy interesante, *voz cursiva*, gracias por sacarlo.

Aún no se sabe con certeza cómo los elementos químicos presentes en la Tierra empezaron a unirse entre sí para dar lugar a las moléculas que, con el tiempo, terminarían volviéndose cada vez más complejas hasta dar lugar a los organismos que vemos hoy en día a nuestro alrededor. Pero tenemos datos suficientes como para hacernos una idea aproximada de lo que ocurrió.

Aunque hasta nuestros días han llegado una gran cantidad de fósiles que se remontan a cientos de millones de años en el pasado, es muy difícil investigar cómo fueron los primeros momentos de la vida porque el movimiento de las placas tectónicas ha destruido gran

parte de la superficie más antigua del planeta... Y, junto con ella, las pistas fosilizadas que pudiera albergar sobre el origen de la vida en la Tierra. Los fósiles más antiguos conocidos son unos estromatolitos de 3.700 millones de años de antigüedad[21] pero, de momento, no se ha encontrado ninguna evidencia de las moléculas que pudieron haber dado lugar a la vida compleja en períodos anteriores. Tampoco es de extrañar, porque cuesta imaginar que unas cuantas moléculas pudieran haberse preservado intactas entre las rocas durante miles de millones de años. Además, dependiendo de lo abundantes que hubieran sido, localizarlas sería una tarea aún más difícil.

Aunque no dispongamos de indicios fósiles de los procesos bioquímicos que dieron lugar a la vida en la Tierra, sí que podemos intentar deducir cómo eran las condiciones del planeta en el pasado remoto a través de experimentos y, partiendo de ahí, reproducir mecanismos que podrían haber conducido a la formación de las moléculas necesarias para que terminarais comprando este libro miles de millones de años después.[22]

Por ejemplo, en 1953, los científicos estadounidenses Stanley Miller y Harold Urey intentaron replicar la composición atmosférica de la Tierra primigenia para comprobar si podían crear las moléculas precursoras de la vida a partir de ella. Ambos investigadores asumieron que la atmósfera terrestre temprana debía estar compuesta en su mayor parte por los gases volcánicos que surgieron del interior del planeta tras su formación, así que crearon una mezcla de vapor de agua, metano, amoníaco e hidrógeno a través de la que pasarían un arco voltaico que simularía el efecto de los rayos.

Tras una semana efectuando descargas eléctricas a los gases, su experimento había producido 11 de los 20 aminoácidos necesarios para la vida terrestre. Un resultado prometedor, pero posiblemente poco fiable, ya que hoy en día se cree que Miller y Urey podrían haber estado totalmente equivocados sobre la composición de la atmósfera primigenia.

Los datos de los que disponemos hoy en día inducen a los científicos a pensar que la atmósfera de la Tierra primigenia podría haber estado compuesta principalmente por nitrógeno, vapor de agua y dióxido de carbono. Cuando se repite el mismo experimento con esta mezcla de gases, el resultado es mucho menos prometedor, ya que los compuestos de nitrógeno generados destruyen cualquier aminoácido en el momento en el que se forma... A menos que se añadan hierro y carbonatos a la mezcla, dos sustancias que se cree que serían abundantes en la Tierra primitiva. En ese caso, los compuestos de nitrógeno atacan a estas otras sustancias y los aminoácidos vuelven a formarse.[23]

Pero el problema sigue siendo el mismo: de momento, no podemos estar seguros de cuál era la composición de la atmósfera terrestre cuando la vida apareció. La dificultad de establecer con exactitud la composición química de la atmósfera primordial ha llevado a otros científicos a centrarse en el estudio del posible origen acuático de la vida, en concreto alrededor de las chimeneas hidrotermales que hay en el fondo de los océanos.

Una gran cantidad de gases calientes cargados de iones positivos salen del interior de la Tierra a través de las chimeneas hidrotermales, por lo que en los tubos y recovecos de su estructura rocosa podría haber existido un potencial eléctrico respetable entre el gas y el agua ácida de los océanos. En este escenario, la vida microscópica que se hubiera formado alrededor de las chimeneas tendría que haber desarrollado algún mecanismo que le permitiera producir su propio potencial eléctrico para poder seguir funcionando después de colonizar otros nichos ecológicos lejos de su hábitat natural... Y hay quien especula que el mecanismo que utilizan nuestras células hoy en día para regular el flujo de iones entre su interior y su exterior podría ser una reliquia evolutiva de aquella época.[24]

Por otro lado, puede que las moléculas necesarias para la vida ni siquiera estuvieran presentes en la Tierra en un primer momento. Pero eso tampoco representaría un gran problema para nosotros (de

lo contrario, no estaríamos aquí) porque también podrían haber sido depositadas sobre la Tierra por otros cuerpos celestes. Por los cometas, siendo más concretos.

Los cometas llevan dando vueltas por el sistema solar desde que éste se formó, así que son como una especie de cápsulas del tiempo que han permanecido inalteradas durante miles de millones de años. Y, curiosamente, además de agua, los cometas contienen cantidades considerables de distintos tipos de alcoholes, carbonilos, nitrilos, isocianatos, amidas y aminas. No os preocupéis si no estáis familiarizados con estos nombres porque lo importante es saber que, combinándose entre sí o descomponiéndose para dar lugar a otras moléculas, estas sustancias pueden generar los bloques básicos que componen la vida.[25] Ésta es la razón por la que hay quien defiende que el material necesario para que la vida apareciera en la Tierra pudo haber llegado desde el espacio.

Sea como sea, sabemos que las moléculas necesarias para la vida pueden aparecer a través de procesos naturales si se dan las condiciones adecuadas. Aún no se conoce el mecanismo a través del cual estas moléculas se pudieron empezar a unir para dar lugar a las primeras estructuras autorreplicantes que evolucionarían hasta convertirse en los seres vivos actuales, pero la ciencia no es un método instantáneo que permite transformar unas moléculas.

La cuestión es que el movimiento de los electrones entre los átomos que componen nuestras células es el fenómeno que permite que las moléculas que contienen se transformen en otras para liberar energía, codificar información, producir tejidos nuevos y, en general, mantenernos vivos. Pero, además, la existencia de los electrones y su disposición alrededor del núcleo de los átomos respondía a muchas otras preguntas que arrastrábamos desde la Antigüedad y, en particular, nos enseñaría de una vez por todas cuál es la conexión entre dos fenómenos tan distintos a primera vista como la electricidad y el magnetismo.

LA ELECTRICIDAD Y LOS ELECTRONES

Como hemos visto, los átomos contienen unas partículas con carga positiva llamadas protones y otras con la carga eléctrica opuesta, los electrones. Por tanto, cuando un átomo contiene el mismo número de protones que de electrones, adquiere carga eléctrica neutra. Pero, como los átomos pueden ganar y perder electrones, hay sustancias que terminan conteniendo un número mayor de cargas positivas o negativas y, por tanto, a los objetos fabricados con ellas les faltarán o sobrarán electrones. O, lo que es lo mismo, manifestarán una carga eléctrica positiva o negativa a nivel macroscópico.

Como los electrones que sobran en la sustancia con carga negativa buscarán cualquier excusa para migrar hacia una sustancia positiva, donde hay sitio para ellos, se dice que entre ambas sustancias existe un potencial eléctrico. Pero, igual que ocurre con la energía potencial gravitatoria, que un electrón posea una mayor energía potencial eléctrica no le otorga ninguna propiedad especial por sí misma: simplemente cuantifica el trabajo que va a realizar al moverse de un punto a otro.

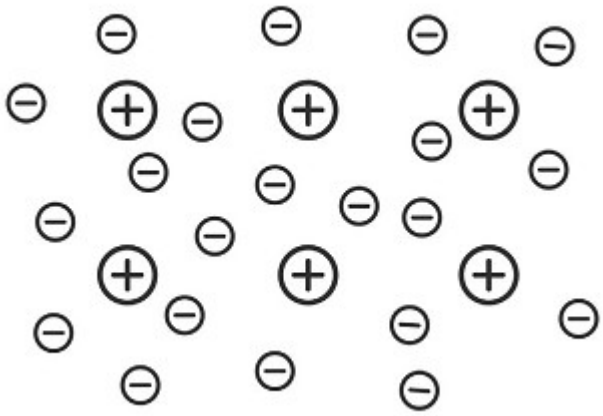
En cualquier caso, si aparece un camino entre un material que contiene demasiados electrones y otro que los está pidiendo a gritos, los electrones pasarán desde allí donde sobran hasta donde se les necesita. Este flujo de electrones es a lo que nos referimos como una *corriente eléctrica*, el fenómeno que hace que nuestros aparatos electrónicos funcionen y que del cielo caigan rayos.

¿Estás seguro de que los rayos caen siempre del cielo?

Tienes razón, *voz cursiva*, la dirección en la que se propaga un rayo depende de dónde esté la región en la que sobran o faltan electrones. De hecho, aunque la mayoría de los rayos suelen ir del cielo al suelo, también pueden recorrer el camino inverso o incluso propagarse entre regiones de distinta carga eléctrica contenidas dentro de las propias nubes.

Pero los electrones no son capaces de desplazarse con facilidad a través de cualquier material porque, como hemos visto, hay una serie de reglas que deben seguir para pasar de un átomo a otro. Los electrones se mueven más fácilmente a través de sustancias en las que tienen cierta libertad, como los metales.

El tipo de enlace que une los átomos que componen un bloque de metal no se parece a los que hemos visto en el apartado anterior: cuando un montón de átomos de un elemento metálico se unen, los electrones de su capa más externa dejan de pertenecer a un átomo concreto y terminan desperdigados por toda la estructura del material sin un orden determinado. Por eso se suele decir que los metales están compuestos por un montón de núcleos atómicos sumergidos en un mar de cargas negativas, de manera que la carga electrostática global es lo que mantiene la cohesión del material.



Este tipo de enlaces son la causa de que, en el vacío, dos trozos de metal similares puedan quedar pegados cuando entran en contacto, como si alguien los hubiera soldado, siempre y cuando sus superficies estén impolutas: como los electrones no pertenecen a ningún átomo en concreto, no son capaces de distinguir de qué pieza forman parte cuando las dos entran en contacto y las dos quedan unidas por las fuerzas electrostáticas. De hecho, se cree que

este curioso fenómeno pudo provocar el fallo de una antena de la sonda Galileo en 1991, impidiendo que se desplegara por completo cuando dos de sus componentes quedaron unidos.

¿Y esto ocurre en la Tierra?

Qué va, *voz cursiva*. En nuestro planeta, todas las superficies metálicas están cubiertas de una fina capa de óxido o suciedad en mayor o menor medida y, además, siempre habrá aire en contacto con cualquier trozo de metal que estemos manipulando, así que no te preocupes por eso.

La cuestión es que, precisamente, al no estar confinados en ningún átomo en particular, los electrones se pueden mover con facilidad a través de los metales.

Aaaah... Entonces por eso se usan cables de cobre para transportar la electricidad hasta nuestras casas.

Correcto, aunque, en realidad, el cobre no es el mejor conductor eléctrico que puedes encontrar en la tabla periódica. Ese título le corresponde a la plata, el metal que tiene una mayor conductividad eléctrica de todos.[26] Pero hay dos factores que impiden que la electricidad llegue a tu casa a través de cables de plata: su precio y su predisposición a reaccionar con el oxígeno al ser expuesta al aire.

Como resultado, el cobre se termina utilizando para fabricar los cables que tienen una masa considerable aunque sea el segundo mejor conductor eléctrico, ya que es una alternativa mucho más económica que la plata y, además, ofrece una resistencia decente a la corrosión. El tercer elemento con la mejor conductividad eléctrica, el oro, se utiliza en aplicaciones en las que la electricidad se debe transportar a lo largo de distancias muy cortas (y, por tanto, requieren muy poco material) y que necesitan un elemento muy inerte. De ahí que los circuitos de los procesadores de los teléfonos móviles y los ordenadores estén cubiertos de oro.

¡Eh, eh, espera! ¿Me quieres decir que ahora mismo llevo oro en el bolsillo?

Sí, pero suelta ese martillo, *voz cursiva*, porque se trata de una capa de oro de alrededor de una millonésima de milímetro de grosor que se encuentra en unas zonas muy concretas del circuito. En total, un ordenador moderno puede contener unos 100 mg de oro, tal vez 1 gramo si aún usas un ordenador de la década de los noventa...[27] Y para extraer ese oro hay que someter los circuitos a procesos químicos en los que hay involucrados ácidos y sustancias peligrosas, así que su extracción sólo sale rentable a muy gran escala.

Pero ya me has liado, *voz cursiva*. Ya hemos visto como la existencia de los electrones explicaba la naturaleza de las corrientes eléctricas, así que vamos a ver qué otros efectos producen estas pequeñas partículas con carga negativa.

LA ELECTRICIDAD Y EL MAGNETISMO: DOS FENÓMENOS QUE VAN DE LA MANO

El 21 de abril de 1820, el físico Hans Christian Ørsted estaba preparando un experimento para una de sus clases cuando notó que, al conectar un circuito a su batería, la aguja de una brújula que estaba cerca de uno de los cables se desviaba del norte magnético. Ørsted acababa de descubrir que, cuando una corriente eléctrica pasa de un lado a otro de un cable, a su alrededor aparece un campo magnético.

¡Por fin se conocía la conexión entre la electricidad y los campos magnéticos!

Sí, pero espera, *voz cursiva*, porque el fenómeno que produce un campo magnético a partir de una corriente eléctrica es un proceso algo más difícil de visualizar... ¿Tienes en mente la teoría de la relatividad especial de Einstein?

¿La que has comentado antes? ¿La que explicaba que la gravedad es una deformación del espacio-tiempo?

No, no, es la teoría de la relatividad general. La relatividad especial explica cómo cambia nuestra percepción del espacio y el tiempo cuando estamos en movimiento.

No, entonces no sé de qué diablos me estás hablando.

Pues resulta que Albert Einstein formuló la teoría de la relatividad especial al descubrir que cualquier observador, independientemente de la velocidad a la que se mueva, debería ver la luz desplazarse a unos 300.000 km/s. Si la frase aún no os ha parecido rara, imaginad esta situación: vais por la carretera detrás de un coche que se mueve a 100 km/h y os proponéis adelantarlo acelerando hasta los 200 km/h, porque sois unos inconscientes. Pisáis el acelerador a fondo, el motor ruge, la aguja del acelerador se dispara... Pero, por mucho que aceleréis, el coche que tenéis delante sigue alejándose de vosotros a 100 km/h sin que su conductor haya pisado el acelerador en ningún momento. Para hacer la situación más absurda, alguien que estuviera mirando la escena sentado en la terraza de un bar de carretera vería ese mismo coche moviéndose a 100 km/h y a vosotros detrás de él... Incluso aunque fuerais más rápido.

Esto no tiene ningún sentido, por supuesto. Si vais por la carretera a 200 km/h y adelantáis a un coche que va a 100 km/h, lo dejaréis atrás mientras os alejáis de él a un ritmo de 100 km/h, que es la diferencia entre las dos velocidades. El conductor de ese coche verá cómo vosotros os alejáis de él a 100 km/h, pero una patrulla de la policía que estuviera quieta a un lado de la carretera os vería moveros a 200 km/h, la velocidad a la que os desplazáis respecto a ellos, y os multarían por exceso de velocidad.

Pero la luz destruye por completo esta experiencia tan intuitiva porque siempre se desplaza a 300.000 km/s, independientemente de la velocidad a la que os mováis. Si, por ejemplo, vais por la carretera a 200.000 km/s (algo que no tiene por qué ser necesariamente una buena idea) y os adelanta un rayo de luz, lo veréis alejarse de vosotros a 300.000 km/s y no a los 100.000 km/s que os dicta

vuestra intuición. Y la patrulla de policía que está parada en la cuneta también lo verá pasar por delante de sus narices a la misma velocidad.

Pero ¿qué dices? ¿Me estás intentando tomar el pelo?

Pues no, *voz cursiva*, se trata de un fenómeno que predice la teoría de Einstein y que ha sido comprobado experimentalmente (en parte, con el experimento de los aviones y los relojes atómicos que he comentado en el capítulo anterior). Para explicarlo, Einstein razonó que, como la velocidad no es más que el espacio que recorre un objeto en un período de tiempo en concreto, si dos observadores que se mueven a velocidades distintas están observando la luz moverse a la misma velocidad, significa que cada uno debería estar percibiendo el espacio y el tiempo de una manera diferente.

Si el observador que se desplaza a unos 200.000 km/s percibe las distancias entre las cosas que hay más allá de su vehículo como si estuvieran encogidas, podrá ver el rayo moviéndose a 300.000 km/s, igual que una persona que está quieta que no nota este efecto. Pero, claro, como las distancias le parecerán más cortas, el observador que está en movimiento observará que ese mismo rayo de luz tiene una longitud de onda más corta (que se traduce en un color más azulado, como veremos en breve) desde su perspectiva. Por ejemplo, si un rayo de luz amarilla pasara frente a una persona que está quieta y otra que viaja a 223.451 km/s, las dos lo verían moverse a 300.000 km/s, pero el observador que está parado lo vería con un tono amarillento y al que está en movimiento le parecería de color azul.

Pero que el conductor que está en movimiento vea las distancias encogidas no basta para explicar este fenómeno. Para completar la ilusión, el universo dicta que, al viajar a velocidades cercanas a las de la luz, al conductor le parecerá que todo lo que ocurre fuera de su vehículo pasa a cámara lenta. Es decir, que su percepción del tiempo también se verá alterada en una medida mayor cuanto más rápido se desplace.

Entonces, ¿la gente verá el conductor moviéndose a cámara rápida en el interior de su vehículo?

No, no, desde fuera también parecerá que el conductor se mueve a cámara lenta en el interior del coche porque la situación se puede interpretar de cualquiera de las dos maneras: o es el vehículo el que se mueve a toda velocidad o es el mundo el que se mueve alrededor del vehículo, dependiendo del lado del volante en el que estés. Esto significa que si vemos a un viajero intergaláctico que se mueve a una velocidad cercana a la de la luz, le veremos contraído en la dirección de su movimiento y moviéndose a cámara lenta... Pero él también verá el mundo exterior de la misma manera.

Bueno, pero todo esto yo no lo noto cuando voy en coche.

Claro. Por suerte, este fenómeno sólo se vuelve perceptible a fracciones considerables de la velocidad de la luz, así que no lo notamos en nuestro día a día. Por ejemplo, si estamos sentados en un banco y un coche pasa por delante de nuestras narices a 120 km/h, su longitud nos parecerá alrededor de un 0,0000000000055% menor y su conductor se estará moviendo «a cámara lenta» en la misma medida debido a los efectos relativistas. Usando una cifra más tangible, suponiendo que ese coche mide tres metros de longitud, sufrirá una contracción de unas 165 cienmillonésimas de milímetro desde nuestro punto de vista... O sea, que no notaremos absolutamente nada raro.

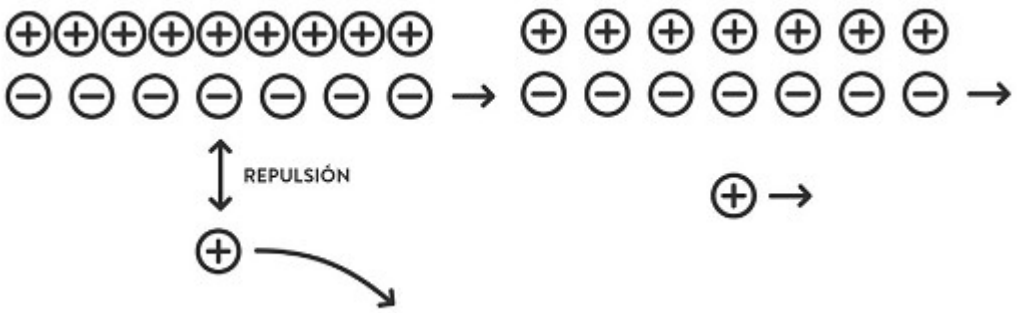
Vale, perfecto, pero ¿qué tiene todo esto que ver con los campos magnéticos que producen los cables?

Pues resulta que las cosas cambian si, en vez de una persona, eres un átomo con carga eléctrica que pasa cerca de un cable que contiene electrones en movimiento. En este caso, el átomo notará los efectos relativistas incluso aunque se desplace a una velocidad similar a la de la procesión de electrones que avanza a través del cable a velocidades del orden de milímetros por segundo.[28] Y las consecuencias para este átomo cargado serán curiosas.

Aunque los electrones estén desparramados sin orden ni concierto a través de los metales, en el interior de un cable siempre hay el mismo número de cargas eléctricas positivas y negativas, incluso aunque una corriente de electrones esté pasando a través de él. Por tanto, a primera vista parece que éste no debería atraer o repeler a las partículas cargadas cuando está en funcionamiento, porque su carga global debería ser neutra. Pero, entonces, ¿por qué los cables generan a su alrededor campos magnéticos que influencian a las partículas que tienen carga eléctrica?

Lo que ocurre en realidad es que, incluso a las velocidades minúsculas a las que se mueven los electrones a través del cable, las cargas eléctricas que lo componen notan los efectos de la relatividad especial. Por ejemplo, imaginemos que acercamos un átomo al que le faltan electrones y, por tanto, que tiene carga positiva, a un cable por el que pasa una corriente eléctrica. El átomo, que tiene un sentido de la vista metafórico excelente, puede observar que las cargas positivas del metal que compone el cable están quietas, como él, pero que los electrones se están moviendo en su dirección. En principio, para un observador que está quieto como nosotros, la densidad de cargas positivas y negativas en el material es la misma.

Pero, desde el punto de vista del átomo que se mueve en la dirección de los electrones, la distancia que separa las cargas positivas del cable está ligeramente contraída por los leves efectos relativistas provocados por su movimiento y, por tanto, la densidad de las cargas positivas que observa frente a él es ligeramente mayor que la de las cargas negativas. Como resultado, el cable deja de parecerle neutral a nuestro átomo y se ve repelido por las cargas positivas.



O sea, que un campo magnético generado por una corriente eléctrica es en realidad un campo eléctrico visto desde un punto de referencia relativista.

¿Cómo que es un campo eléctrico visto desde otra referencia? Entonces, ¿de dónde sale el campo magnético de un imán? ¡No hay corrientes eléctricas fluyendo por el interior de un imán! ¿...O sí?

Muy buena pregunta, *voz cursiva*.

En primer lugar, sólo se puede fabricar un imán permanente o, lo que es lo mismo, un objeto que genera un campo magnético a su alrededor sin necesidad de conectarlo a la corriente, con elementos cuyos orbitales más externos estén medio vacíos (o medio llenos, si sois ese tipo de persona).

Ah, bueno, ahora queda mucho más claro...

Vale, vale, me explico.

Como ya he comentado, los núcleos de los átomos están rodeados de capas de electrones que, a su vez, contienen orbitales en los que caben un máximo de dos electrones. Pero para vivir en uno de estos orbitales hay que respetar una regla de oro: dos electrones sólo podrán compartir el mismo orbital si tienen un spin opuesto.

Spin significa «rotar» en inglés, pero la propiedad que representa en realidad no tiene nada que ver con la rotación. Lo importante aquí es que las partículas con spin y carga eléctrica producen un dipolo magnético o, lo que es lo mismo, un polo norte y un polo sur magnéticos, equivalente al que generaría una partícula cargada que estuviera rotando sobre su propio eje.

La cuestión es que, como los átomos siempre intentan llenar de electrones su capa más externa y, por tanto, todos los orbitales que ésta contiene, el spin opuesto de los dos electrones que contiene cada orbital se anulan y el átomo en conjunto no presenta propiedades magnéticas. Pero resulta que la configuración electrónica de algunos elementos permite que en alguno de sus orbitales quede un electrón suelto y, por tanto, sin una pareja con spin opuesto que «anule» el magnetismo.

Éste es el motivo por el que los átomos de elementos con electrones desemparejados, los llamados elementos ferromagnéticos, sí que presentan propiedades magnéticas. En este grupo se pueden encontrar el hierro, el níquel, el cobalto y los elementos del grupo de los lantánidos de la tabla periódica.[29] Pero para que un bloque de un material ferromagnético genere un campo magnético propio a su alrededor no basta con que sus átomos tengan electrones desemparejados: a menos que la mayor parte de los electrones desemparejados que contiene un imán tengan su spin orientado en la misma dirección, los campos magnéticos de todos ellos se anularán entre sí y el objeto no presentará ningún magnetismo a una escala macroscópica.

En realidad, un imán sólo desarrollará sus propiedades magnéticas si conseguimos que el spin de la mayor cantidad posible de los electrones desemparejados que contiene esté alineado en la misma dirección. Es entonces cuando el efecto combinado de todos sus pequeños campos magnéticos se magnifica lo suficiente como para que se pueda extender alrededor del conjunto... Y tenemos en nuestras manos un imán permanente.



NO MAGNÉTICO MAGNÉTICO

Este fenómeno es curioso porque significa que, en el fondo, el campo magnético de un imán es la manifestación de una propiedad de los electrones, amplificada hasta el mundo macroscópico.[30]

Pero, además, igual que una corriente eléctrica que pasa a través de un cable puede dar lugar a un campo magnético a su alrededor, el campo magnético de un imán que se mueve cerca de un cable también puede provocar una corriente eléctrica a través de él. O, mejor dicho, puede generar un potencial eléctrico que da lugar a una corriente eléctrica.

De hecho, este fenómeno nos permite producir la mayor parte de la electricidad que utilizamos en nuestro día a día de una manera sorprendentemente sencilla: basta con colocar un imán en el interior de una espiral de cables muy compacta, conectarlo a un eje y hacerlo girar muy deprisa para que su campo magnético estimule la circulación de los electrones en el cable que lo rodea.

El proceso que mueve el eje al que está unido el imán es distinto en función del sistema de producción de energía del que forme parte. Por ejemplo, las centrales térmicas y las nucleares convierten el agua en vapor a alta presión para hacer girar las turbinas que están conectadas al imán. En las centrales térmicas, el calor proviene de la combustión de combustibles fósiles, mientras que en las centrales nucleares lo desprenden trozos de material radiactivo. Las centrales hidroeléctricas y eólicas, por su parte, hacen girar los imanes directamente con el movimiento del agua o el viento. En cualquier caso, todas estas tecnologías están basadas en el mismo principio, la inducción electromagnética, que posiblemente

es el fenómeno que más ha cambiado nuestra sociedad al ofrecernos una fuente de energía permanente a gran escala que nos ha permit...

Fantástico, fantástico. Siento interrumpirte, pero capto lo que quieres decir y aún hay una cuestión que me intriga. ¿Qué hay de la electricidad estática que producía Tales de Mileto cuando rascaba el ámbar contra el pelo de su gato o no sé qué?

Ah, sí, claro. En el caso del experimento menos glamuroso en el que nos frotamos el pelo con un globo, tu lustrosa melena se ve atraída hacia el globo porque el pelo se habrá quedado con algunos electrones del globo y habrá adoptado carga eléctrica negativa, mientras que la superficie del globo queda cargada positivamente. En este caso, la atracción producida se debe simplemente a que las cargas eléctricas opuestas se atraen y no tiene nada que ver con el magnetismo exhibido por los imanes.

OK, gracias.

Como podéis ver, unos fenómenos en apariencia tan distintos como pueden ser los campos magnéticos, las corrientes eléctricas y la electricidad estática comparten una misma causa: los tres son el resultado del movimiento de los electrones que dan vueltas alrededor del núcleo del átomo. Pero la existencia de los electrones explicaba otros aspectos de la realidad que, a primera vista, parecían aún más inconexos.

EL ORIGEN DE LA LUZ

A principios del siglo xx se había descubierto que el modelo planetario del átomo, en el que los electrones dan vueltas alrededor del núcleo igual que los planetas giran alrededor del Sol, tenía un fallo garrafal: como había revelado el físico escocés James Clerk Maxwell, una carga eléctrica acelerada emite energía en forma de radiación electromagnética. Por tanto, los electrones del modelo planetario deberían perder velocidad mientras dan vueltas en

círculos alrededor del núcleo porque no pararían de emitir radiación electromagnética. Esta emisión constante de energía los iría ralentizando y, por tanto, acabarían precipitándose hacia el centro del átomo y chocando contra él, igual que un planeta que se moviera demasiado despacio para mantener su órbita. De hecho, si el modelo planetario del átomo fuera fiel a la realidad, los átomos se desintegrarían en una fracción de segundo. Como, por suerte, la materia que nos rodea (y compone) lleva existiendo mucho tiempo, el modelo tenía que ser incorrecto.

Espera un momento, ¿qué es eso de la radiación electromagnética que emiten los electrones?

Ah, perdona por mencionarlo tan por encima, *voz cursiva*. Resulta que, además de dar origen a los campos eléctricos y magnéticos, el movimiento de los electrones también explica de dónde viene la luz.

Para solventar el problema de los electrones que caen hacia el núcleo en su modelo atómico, Niels Bohr añadió una nueva variable en 1913. Básicamente, dijo que los electrones no pueden precipitarse hacia el núcleo porque sólo pueden existir en unas órbitas muy concretas... Y se quedó tan tranquilo. Según este modelo corregido de Bohr, un electrón «salta» de una órbita a otra cuando gana o pierde energía, pero nunca puede acercarse tanto al núcleo como para colisionar con él.

Este modelo no era del todo correcto, pero es suficientemente simple y aproximado a la realidad como para que sea útil a nivel conceptual.

Los electrones son partículas con carga eléctrica y, como tales, están rodeados por un campo eléctrico. Como hemos visto, un campo eléctrico que está en movimiento genera un campo magnético y, a su vez, el movimiento de un campo magnético también puede generar más electricidad. Por tanto, cuando un electrón da un salto hasta una órbita diferente en el modelo de Bohr, produce un campo magnético frente a él que, a su vez, produce otro

campo eléctrico, que también genera un campo magnético más... Y, bueno, este bucle continúa propagándose por el espacio indefinidamente a unos 300.000 km/s.

Espera, esa cifra, la velocidad de la l...

Sí, *voz cursiva*, estos campos eléctricos y magnéticos oscilantes que emiten los electrones al moverse, las llamadas ondas electromagnéticas, son lo que nuestros ojos interpretan como «luz».

¿Me estás diciendo que esa preciosa puesta de Sol que vi el otro día no era más que un montón campos eléctricos y magnéticos enmarañados que llegaban hasta mis retinas?

En efecto. Pero es que, además, seguramente te estabas perdiendo una gran cantidad de detalles de esa puesta de Sol, porque nuestros ojos sólo son capaces de detectar un tipo muy específico de radiación electromagnética.

Las oscilaciones de los campos magnéticos y eléctricos que componen la luz se producen a lo largo de una distancia mayor o menor en función de la energía que estuviera involucrada en su producción. Esta característica se llama longitud de onda y puede abarcar desde varios kilómetros hasta distancias más cortas que un núcleo atómico. Al mismo tiempo, como todas las ondas electromagnéticas se propagan a la misma velocidad, independientemente de su longitud de onda, las ondas con una longitud de onda más corta oscilan más veces al recorrer la misma distancia que las más largas, así que tienen una frecuencia mayor (oscilan más veces cada segundo, vaya). En consecuencia, una onda electromagnética será más energética cuanto mayor sea su frecuencia o, de la misma manera, cuanto menor sea su longitud de onda.

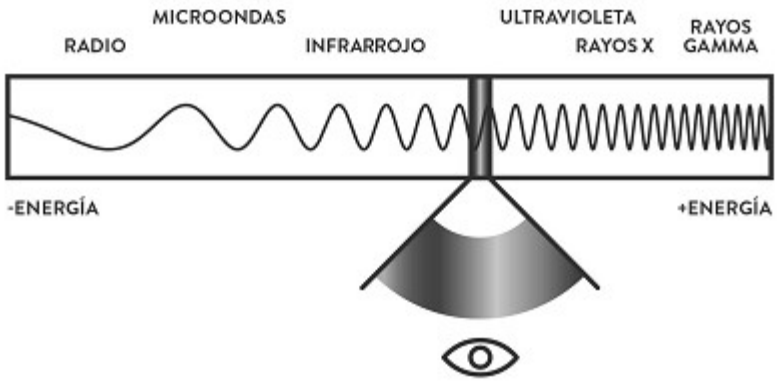
¿Cómo que «más energética»? ¿Cómo puede un rayo de luz tener más energía que otro?

Como hemos visto, significa que tendrá una mayor capacidad para realizar trabajo o «mover cosas de un lado otro».

A finales del siglo XIX los científicos observaron que un rayo de luz que incide sobre un trozo de metal es capaz de arrancar electrones de su superficie. Este fenómeno se llama efecto fotoeléctrico y tiene una particularidad bastante curiosa: para que los electrones empiecen a saltar de la superficie del metal, el rayo de luz que incide sobre él debe tener una frecuencia y, por tanto, una energía, mínima. Si su frecuencia es demasiado baja (o su longitud de onda demasiado larga), entonces ningún electrón se verá afectado, por muy intensa que sea la luz o por mucho tiempo que pase encendida. Pero, una vez superada la frecuencia mínima necesaria, los electrones empiezan a saltar del metal, llegando más lejos cuanto mayor es la frecuencia de la luz.

A partir de estos experimentos se pudo empezar a entender la relación que existe entre la frecuencia de la luz y su energía y, de hecho, las propiedades de las ondas electromagnéticas varían muchísimo en función de la frecuencia con la que oscilen.

El espectro electromagnético es el término general que representa todo el abanico de posibles frecuencias que puede adoptar la radiación electromagnética y está dividido en varios grupos de ondas que presentan características similares, como por ejemplo las ondas de radio, la radiación infrarroja o los rayos X:



Pero, de entre todos estos tipos de ondas, nuestros ojos sólo son capaces de detectar aquellas que tienen una frecuencia de entre 430 y 770 terahertzios (THz), lo que significa que oscilan entre 430 y

770 billones de veces por segundo. Como las ondas electromagnéticas se propagan a la velocidad de la luz, en términos de longitud de onda, esta frecuencia se corresponde con las ondas que alternan sus campos eléctricos y magnéticos en un espacio de entre 390 y 700 nanómetros. Esta pequeña franja es a la que nos referimos como luz visible y, como podéis ver en la imagen anterior, representa una porción minúscula de todos los «tipos de luz» posibles que, como resultado, son completamente invisibles para nosotros.

Pero incluso esta pequeña franja del espectro electromagnético nos da una gran información sobre nuestro entorno.

Nuestros ojos interpretan como «colores» las diferentes frecuencias de las ondas electromagnéticas que se encuentran dentro del rango de luz visible: las longitudes de onda más largas corresponden a los colores rojizos y las más cortas a las azules, con el resto de las tonalidades como el verde o el amarillo entre ellas. En realidad, si nos ponemos tiquismiquis, ni siquiera podemos «ver» directamente todos los colores de ese intervalo porque, técnicamente, nuestros ojos sólo pueden detectar tres colores.

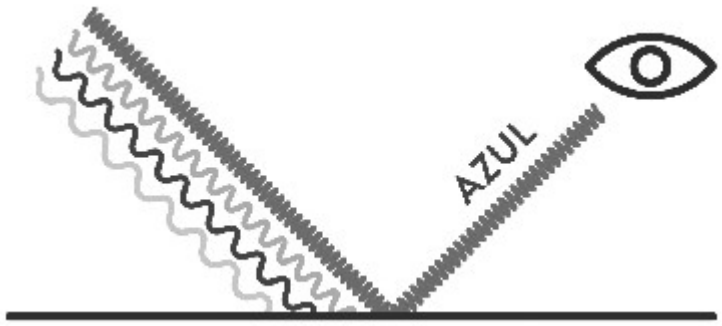
Esto se debe a que en el interior de nuestros ojos tenemos entre 6 y 7 millones de estructuras llamadas conos que pueden detectar tres tipos de longitudes de onda (o colores) diferentes: el 64% reaccionan ante las longitudes de onda comprendidas entre 564 y 580 nanómetros (los colores rojos), el 32% controlan el rango de 534 a 545 nanómetros (los verdes) y el 2% pueden detectar la luz de entre 420 y 440 nanómetros (los azules).[31] Igual que los píxeles de una pantalla de ordenador contienen tres colores básicos que, combinados, producen todos los colores de una imagen, nuestro cerebro analiza las proporciones de estos tres componentes fundamentales del color y asigna a cada punto de nuestro campo de visión el color que le corresponde.

¿Sólo detectamos tres colores? ¡Menuda estafa!

Al contrario, es una manera muy eficiente de procesar la información: si tuviéramos un tipo de cono distinto para detectar cada color, entonces tendríamos muy pocos conos asignados a cada longitud de onda y seguramente nuestro sentido de la vista empeoraría. Y eso por no hablar de la cantidad de trabajo tendría que invertir nuestro cerebro para procesar toda esa información.

¿Y por qué las cosas tienen color en un primer lugar? ¿De dónde sale el color?

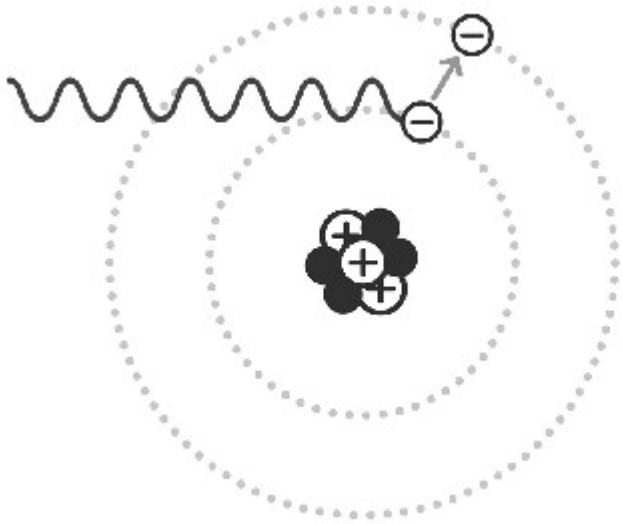
Como hemos visto, los colores son en realidad ondas electromagnéticas que oscilan en un rango de frecuencias concreto. Resulta que, cuando un rayo de luz incide sobre un objeto, algunas de estas frecuencias se verán absorbidas por su superficie y otras serán reflejadas, dependiendo del tipo de material. Esas ondas electromagnéticas reflejadas son las que terminan llegando hasta nuestros ojos y las que interpretamos como el «color» de un objeto.



O sea que, en realidad, el color no es una propiedad intrínseca del objeto que estamos observando, sino que depende de la frecuencia de las ondas electromagnéticas que su superficie es capaz de reflejar. Y, antes de que la *voz cursiva* lo pregunte, los colores que absorberá o reflejará un objeto dependerán de cómo interaccione la luz con los electrones de su superficie.

De la misma manera que los electrones emiten un pulso electromagnético cuando saltan a una órbita inferior, un electrón puede absorber un rayo de luz y utilizar su energía para pasar a una órbita superior. Pero los electrones sólo pueden ocupar unas órbitas

muy concretas, así que un átomo sólo podrá absorber los rayos de luz que inciden sobre él si le proporcionan la energía suficiente a sus electrones como para que puedan dar ese salto... Y, como la energía de un rayo de luz es un reflejo de su frecuencia o, desde nuestro punto de vista, de su color, cada sustancia tiende a absorber unos colores u otros, en función de su configuración electrónica.



Pero ¿de dónde salen esos colores? Porque la inmensa mayoría de las luces con las que me encuentro en mi día a día no tienen color.

Claro, es que la mayoría de las fuentes de luz que iluminan nuestro entorno en el día a día emiten luz blanca en una mayor o menor medida. Incluso el brillo del Sol, que solemos representar con un color amarillento en nuestros dibujos infantiles, es blanco a efectos prácticos. La respuesta a tu pregunta es que no hay ninguna frecuencia electromagnética que corresponda a la luz blanca: en realidad, el color blanco de la luz es una mezcla de todo el rango de frecuencias de la luz visible o, lo que es lo mismo, de todos los colores. Por tanto, cuando la luz blanca incide sobre alguna superficie, algunos de los colores que contiene se verán absorbidos por ésta, pero otros se reflejarán y llegarán hasta nuestros ojos.

O sea que, en realidad, el color de un objeto no es más que el reflejo de las frecuencias electromagnéticas que su superficie no es capaz de absorber. Por ejemplo, las hojas de los árboles tienen una alta concentración de clorofila, la molécula que les permite realizar la fotosíntesis. Para llevar a cabo su trabajo, la clorofila absorbe las longitudes de onda más largas y más cortas de la luz blanca del Sol, los rojos y azules, dejando escapar la luz verde.

Y de ahí que las hojas sean de color verde, ¿no?

Exacto, *voz cursiva*. Y, como puedes imaginar por lo que acabo de comentar, existe otro color, además del blanco, que no tiene ninguna longitud de onda asociada: el negro.

Una superficie nos parecerá negra si absorbe todas las longitudes de onda de los rayos de luz visible que inciden sobre ella y, por tanto, no refleja ningún color hacia nuestros ojos. Por supuesto, en nuestro día a día no nos encontramos con materiales que sean completamente negros porque todas las sustancias que nos rodean reflejan un poco de luz en mayor o menor medida, pero en los últimos años se han fabricado materiales como el Vantablack, capaz de absorber el 99,965% de la luz que incide sobre su superficie. Este material es tan oscuro que cualquier objeto tridimensional que se recubre con él parece plano.[32] Por si eso fuera poco, los creadores del Vantablack están trabajando en una versión aún más oscura, tanto que hasta la luz de un láser parece desaparecer cuando pasa por encima de su superficie.[33]

El secreto de la oscuridad de este material está en su superficie cubierta de tubos microscópicos de carbono, un elemento que ya de por sí es de color negro. Parte de la luz que interacciona con él se ve absorbida al entrar en contacto por primera vez con los tubos pero, en vez de salir disparada hacia el ojo humano más cercano, la poca luz que consigue sobrevivir al encuentro continúa rebotando entre la selva de carbono, perdiendo energía con cada choque hasta que prácticamente desaparece. Como el material atrapa casi toda la luz que incide sobre su superficie, nuestros ojos sólo son capaces de ver en su lugar una negrura absoluta.

En el extremo opuesto, el material que produce la blancura más intensa descubierto hasta la fecha son las escamas unos escarabajos del género *Cyphochilus*, nativos del sureste asiático, capaces de reflejar todas las longitudes de onda de la luz solar utilizando una cantidad mínima de material.[34]

Pero, si damos un paso más allá en el campo de la reflexión de la luz, encontramos los espejos.

Un espejo es una fina capa de metal pulido (normalmente plata o aluminio, en función de su precio) cubierta por una lámina de cristal. Como hemos visto, los metales están llenos de electrones que tienen una libertad de movimiento considerable. Por tanto, la luz que incide sobre la superficie de un metal será absorbida por alguno de sus electrones libres que, como no tienen ninguna órbita superior a la que saltar, simplemente se pondrán a vibrar. Al tener un campo eléctrico propio, la vibración del electrón producirá un nuevo pulso luminoso idéntico al que había recibido, que saldrá de la superficie del espejo y terminará llegando hasta nuestros ojos. Y eso es, básicamente, la imagen que vemos reflejada.[35]

Pero entonces ¿por qué no todas las superficies metálicas son espejos?

Porque para que esto ocurra la superficie del metal tiene que ser muy, muy lisa. De lo contrario, las pequeñas imperfecciones de la superficie disiparán cada rayo de luz en una dirección distinta y, como resultado, no producirán una imagen definida.

Pero más allá del colorido de un material, también existen objetos transparentes que dejan pasar la luz a través de ellos en vez de absorberla o reflejarla. Y, de nuevo, los culpables de este efecto son los electrones.

Volviendo al concepto anterior, habíamos visto que un átomo absorberá un rayo de luz si la energía de éste le permite mover alguno de sus electrones a una órbita superior. Pero, si la longitud de onda del rayo de luz no le aporta la energía suficiente para cambiar

un electrón de órbita, entonces la radiación electromagnética simplemente pasará a través del átomo sin interaccionar con él y material será transparente a esa longitud de onda.

Éste es el motivo, por ejemplo, de que el cristal de las ventanas sea transparente a la luz visible: la luz visible no tiene la energía suficiente para mover de una órbita a otra los electrones que contienen los átomos que forman el cristal y, como resultado, la luz pasa a través de ellos. Es más, este fenómeno se puede utilizar para limitar los tipos de ondas electromagnéticas que quieres que pasen a través de un material.

Por ejemplo, nadie quiere que la luz ultravioleta del Sol entre por sus ventanas porque puede provocar cáncer de piel. Por suerte, el cristal se puede tratar químicamente para que bloquee la luz ultravioleta pero deje pasar la luz visible. Esto es posible porque, al ser más energética que la luz visible, la radiación ultravioleta sí es capaz de hacer que los electrones del cristal tratado cambien de órbita, lo que se traduce en su absorción. La luz visible, al tener una energía menor, no es capaz de mover los electrones del cristal tratado y sigue pasando a través de él como si nada. De hecho, si nuestros ojos sólo pudieran detectar la radiación ultravioleta, un trozo de cristal que hubiera recibido este tratamiento nos parecería opaco como un bloque de cerámica.

Como habréis deducido a partir de este ejemplo, los diferentes tipos de ondas electromagnéticas reaccionan de manera distinta con la materia que encuentran a su paso. Y eso puede llegar a ser una ventaja si sabes cómo aprovecharlo.

LAS ONDAS DE RADIO
Y LAS TELECOMUNICACIONES

Tener un lenguaje con el que podemos transmitir conceptos complejos entre nosotros está muy bien pero, por desgr... Bueno, no, por suerte, el alcance de la voz humana tiene sus límites. Por

tanto, a lo largo de la historia hemos tenido que idear otros métodos que nos permitieran intercambiar información con la gente que está más lejos de lo que nuestras palabras pueden llegar por sí solas.

Al principio, la gente suplía sus propias voces con el sonido de tambores o cuernos. Incluso podían utilizar señales de humo o llamas visibles a grandes distancias para comunicarse con puntos aún más lejanos. Estos métodos podían transmitir la información de una manera bastante rápida (a la velocidad del sonido, en el caso de los ruidos, y a la velocidad de la luz, en el caso de las señales visuales), pero los mensajes que podían comunicar eran muy simples. Por otro lado, tanto la rápida pérdida de intensidad de la señal, ya sea acústica o luminosa, como la curvatura de la Tierra impedían que dos puntos muy lejanos se pudieran comunicar directamente... Y, además, el mensaje podía llegar fácilmente a los ojos u oídos de gente indeseada.

La invención del lenguaje escrito abrió la puerta a una nueva forma de comunicar mensajes complejos: bastaba con estampar sobre una superficie exactamente lo que querías decir y hacer llegar esa superficie a tu destinatario. Este método permitía transmitir la información de una manera mucho más fiable, pero dio pie a otro problema: el mensaje físico tenía que llegar personalmente hasta las manos del destinatario... Y los medios de locomoción de la época estaban muy lejos de alcanzar la velocidad del sonido, por no hablar de la de la luz. La gente intentó acelerar los envíos montando a los mensajeros sobre animales más rápidos que nosotros, como los caballos o los camellos, o incluso dejando que fueran las palomas las que llevaran sus palabras a través del cielo... Pero el proceso de entrega seguía siendo muy lento.

En 1816, un inventor inglés llamado Francis Ronalds creó un aparato que permitía mandar pulsos eléctricos a través de un cable utilizando un generador de electricidad estática. Este invento culminaría en la inauguración en 1838 de la primera línea de telégrafo comercial que permitía la comunicación instantánea entre las personas que estaban separadas por los 21 kilómetros que hay

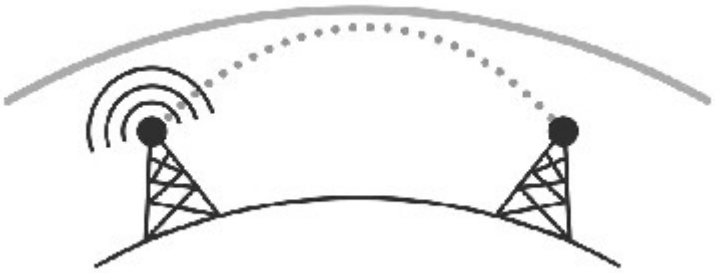
entre la estación de Paddington, en Londres, y la de West Drayton. En 1858 se tendió la primera línea telegráfica transoceánica, que iba desde Irlanda hasta Terranova, en Canadá. Pero, aun así, las comunicaciones aún se podían mejorar. Y ahí es donde las ondas de radio demostraron su valía.

Al tener una longitud de onda tan larga y, por tanto, una energía tan baja, las ondas de radio atraviesan la mayor parte de los materiales con los que entran en contacto porque no son capaces de mover sus electrones de una órbita a otra, por poca energía que necesiten. Como podéis imaginar, esto permite a las ondas de radio cubrir grandes distancias a través de la atmósfera sin ser absorbidas por ella.

Un aparato emisor de radio no deja de ser una especie de bombilla que emite una luz que nuestros ojos no pueden ver y, aunque esta radiación pueda atravesar las (relativamente finas) paredes de nuestras casas, no son capaces de atravesar kilómetros de material sólido. Como resultado, las ondas de radio sufren el mismo problema que la luz visible a la hora de cubrir largas distancias: la curvatura de la Tierra limita su alcance sobre la superficie terrestre. Pero, por suerte para nuestra ansia por comunicarnos, las ondas de radio se comportan de manera distinta a la luz visible.

Por encima de los 60 kilómetros de altura existe la ionosfera, una capa de la atmósfera terrestre donde el aire está cargado de iones (o átomos que tienen carga eléctrica) y electrones libres. Cuando una onda de radio alcanza esta capa de la atmósfera terrestre, hace que sus electrones libres vibren y vuelvan a emitir ondas con la misma frecuencia de vuelta hacia la Tierra, de manera parecida a lo que le ocurre a la luz visible cuando incide sobre la superficie de un espejo. Los sistemas de comunicación por radio utilizan este fenómeno para reflejar (refractar, en realidad) las ondas que emiten, de manera que puedan pasar por encima de la

curvatura del planeta. Si rebotan contra una cantidad suficiente de repetidores, las ondas de radio pueden llegar a cualquier parte del mundo.[36]



Este método de comunicación nos da lo mejor de los dos mundos: podemos codificar información muy compleja en los mensajes y a la vez transmitirlos a la velocidad de la luz. Pero existe otro método interesante.

Antes de que se extendiera el uso de la fibra óptica en las telecomunicaciones, la mayoría de las llamadas de teléfono de larga distancia se transmitían de un lugar a otro utilizando otro tipo de radiación electromagnética de baja energía, las microondas.

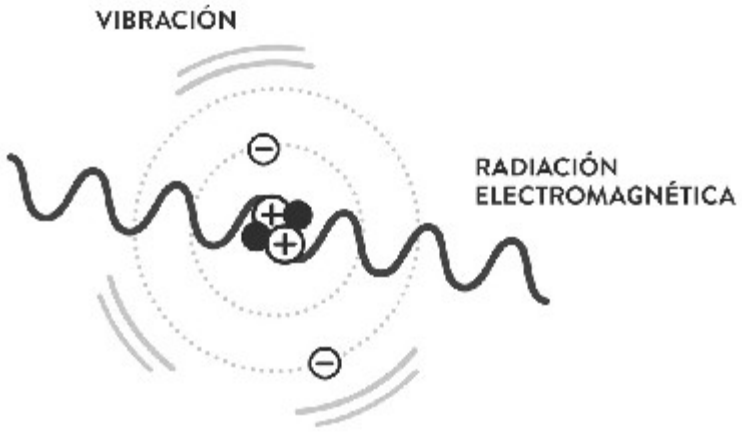
Para su uso en telecomunicaciones, las antenas de microondas mandan la información de un repetidor a otro a través de haces muy bien enfocados. Se intenta colocar los repetidores a la mayor altura posible, normalmente en las cimas de las montañas, porque de esta manera pueden «asomarse» en una mayor medida por encima de la curvatura de la Tierra y, como resultado, la siguiente estación de la red se puede colocar mucho más lejos, lo que se traduce en una cantidad menor de estaciones para comunicar dos puntos distantes. Para hacernos una idea de cuánto afecta la altura a esta tecnología, basta saber que una persona que se encuentre de pie a nivel del mar podrá ver a su alrededor todo lo que se encuentre en un radio de unos 5 kilómetros (desde sus pies hasta el horizonte, vaya). Más allá de esta distancia, la curvatura del planeta bloquea cualquier señal que se encuentre al otro lado. Colocando las antenas a una

altura mayor, la distancia al horizonte puede llegar a aumentar hasta unos 70 kilómetros (en el caso de la cima de una montaña de unos 4,4 kilómetros de altura).

Pero, en realidad, es más probable que vuestra familiarización con las microondas provenga del aparato que lleva el mismo nombre y que (seguramente) tenéis en la cocina.

LA LUZ Y LOS ENLACES QUÍMICOS

Resulta que las ondas electromagnéticas no sólo se ven absorbidas por un átomo cuando consiguen que un electrón salte de una órbita a otra. Los átomos y las moléculas que componen las sustancias que nos rodean tienen tamaños y formas diferentes de manera que, cuando una onda electromagnética incide sobre ellas, también pueden absorber su energía rotando o vibrando, incluso aunque ésta no sea lo suficientemente energética como para afectar a la órbita de sus electrones. Como la temperatura de un objeto es simplemente un reflejo de lo rápido que se mueven los átomos o las moléculas que lo componen (más sobre esto en un momento), la vibración inducida por las ondas electromagnéticas puede hacer que aumente la temperatura del objeto sobre el que éstas inciden.



La mayor parte de la comida que nos llevamos a la boca tiene un alto contenido en agua, una molécula con una frecuencia de vibración de unos 2,45 GHz. Esto significa que, cuando una onda electromagnética con una frecuencia de 2,45 GHz actúa sobre el agua, sus moléculas empiezan a vibrar. Y resulta que esta frecuencia está en el rango del espectro electromagnético en el que se encuentra la radiación de microondas por lo que, básicamente, lo único que hace un microondas al calentar la comida es sacudir con fuerza las moléculas de agua que contiene. Así que no os preocupéis si en algunos sitios de dudosa credibilidad leéis que los alimentos calentados en el microondas son malos para la salud: este aparato sólo hace vibrar las moléculas, sin cambiar su composición química más allá de lo que lo hace cualquier otra fuente de calor.

La vibración inducida por la radiación electromagnética también es el motivo por el que la radiación infrarroja transfiere mejor el calor a algunas sustancias que otras longitudes de onda más energéticas, como la luz visible o la ultravioleta. Los metales, en cambio, tienden a reflejar muy bien la radiación infrarroja, de manera que apenas se calientan ante su presencia.

Por otro lado, los tipos de radiación electromagnética más energéticos que la luz visible nos dan algún que otro problema a los seres vivos.

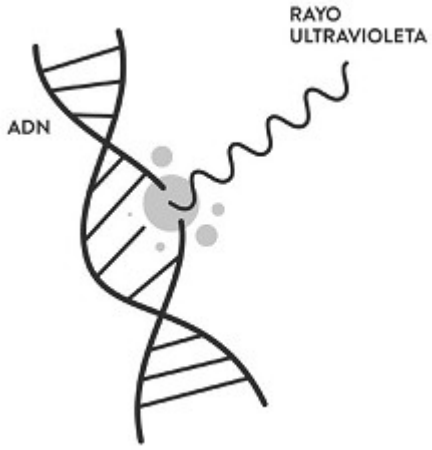
Cuando un rayo de luz suficientemente energético incide sobre un átomo o una molécula y sus electrones saltan momentáneamente hacia una órbita distinta, su configuración electrónica cambia momentáneamente y, por tanto, también lo hacen sus propiedades químicas, lo que significa que el átomo o la molécula se puede recombinar con algún otro elemento de su entorno, formando un compuesto nuevo.

Esto no sería un problema demasiado grave si el ADN de nuestras células no contuviera las instrucciones necesarias para su correcto desarrollo codificadas en una secuencia de moléculas muy específica. Si esta secuencia de moléculas se ve alterada de alguna manera, la información que contiene se puede corromper y dar lugar

a instrucciones erróneas que la célula no pueda interpretar correctamente... Y es precisamente el efecto que provoca la radiación más energética sobre nuestro organismo.

Cuando los rayos ultravioleta del sol impactan contra nuestra piel, penetran hasta la profundidad suficiente como para alterar la estructura química del ADN de nuestras células cutáneas.

Las células cuentan con mecanismos para reparar el daño por su cuenta aunque, cuando la situación es demasiado grave, simplemente se dejan morir para evitar que cualquier error que se haya producido en su ADN se propague cuando las células se empiecen a reproducir. De hecho, toda esa piel que se te cae en verano tras sufrir una quemadura solar son las células dañadas de tu piel inmolándose para evitar un daño mayor.



Pero estos sistemas de protección no son infalibles: en el improbable caso de que fallen, las células dañadas pueden empezar a reproducirse sin control siguiendo las instrucciones equivocadas. Y entonces es cuando puede aparecer un tumor.[37]

De ahí la importancia de ponerse crema solar para bloquear la radiación más energética del sol, *voz cursiva*.

Tomo nota, aunque sabes que yo no tengo cuerpo. Oye, ¿a qué te referías antes cuando has comentado algo sobre que la verdadera causa de la temperatura es el movimiento de las moléculas?

Ah, sí, se me olvidaba. Hablemos sobre la causa real de la temperatura y, de paso, sobre cómo contribuye el calor a la producción de radiación electromagnética.

LA TEMPERATURA Y LA RADIACIÓN

Toda la materia que nos rodea está emitiendo radiación electromagnética de manera constante. Y esto se debe a que cualquier objeto, desde el sofá sobre el que estás tumbado hasta tu propio cuerpo, pasando por las paredes que te rodean o los cubitos de hielo de tu bebida, está caliente.

¡Eh, muchacho, que te has equivocado! ¡Los cubitos de hielo están fríos!

No me he equivocado, *voz cursiva*, lo que pasa es que, como seres humanos, notaremos frío cada vez que toquemos algo que se encuentra por debajo de nuestra temperatura corporal. Pero la realidad es que existe una temperatura mínima posible, –273,15 °C, así que cualquier cosa que se encuentre por encima de este límite estará oficialmente caliente. Y, además, cualquier sustancia que tenga una temperatura superior a –273,15 °C emitirá radiación electromagnética.

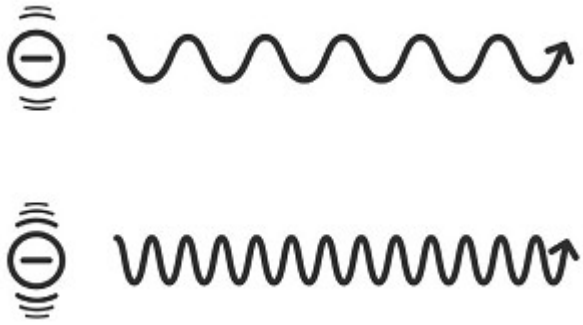
Espera, espera, ¿dices que el hielo de mi bebida está emitiendo luz?

No, no. Mejor me explico.

En realidad, lo que nuestros cuerpos interpretan como temperatura no es más que un reflejo de lo rápido que vibran las partículas que componen un material, ya sean moléculas o átomos: cuanto más rápido se muevan las partículas, mayor será su temperatura. Por esta razón la temperatura más baja posible, el llamado cero absoluto, se alcanza cuando todas las partículas de una sustancia están totalmente quietas... Algo que ocurre a los –273,15 °C.

Cualquier partícula que se encuentre a una temperatura superior a la del cero absoluto estará en movimiento, y si esa partícula tiene carga eléctrica, generará ondas electromagnéticas. Por tanto, toda la materia que nos rodea está produciendo radiación electromagnética de manera constante porque los átomos que la componen están en movimiento. El tipo de radiación que emitan dependerá de la velocidad a la que se muevan.

Las partículas contenidas en un objeto frío oscilarán muy despacio, de manera que la frecuencia de las ondas electromagnéticas que emitirá será muy baja y, por tanto, poco energética (ondas de radio, microondas e infrarrojos). A medida que la temperatura de una sustancia aumenta, sus átomos vibran a una velocidad cada vez mayor y empiezan a emitir radiación electromagnética más energética (luz visible, ultravioleta, rayos X o rayos gamma).



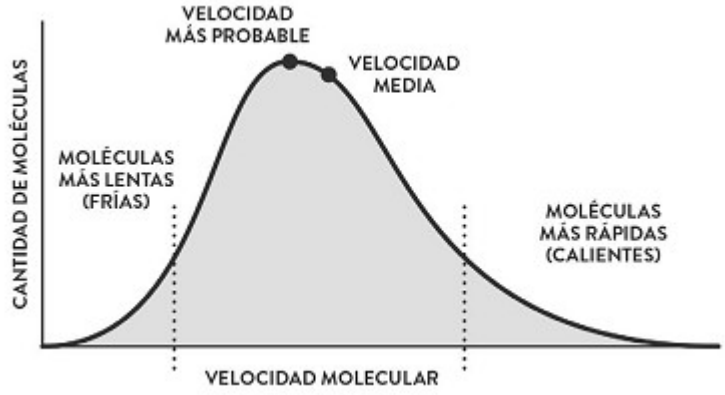
Por ejemplo, a unos 32 °C de temperatura, la piel humana emite radiación infrarroja de manera constante. Nuestros ojos no son capaces de detectar este tipo de radiación, por supuesto, pero con las ayuda de una cámara infrarroja podemos ver lo que nuestros ojos nos enseñarían si pudieran procesarla.

A medida que la temperatura de un cuerpo (no necesariamente humano) aumenta, las longitudes de onda que emite van volviéndose cada vez más energéticas hasta que la mayoría de sus moléculas vibran con la violencia suficiente como para empezar a emitir luz visible, algo que ocurre cuando alcanza temperaturas

superiores a 525 °C. Este fenómeno es el que hace que una barra de hierro brille con un tono rojizo cuando se calienta lo suficiente, por poner un ejemplo.

Un momento. ¿Qué es eso de «la mayoría de sus moléculas»?

Perdona, me he saltado un matiz: la temperatura de un objeto se corresponde en realidad con la velocidad media a la que se mueven todas las partículas que lo componen. En un cuerpo sólido, la mayoría de las moléculas o átomos tendrán una velocidad parecida porque están unidos por enlaces bastante rígidos, pero en un líquido o un gas siempre habrá partículas que se muevan más rápido que las demás. La distribución de velocidades de las partículas suele reflejarse así...



...lo que, básicamente, viene a decir que la mayoría de las partículas que componen un objeto se mueven a velocidades cercanas a la velocidad media, siendo las más rápidas y las más lentas una minoría. Pero esa minoría tiene efectos observables: cualquier trozo de materia caliente contendrá en su interior partículas que vibran a velocidades diferentes, así que un mismo objeto puede emitir diferentes frecuencias de radiación electromagnética.

Por ejemplo, he comentado que la piel humana emite radiación infrarroja, pero es que la radiación infrarroja abarca cualquier onda electromagnética que tenga una longitud de onda comprendida

entre 710 nanómetros y un milímetro.[38] O sea que, en realidad, la piel humana emite varias longitudes de onda dentro del rango infrarrojo.

Como ejemplo adicional, los filamentos de las bombillas incandescentes alcanzan temperaturas de entre 1.700 °C y 3.000 °C para producir la luz que utilizamos en nuestro día a día. Incluso a esta temperatura, la mayor parte de la energía emitida por las bombillas incandescentes se encuentra en la parte infrarroja del espectro, de modo que sólo alrededor del 2% de la energía invertida en ellas se convierte en luz visible que nuestros ojos son capaces de detectar.[39] Es verdad que el tungsteno que se utiliza para fabricar los filamentos de las bombillas emite la mayor cantidad de luz visible cuando ronda los 6.000 °C,[40] temperatura que rivaliza con la superficie del Sol pero, aunque el tungsteno es uno de los materiales con el punto de fusión más elevado (3.700 °C), someterlo a temperaturas tan altas sería absurdo porque... Bueno, porque dejaría de ser un filamento.

Y ya que estamos hablando de la superficie del Sol, salgamos un rato de la atmósfera de la Tierra.

A una temperatura de unos 5.800 °C, la radiación electromagnética que emite la superficie del Sol con una mayor intensidad ronda la longitud de onda de 550 nanómetros, que corresponde a un tono entre el amarillo y el verde, pero más amarillo que verdoso. De todos modos, se trata de un efecto imperceptible y cualquier rastro de amarillo que notéis a simple vista en la luz solar es un producto de su interacción con la atmósfera terrestre, que absorbe las longitudes de onda más cortas y hace que hasta la superficie lleguen las tonalidades más amarillentas y rojizas.[41] Si sales al espacio y diriges tu vista desnuda hacia el Sol (algo que tampoco tiene por qué ser necesariamente una buena idea), lo único que verás será un brillo blanco cegador.

Pero, como atestiguan nuestras quemaduras veraniegas, el Sol no sólo emite luz visible: su superficie también produce un montón de radiación en el espectro infrarrojo y, cómo no, luz ultravioleta,

más energética que la luz visible, debido a que en ella se pueden encontrar moléculas más lentas y más rápidas que las que producen la luz visible. Por suerte, nuestra atmósfera absorbe gran parte de las longitudes de onda más energéticas, dejando pasar sólo la radiación ultravioleta de menor energía.

Pero el Sol es una estrella relativamente templada si la comparamos con otras.

La temperatura superficial de una estrella puede variar mucho en función de su tamaño.[42] La superficie de las llamadas enanas rojas, estrellas que tienen una masa de entre 0,075 y 0,5 masas solares, brilla con una temperatura de entre 1.700 y 3.200 °C, por lo que emiten la mayor parte de su radiación en la región infrarroja del espectro electromagnético, además de la franja rojiza y anaranjada de la luz visible. De ahí su nombre, claro.

En el extremo opuesto de la balanza están las gigantes azules, con una masa mínima veinte veces mayor que la del Sol y temperaturas superficiales de hasta 50.000 o 60.000 °C. Estas estrellas emiten radiación mucho más energética, centrada en la zona azul del rango visible y en el ultravioleta. Pero esto no es nada comparado con las temperaturas que alcanzan los fenómenos más energéticos del universo.

Por ejemplo, el disco de material que da vueltas muy cerca de un agujero negro mientras se precipita hacia su interior gira a tal velocidad que las partículas que contiene alcanzan millones o incluso cientos de millones de grados. A estas temperaturas, las partículas emiten casi exclusivamente rayos X y rayos gamma, las formas más energéticas de radiación electromagnética.

¿Y no hay un límite superior para la temperatura? Quiero decir, si la temperatura mínima posible es de –273,15 °C, ¿no hay un límite superior a partir del cual una cosa no pueda calentarse más?

Muy buena pregunta, *voz cursiva*.

Primero hay que aclarar que, aunque –273,15 °C sea la temperatura más baja posible, ninguna partícula puede llegar a enfriarse hasta ese punto exacto debido a los efectos de la mecánica

cuántica (de la que hablaré en breve).

De momento, la temperatura más baja que se ha logrado alcanzar en un laboratorio ronda el medio nanokelvin[43] o, lo que es lo mismo, media milmillonésima de grado por encima del cero absoluto. Para conseguirlo, los científicos utilizan campos magnéticos o láseres para confinar a los átomos y mantenerlos quietos, minimizando al máximo su vibración. Por otro lado, la temperatura más alta jamás observada se produjo en el interior del Large Hadron Collider (LHC), después de que el acelerador de partículas estrellara dos haces de iones de plomo que se movían a velocidades cercanas a las de la luz en direcciones opuestas, alcanzando una temperatura de 5,5 billones de grados.[44]

Estos resultados rondan la magnitud de la llamada temperatura de Hagedorn,[45] el punto a partir del cual los protones y los neutrones se descomponen en partículas aún más fundamentales, los quarks (de los que hablaré en el siguiente capítulo), así que la propia materia deja de ser estable. De hecho, la temperatura de Hagedorn se puede ver como una especie de «punto de evaporación» de la materia ordinaria.

Pero estas cifras ni siquiera se acercan a la temperatura máxima posible.

En el momento en el que tus protones y neutrones se han separado en sus componentes fundamentales, éstos se pueden seguir calentando hasta alcanzar unos $1{,}5 \times 10^{32}$ ºC. Esta notación representa un 15 seguido de 31 ceros, un número tan tremendamente grande que es imposible apreciarlo en todo su esplendor. Para ponerlo en perspectiva, imaginad los 100 millones de grados que alcanza la materia que cae hacia un agujero negro. Ahora imaginad un objeto que está a una temperatura 100 millones de veces mayor... Y repetid este paso dos veces más con la temperatura que habéis calculado para haceros una idea de cuánto es $1{,}5 \times 10^{32}$ ºC.

Creo que es más o menos la temperatura que está alcanzando mi cabeza intentando imaginar esta cifra.

Pues tal vez te interesa saber que tu cabeza está alcanzando la llamada temperatura de Planck, que sólo se dio durante el instante inmediato después del Big Bang. Bueno, llamarlo instante es una exageración, porque estamos hablando de un intervalo de tiempo tan extremadamente corto que equivaldría aproximadamente a un cero seguido de una coma acompañada por otros cuarenta y dos ceros y un 1 al final de la cola (o 10^{-43} segundos, si estáis familiarizados con la notación científica).[46]

Vaya, en comparación con las temperaturas más extremas jamás registradas en la Tierra,[47] *de 58 °C en el desierto de Libia y –88 °C en la estación Vostok, en la Antártida, estas cifras nos dejan bastante en evidencia.*

Por suerte sí, *voz cursiva*. Y ya que estamos hablando del tema, vamos a ver cómo afecta la temperatura a la estructura de la materia... Y qué tiene que ver la presión con este asunto.

LA VIBRACIÓN DE LOS ÁTOMOS Y LOS ESTADOS DE LA MATERIA

Como hemos visto, la temperatura de un objeto es el reflejo de lo rápido que se mueven las partículas que lo componen. Pero, además de explicar por qué las cosas emiten radiación electromagnética al calentarse, el movimiento de las partículas también determina cómo se transfiere el calor entre dos objetos que están en contacto y por qué la materia se puede encontrar en diferentes estados, dependiendo de su temperatura.

Si, por ejemplo, mezclamos agua fría y agua caliente en un recipiente, las moléculas de agua caliente, que se mueven a mayor velocidad, empezarán a chocar contra las moléculas más lentas del agua fría, dándoles impulso mientras ellas mismas pierden velocidad. La transferencia de calor se va a detener cuando todas las moléculas que contiene la mezcla hayan adoptado la misma velocidad media, que será el momento en el que habrán alcanzado la temperatura de

equilibrio. O sea que, a través de la transferencia de movimiento molecular, el agua caliente hacer que aumente la temperatura del agua fría.

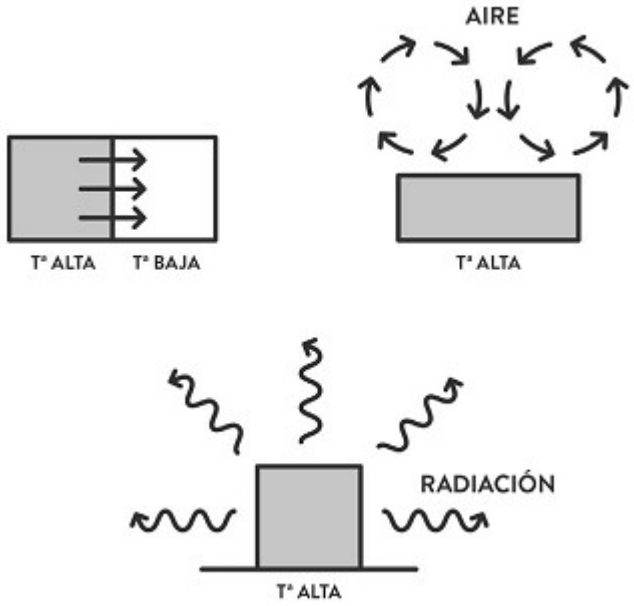
Este efecto se da en una medida muchísimo mayor en los gases y líquidos, donde los átomos tienen una gran libertad de movimiento y se pueden mezclar muy fácilmente. Cuando dos cuerpos sólidos a distinta temperatura entran en contacto, la transferencia de calor es más lenta porque las moléculas que los componen sólo pueden transferir su movimiento a las demás a través de las superficies que se están tocando y, además, sus moléculas tienen menor libertad de movimiento. Pero eso no significa que un bloque de material sólido no vaya a enfriarse si lo dejas a la intemperie: al estar en contacto con el aire, la vibración de sus átomos será transferida a la atmósfera y, además, también irradiará calor en forma de radiación electromagnética. De este modo, los sólidos también acaban alcanzando la temperatura de equilibrio con su entorno aunque los átomos que contienen no tengan mucha libertad de movimiento.

Dicho así, el concepto me parece un poco abstracto.

Enfoquémoslo de otro modo, *voz cursiva*.

Imagina que estás tostando malvaviscos frente a una fogata junto a tus amigos, una idílica noche de otoño a las orillas del Mississippi. Como eres de esas personas que no son capaces de estar delante del fuego sin manipularlo en todo momento, te da por mover ligeramente un ascua de su sitio. Acercas la mano a ella, pensando que no estará muy caliente pero, al tocarla, notas cómo las yemas de tus dedos se queman al instante. Esto ocurre porque las moléculas de la superficie del ascua se estaban moviendo a una velocidad mayor de la que pensabas y, por tanto, han acelerado las moléculas de tu propia piel al chocar contra ellas, aumentando rápidamente su temperatura. Como resultado, ahora tienes una quemadura: el calor ha degradado las proteínas de las paredes de tus células cutáneas o, directamente, ha hecho que el agua contenida en tus células hierva, se expanda y rompa la membrana que les da forma.

Pero, ojo, que también te puedes quemar aunque mantengas las manos lejos de las ascuas. Si colocas la mano *por encima* del fuego, por ejemplo, la corriente de aire caliente que asciende desde la fogata, calentado por la combustión de la madera, será capaz de provocarte el mismo efecto. Incluso aunque no estés en contacto con las ascuas ni con el aire caliente, puedes notar el calor del fuego si te acercas lo suficiente a las llamas, transmitido hacia ti en forma de radiación electromagnética visible e infrarroja. Si alguna vez habéis estado cerca de un fuego intenso y habéis notado cómo os arde la cara aunque estéis relativamente lejos, sabréis a lo que me refiero.



Por otro lado, el hecho de que una sustancia se encuentre en forma de sólido, líquido o gas también depende del movimiento de las partículas que la componen. Y voy a aprovechar que la *voz cursiva* tiene una mecha muy corta para hablar sobre el efecto de la temperatura sobre los distintos estados de la materia con un ejemplo que me parece interesante.

Eh, *voz cursiva*, ¿sabías que la mayor parte del interior del planeta se encuentra en estado sólido?

Pero ¿qué dices? ¡Todo el mundo sabe que el planeta está relleno de magma líquido como un bombón de licor de roca! ¿Qué piensas que es eso que sale por los volcanes?

Sí, lo sé, pero es que la lava sólo existe en estado líquido cuando se encuentra cerca de la superficie.

¡Patrañas!

A ver, vamos por pasos.

Las propiedades del material que compone la Tierra van cambiando con la profundidad, así que está dividida en varias capas, cada una con sus propias particularidades: la corteza y el manto terrestres están hechos de roca, mientras que el núcleo externo y el interno son en su mayoría hierro y níquel. De todas estas capas, el núcleo externo del planeta es la única que se encuentra en estado líquido.

Pues ya me dirás tú cómo se las apañan las rocas para mantenerse en estado sólido a cientos de kilómetros bajo la superficie, con el calor que debe hacer ahí abajo.

Es verdad que incluso la roca se funde cuando se calienta mucho y, de hecho, la temperatura en las profundidades de la Tierra es lo suficientemente alta como para licuar la roca... O, al menos, lo sería para licuar una roca que se encontrara sobre la superficie terrestre, sometida a la *presión* atmosférica. Pero el material que hay en el interior de nuestro planeta, aplastado bajo kilómetros rocas, está sometido a una presión mucho mayor. Y ahí está el quid de la cuestión.

Todos hemos aprendido que el agua «se congela a 0 °C y hierve a 100 °C». Pero, en realidad, en esta afirmación hay que añadir: «... al nivel del mar». En la cima del Everest, por ejemplo, donde la presión atmosférica es tres veces menor que al nivel del mar, el agua sólo necesita alcanzar los 74 °C para empezar a hervir.[48]

¿Y cómo puede ser? ¿Por qué la presión afecta a la temperatura a la que el agua se evapora?

Esta pregunta se puede responder a través del movimiento de sus moléculas.

Como habíamos visto, todas las moléculas que contiene un líquido se mueven a velocidades diferentes, más o menos alejadas de una velocidad media. Es por eso que, aunque su temperatura nos pueda parecer baja, una masa líquida siempre contiene algunas moléculas que tienen la velocidad suficiente como para salir disparadas de ella o, lo que es lo mismo, que se encuentran a la temperatura necesaria para evaporarse.

Además de ser el motivo por el que los charcos se secan sin que se encuentren a la temperatura de ebullición, este fenómeno también explica por qué el agua se evapora a una temperatura menor si está sometida a una presión más baja: como la fuerza que actúa sobre el líquido es menor, las moléculas no necesitan moverse tan rápido para escapar de él, lo que se traduce en una menor temperatura de evaporación.

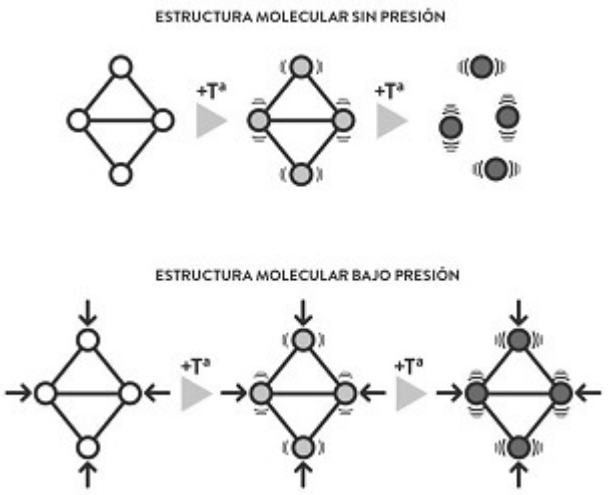
En el caso del proceso contrario, si las moléculas de agua se mueven despacio, entonces sus enlaces se podrán unir entre sí, quedando bloqueadas entre ellas y formando una estructura ordenada... Y es entonces cuando obtenemos un bloque de hielo. Si la temperatura del bloque de hielo aumenta lo suficiente, llegará el momento en el que sus moléculas vibrarán con demasiado vigor como para que la fuerza entre ellas pueda mantenerlas unidas y su estructura se empezará a desmoronar, desparramándose por el suelo (o el recipiente en el que se encuentren) y volviendo al estado líquido. La temperatura a la que estos fenómenos ocurren son el punto de congelación y el punto de fusión de una sustancia.

Pero cuando se tiene en cuenta la *presión* a la que puede estar sometida una sustancia mientras su temperatura aumenta, la cosa cambia.

Si un líquido está bajo presión, el movimiento de sus moléculas estará mucho más restringido y tendrán que moverse mucho más deprisa para evaporarse o, lo que es lo mismo, abrirse paso entre la maraña de materia y salir a la atmósfera. Por tanto, la temperatura de evaporación de un líquido aumenta cuanto mayor es la presión que actúa sobre él. Este mismo fenómeno es la causa del fenómeno

opuesto, como en el agua que hierve a una temperatura menor en la cima del Everest: una presión menor permite que las moléculas puedan escapar a la atmósfera con una velocidad más baja y, por tanto, a una temperatura menor.

De la misma manera, la presión también puede evitar que un sólido se funda cuando alcanza una temperatura muy alta al mantener bien apretados los enlaces de su estructura, permitiéndoles soportar vibraciones más intensas (y, por tanto, mayores temperaturas) antes de que se desmoronen y se conviertan en un líquido. O sea, que una presión mayor se traduce en un aumento del punto de fusión de un sólido.



Y por eso la mayor parte del volumen de la Tierra se encuentra en estado sólido: es verdad que la temperatura en el interior del planeta aumenta con la profundidad pero, a su vez, la presión a la que están sometidas las rocas también crece porque soportan el peso de una cantidad cada vez mayor de material.

Y entonces, ¿por qué existe una capa de material líquido alrededor del núcleo terrestre?

Buena pregunta, *voz cursiva*.

Tanto el material de la capa más superficial de nuestro planeta, la corteza (entre 5 y 100 kilómetros de espesor), como el del manto (otros 2.885 km), se mantiene en estado sólido porque la

combinación de presión y temperatura que actúa sobre él impide que se funda la roca que lo compone. Pero, una vez atravesado el manto, nos encontramos con un cambio muy brusco: la frontera con el núcleo externo del planeta, que no está compuesto por roca, sino por una mezcla de hierro y níquel.

Y este dato es importante, porque la fuerza de los enlaces que unen los átomos o las moléculas puede ser mayor o menor según las propiedades electrónicas de los elementos involucrados, motivo por el cual cada sustancia se funde a una temperatura diferente. Y eso es precisamente lo que ocurre en el núcleo externo del planeta: aunque la presión en esta región es más alta que en el manto, no puede evitar que la sólida mezcla de hierro y níquel se funda ante los 4.000 °C que reinan en el ambiente y, por tanto, esta capa permanece en estado líquido a lo largo de sus 2.270 kilómetros de espesor. Como dato extra, se estima que la viscosidad del núcleo externo de la Tierra está a caballo entre el agua y el aceite, siendo 10 veces más viscoso que la primera, pero 10 veces menos que el segundo[49]

Si nos adentramos lo suficiente en el núcleo externo de la Tierra, vuelve a existir una profundidad a partir de la cual la presión ejercida por el peso del planeta permite que esta mezcla de hierro y níquel recupere su estado sólido. Esta última capa sólida, que cubre los 1.216 kilómetros que faltan hasta el centro del planeta, es el *núcleo interno* de la Tierra.

La influencia de la presión en los diferentes estados de la materia es el motivo por el que los planetas más grandes, los llamados gigantes gaseosos, no son en realidad tan gaseosos: aunque están compuestos principalmente por hidrógeno y helio, dos elementos que se encuentran en estado gaseoso en condiciones normales, la mayor parte del volumen interior de estos planetas está sometido a condiciones de presión y temperatura tan extremas que casi toda su masa se encuentra en estado líquido.[50]

Total, que en este apartado hemos visto que las fuerzas electromagnéticas producidas por los electrones determinan la magnitud de las fuerzas que unen los átomos de diferentes sustancias, lo que, a su vez, condiciona el estado que adoptarán al ser sometidas a una temperatura y presión concretas. Pero, ya que estamos hablando sobre el electromagnetismo, esa capa de metal líquido que rodea el núcleo de nuestro planeta es muy importante para la vida, que, sin ella, podría tener un aspecto muy diferente a lo que estamos acostumbrados... O incluso podría no existir en absoluto.

EL CAMPO MAGNÉTICO DE LA TIERRA

Las primeras brújulas rudimentarias aparecieron en China durante el reinado de la dinastía Han (221 a.C.-206 a.C.) y se importaron a Europa allá por el siglo XI. Como es normal, una aguja que se movía sin causa aparente y apuntaba siempre hacia el norte despertaba la curiosidad de los que la usaban: había quien creía que las brújulas notaban el efecto de una isla magnética situada en el polo norte y otros decían que se veía atraída directamente por la estrella polar. Pero el primero en proponer que nuestro planeta actúa como un gigantesco imán fue nuestro querido William Gilbert.

Mientras colocaba agujas de hierro sobre una esfera hecha con piedra magnética, Gilbert se dio cuenta de que, además de apuntar siempre en la dirección de los polos de la esfera, independientemente del punto de su superficie donde las colocara, las agujas se iban inclinando respecto a la superficie a medida que las acercaba a los polos, hasta que quedaban totalmente verticales cuando las colocaba sobre ellos.

Este fenómeno encajaba con los resultados que había observado un marinero retirado llamado Robert Norman que se dedicaba a fabricar instrumentos de navegación. Mientras construía

brújulas, se dio cuenta de que sus agujas siempre se inclinaban ligeramente respecto a la horizontal, por muy bien equilibrada que estuviera su masa alrededor del eje en el que estaban apoyadas.

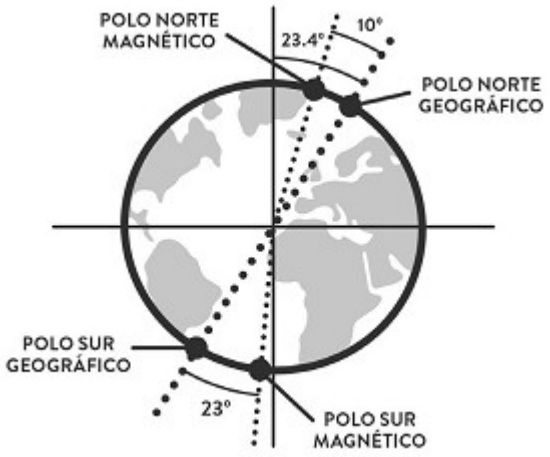
Sospechando que estaba pasando algo raro, Norman rodeó el extremo de una aguja con la cantidad suficiente de corcho como para que quedara flotando justo por debajo de la superficie de un vaso lleno de agua. En teoría, la aguja debería flotar en una posición completamente vertical pero, durante los experimentos, la aguja quedaba ligeramente inclinada, lo que significaba que había alguna fuerza actuando sobre ella.[51] Norman publicó sus resultados sobre el magnetismo en un libro titulado *The Newe Attractive*, que en 1581 Gilbert utilizó como guía.

Basándose en las observaciones de Norman y en su experiencia con la bola magnética, William Gilbert dedujo que la Tierra entera podría estar actuando como un imán gigante[52] y que, de hecho, se podría utilizar el ángulo que forma una aguja con el suelo para determinar la latitud a la que te encuentras, una técnica que no termina de ser del todo útil porque el campo magnético terrestre es bastante irregular.

¿Cómo que es irregular?

Pues sí, *voz cursiva*, el campo magnético de la Tierra no es tan perfecto como puede parecer en los esquemas de los libros de texto.

En primer lugar, el campo magnético de la Tierra no está alineado con su eje de rotación. Como resultado, los polos magnéticos, los puntos donde una aguja de hierro se quedaría completamente vertical respecto al suelo, no están alineados con los polos geográficos, que son los lugares en los que el eje de rotación de la Tierra intersecta con su superficie o, en el caso del Polo Norte, ahí donde tienes la estrella polar justo encima de tu cabeza. O sea que, en realidad, el Polo Norte y el Polo Sur magnéticos están inclinados 10° y 23° respecto al eje de rotación de la Tierra. Como resultado, las brújulas sólo apuntan exactamente hacia el norte sobre la fina banda de la superficie del planeta en la que los polos geográficos y los magnéticos están alineados.



Además, aunque la intensidad del campo magnético es el doble en los polos que en el ecuador,[53] la transición entre un lugar y otro no se produce de manera uniforme por toda la superficie de la Tierra. Para rematar el asunto, existen un par de regiones donde el campo magnético hace cosas especialmente raras.

Una de ellas es la anomalía magnética de Bangui,[54] un área de unos 700 por 1.000 kilómetros en la República Central Africana. No se sabe exactamente la causa de esta anomalía, aunque se cree que el fenómeno tiene un origen subterráneo: podría tratarse tanto de la ascensión de material magnético a través del manto terrestre como del antiguo impacto de un asteroide metálico que, hace unos 540 millones de años, dejó una gran cantidad de hierro (ahora enterrado) desperdigada por la zona. La otra anomalía está en Kursk,[55] Rusia, y es un área de 120.000 km^2 repleta de minerales magnéticos (cuarcitas con magnetita, para ser más concretos).

El propio campo magnético terrestre no es el causante de estas anomalías, pero me parecía interesante mencionarlas.

Por otro lado, el campo magnético de la Tierra está cambiando constantemente. En la actualidad, el Polo Norte magnético se encuentra a unos 420 kilómetros del Polo Norte geográfico y se está moviendo hacia la costa rusa a un ritmo de entre 50 y 65 kilómetros anuales. El Polo Sur magnético está aún más lejos del Polo Sur geográfico, a 2.800 kilómetros, pero «sólo» se aleja de él a entre 10 y 15 kilómetros anuales en dirección noroeste.

Pero ¿cómo puede ser tan caótico? ¡Pensaba que la Tierra era tan predecible como un plácido imán de nevera!

Pues no, resulta que el núcleo de la Tierra no puede producir un campo magnético como si fuera un imán permanente porque se encuentra a unos 5.400 °C, superando con creces la temperatura de Curie del hierro (1.043 °C) o el níquel (627 °C)... Y, por encima de esta temperatura, un imán pierde todas sus propiedades magnéticas.[56]

En realidad, el causante del campo magnético del planeta es el movimiento de la capa de hierro y níquel líquidos que dan vueltas alrededor del núcleo interior sólido.

Como hemos visto, el campo eléctrico de una carga en movimiento genera un campo magnético a su alrededor que, a su vez, da lugar a un campo eléctrico, que crea otro campo magnético... Y, así, los dos fenómenos entran en bucle. En el núcleo externo del planeta se puede encontrar precisamente eso: átomos de hierro y níquel que han perdido electrones a causa del intenso calor y, por tanto, tienen carga eléctrica. El movimiento de estos átomos cargados mientras el planeta rota sobre su eje, con toda la cascada de campos magnéticos y corrientes eléctricas que generan, es lo que crea el campo magnético terrestre.

Pero existen algunos problemillas que complican un poco las cosas.

Por un lado, sólo la capa de líquido que está en contacto con el núcleo interno sólido es capaz de seguir la rotación de éste mientras el planeta da vueltas. El resto del líquido que contiene el núcleo externo se va quedando «rezagado» a medida que la Tierra rota. Además, la superficie del ecuador del núcleo se mueve a una velocidad mayor que los polos y, como resultado, el líquido cercano al plano ecuatorial se mueve más deprisa que el polar, por lo que el magnetismo que genera es más intenso. Para empeorar aún más las cosas, el líquido que está en contacto con el núcleo interno está más

caliente, así que en el núcleo externo aparecen corrientes de convección que hacen que el material más caliente ascienda hacia el manto mientras el más frío baja hasta ocupar su lugar.

Al final, todas estas partículas que se mueven con trayectorias y velocidades distintas dan lugar a campos magnéticos que se contorsionan e interaccionan mientras el líquido del núcleo externo se redistribuye. Y por eso el campo magnético terrestre no es tan regular como el de un imán permanente.

De hecho, una versión más extrema de este fenómeno ocurre en el Sol.

Nuestra estrella es una gigantesca bola de plasma o, lo que es lo mismo, gas ionizado, lo que significa que a los átomos del gas que la componen les faltan electrones y, por tanto, tienen carga eléctrica. Como resultado, el plasma solar genera campos magnéticos a medida que la estrella rota sobre su eje. Pero al tener un diámetro de casi 1,5 millones de kilómetros, las irregularidades magnéticas que se producen alrededor del Sol son mucho mayores.

Los efectos del caos magnético del Sol se pueden ver en las manchas solares, regiones de su superficie donde los campos magnéticos están tan enredados que apartan el plasma que las rodea, formando parches oscuros de material más frío. Y, a veces, cuando los campos magnéticos están tan enmarañados que no pueden aguantar más la presión magnética, toda la tensión se libera de golpe mientras los campos magnéticos vuelven a su sitio de repente, lanzando al espacio todo el gas ionizado que estaba contenido en la región como si se tratara de un gigantesco tirachinas. Estos eventos pueden dar lugar a las llamaradas solares o a una eyección de masa coronal.[57]

Las llamaradas solares son simples aumentos súbitos en el brillo en alguna zona de la superficie del Sol, ya que la mayoría de la energía se libera en forma de radiación electromagnética. En cambio, una eyección de masa coronal es una nube inmensa de gas ionizado que sale despedida de la superficie solar como un proyectil. Se trata de un fenómeno que ocurre con frecuencia e incluso alguna

de estas nubes llega hasta la Tierra de vez en cuando, sin tener ningún efecto sobre nuestra vida. Eso sí, una eyección de masa coronal especialmente intensa podría poner en peligro nuestros sistemas de comunicaciones o el tendido eléctrico.

¡¿Qué?! Pero ¿es que llegan a tocar el suelo y romper los cables?

Qué va, ni siquiera les hace falta. La radiación electromagnética emitida por una llamarada solar puede llegar a influenciar la ionosfera terrestre, la capa de la atmósfera eléctricamente conductiva que se utiliza para dirigir las ondas de radio, por lo que podría llegar a bloquear temporalmente algunos sistemas de comunicación y navegación por radio. Pero las eyecciones de masa coronal representan un peligro mayor para nuestra tecnología: como se trata de una nube de partículas con carga eléctrica, el material de estas eyecciones se ve desviado hacia los polos de la Tierra por el campo magnético terrestre.

Uf, menos mal, estamos a salvo.

Bueno, para nosotros es un alivio, pero no lo es tanto para nuestros equipos electrónicos.

Estas cargas eléctricas crean campos magnéticos propios mientras el campo magnético de la Tierra las desvía hacia los polos del planeta. Si estos campos magnéticos secundarios son lo suficientemente intensos, pueden afectar a los tendidos eléctricos en la superficie de la Tierra, creando corrientes eléctricas nuevas en su interior. Sin un sistema preparado para soportar el exceso de corriente del tendido, la red eléctrica afectada puede sobrecargarse y fallar.

¿Y, entonces, cuánto queda para el fin de la civilización tal y como la conocemos?

Pues nadie te lo podría decir, porque el campo magnético solar es demasiado complejo como para que podamos predecir con mucha antelación cuándo ocurrirán estas cosas. Pero, de todas maneras, yo que tú no perdería el sueño por el asunto, *voz cursiva*, porque las eyecciones de masa coronal que tienen el potencial de

afectar a nuestros sistemas eléctricos no sólo son muy infrecuentes sino que, además, cuando por fin ocurren, tiene que dar la casualidad de que estén apuntando en la dirección de la Tierra.

Pero, bueno, las eyecciones de masa coronal no sólo provocan destrucción.

Las auroras boreales se producen cuando las partículas cargadas emitidas por el Sol llegan hasta los polos, donde el campo magnético permite que lleguen hasta la atmósfera y empiecen a interaccionar con las moléculas que contiene, excitando los átomos de nitrógeno y oxígeno del aire, que terminan liberando su exceso de energía en forma de luz. Normalmente, la causa de las auroras es el viento solar, una corriente de partículas cargadas que el Sol emite de manera constante y de la que había hablado en el primer capítulo, pero cuando además una eyección de masa coronal interacciona con el campo magnético terrestre, las auroras que aparecen son mucho más brillantes y espectaculares.

La mayor eyección de masa coronal que ha azotado la Tierra (de la que tenemos constancia), conocida como el «Evento de Carrington», se produjo en septiembre de 1859. La historia ocurrió de la siguiente manera.

Desde el 28 de agosto hasta el 2 de septiembre de ese mismo año se observaron una gran cantidad de manchas en la superficie del Sol. El día 29 de agosto aparecían auroras australes en Queensland, Australia, un fenómeno muy poco habitual en una latitud tan alta. El día 1 de septiembre, los astrónomos Richard Carrington y Richard Hodgson observaron de manera independiente cómo se producía una llamarada solar en la superficie de nuestra estrella... Y entre los días 1 y 2 de septiembre llegaría la mayor eyección de masa coronal que se ha registrado hasta la fecha.

La nube de partículas cargadas se movía a tal velocidad que penetró el escudo magnético de la Tierra, permitiendo que las partículas cargadas alcanzaran la atmósfera en casi todas las latitudes, produciendo auroras boreales en el Caribe, África subsahariana e incluso Colombia. Los campos magnéticos generados

por las partículas del sol sobrecargaron muchas líneas telegráficas en Europa y América del Norte, dando calambrazos a sus operadores e incluso haciendo que saltaran chispas en las terminales. El evento fue tan energético que la gente en el noreste de Estados Unidos decía haber podido leer el periódico bajo la luz de la aurora.[58] El día 3 de septiembre, el *Baltimore American and Commercial Advertiser*[59] publicaba que:

> La luz parecía cubrir todo el firmamento, como una nube luminosa, a través de la cual brillaban las estrellas de mayor magnitud. La luz era mayor que la de la Luna llena, pero tenía una delicadeza y suavidad indescriptibles que parecían envolver todo aquello sobre lo que descansaba.

Un testimonio precioso pero, si un evento de una magnitud similar sacudiera la Tierra hoy en día, se estima que podría provocar serios daños en los sistemas de producción y transporte de energía, lo que tendría consecuencias especialmente graves para los núcleos urbanos densamente poblados. Si los transformadores eléctricos de una central fueran dañados por un eyección de masa coronal, la planta podría pasar hasta dos años sin funcionar, dependiendo de la disponibilidad de los recambios. De hecho, se estima que un evento de esta magnitud tendría un impacto económico de entre 0,6 y 2,6 mil millones de dólares... Sólo en Estados Unidos.[60]

Pero, como ya he dicho, se trata de un fenómeno muy improbable, así que no le des muchas vueltas, *voz cursiva*.

Volviendo al campo magnético terrestre, resulta que el movimiento del núcleo externo de la Tierra es tan enrevesado que, de vez en cuando, los polos de nuestro campo magnético se invierten. Esto no significa que la Tierra dé una voltereta, que conste, sino que simplemente el Polo Norte magnético pasa a ser el Polo Sur magnético y viceversa.

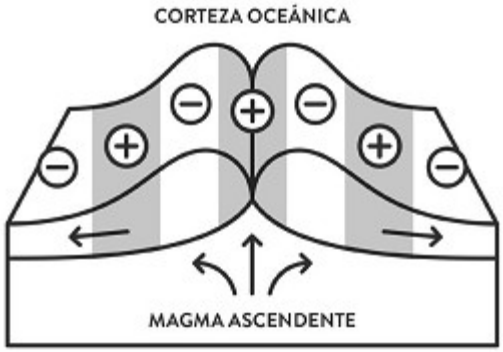
Hum... No sé yo si tomarme este dato en serio. Suena demasiado a ciencia ficción.

Pues créetelo, *voz cursiva*, porque hay evidencias que lo señalan.

Cuando el magma sale a la superficie convertido en lava, las partículas de hierro que contiene el líquido tienen la libertad suficiente para alinearse en la dirección del campo magnético. Después de que la lava se solidifique, estas partículas quedan bloqueadas su sitio, preservando para siempre la orientación de la polaridad del campo magnético que las rodeaba en el momento de la formación (o, al menos, hasta que se vuelvan a fundir).

Dicho esto, a principios del siglo XX los geólogos habían empezado a notar que algunas rocas estaban magnetizadas en el sentido opuesto al del campo magnético terrestre actual, lo que sólo podía significar que los polos magnéticos del planeta habían estado invertidos en el pasado. Pero, sin la tecnología necesaria para estudiar el tema con más detalle, la comprensión de este fenómeno quedó estancada hasta finales de los años cincuenta.[61] En esta época, los barcos de investigación empezaron a rastrear el fondo marino utilizando magnetómetros, un invento desarrollado originalmente durante la Segunda Guerra Mundial para detectar submarinos enemigos.

Y resulta que, cuando se representaron los datos tomados por los magnetómetros sobre un mapa del fondo marino, los científicos se dieron cuenta de que el suelo oceánico está dividido en bandas alternadas en las que las rocas están magnetizadas en direcciones opuestas que, además, son paralelas a los cañones subterráneos en los que la actividad tectónica crea nueva corteza terrestre mientras empuja los continentes.



Pero, además, la datación de las muestras de distintas zonas del fondo marino (con métodos que comentaré en el siguiente capítulo) reveló que las rocas que están más lejos de las fallas oceánicas son más antiguas que las que se encuentran más cerca. Esta nueva información no sólo confirmó la teoría de la tectónica de placas, sino que también reveló que la polaridad del campo magnético terrestre ha estado cambiando a lo largo de la historia del planeta. De hecho, los datos sugieren que los polos se invirtieron por última vez hace unos 780.000 años.

¿Y hay señales de que los polos se vayan a invertir en breve?

A juzgar por el registro geológico, parece que las inversiones magnéticas se producen en intervalos de entre 100.000 y un millón de años. Y puede ser que una nueva inversión ocurra «en breve».

La intensidad el campo magnético de la Tierra ha estado disminuyendo al menos desde 1850, que es la época en la que se empezaron a tomar registros. Esta tendencia podría significar que estamos viviendo el principio de una de estas inversiones y, a este ritmo, parece señalar que una reversión magnética podría ocurrir dentro de unos 1.500 o 1.600 años.[62]

¡Ah! ¡Vamos de camino al desastre! ¡Vamos a morir todos!

Calma, calma, *voz cursiva*, que la inversión de los polos magnéticos no va a ocurrir mientras vivas.

Pero ¿acaso sabes cuál es la esperanza de vida de las voces cursivas?

Bueno, vale, pero incluso aunque llegues a vivir la reversión de los polos de la Tierra, no hay indicios en el registro fósil de que estos eventos estén relacionados con ninguna extinción que haya tenido lugar en nuestro planeta, así que se puede asumir que su efecto sobre la vida es mínimo, si es que tiene alguno.

De todas maneras, incluso aunque el campo magnético desapareciera por completo durante los 1.000 o 10.000 años que tardaría en producirse la inversión de sus polos, nuestra densa atmósfera nos seguirá protegiendo de los peligros del espacio, como por ejemplo el viento solar o los rayos cósmicos.

Eso sí, tampoco nos convendría que nuestro planeta pasara períodos mucho más largos sin un campo magnético porque, de lo contrario, podría terminar como Marte.

Las rocas marcianas han revelado que el planeta tuvo un campo magnético durante los primeros 400 millones de años posteriores a su formación.[63] Pero, al tener una masa unas ocho veces menor que la de la Tierra, Marte retuvo muchísimo menos calor tras su formación y lo disipó al espacio muy deprisa. Como resultado, el interior del planeta rojo se enfrió por completo mientras irradiaba calor al espacio y la capa de metal líquido que generaba su campo magnético se solidificó.

Sin un campo magnético que la proteja, la atmósfera marciana ha sido arrastrada al espacio por el viento solar durante miles de millones de años, dejando sobre el planeta sólo una fina capa de gas que el sol sigue arrancando del planeta a día de hoy. De hecho, la misión MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution Spacecraft) reveló que la atmósfera marciana escapa hacia el espacio a un ritmo de unos 100 gramos por segundo, una cifra que se llega a multiplicar por veinte durante las tormentas solares.[64]

Al perder la atmósfera, Marte pasó de ser un planeta húmedo, con lagos, ríos y que, posiblemente, tenía la mayor parte de su hemisferio norte cubierta por un océano de 2.000 metros de profundidad,[65] a convertirse en el mundo seco y polvoriento que vemos a día de hoy.

¿Y tengo que preocuparme porque a la Tierra le vaya a pasar lo mismo?

No, no, en absoluto. La Tierra también se está enfriando, pero lo hace muchísimo más despacio. De hecho, el proceso es tan lento que el núcleo sólido del planeta tan sólo le gana 1 milímetro de terreno al núcleo externo líquido cada año.[66] Suponiendo que este ritmo se mantuviera constante (algo que, probablemente, no es verdad), el núcleo externo de la Tierra aún tardaría otros 2.300 millones de años en congelarse.

En la línea argumental de la pérdida de atmósferas, existe una clase hipotética de cuerpos celestes llamados planetas ctónicos. Estos cuerpos serían los núcleos rocosos de planetas gigantes gaseosos que habrían migrado hasta una órbita demasiado cercana a su estrella, donde el viento solar y el calor les habrían arrancado todo el gas de su gruesa atmósfera.

Aún no se ha confirmado si alguno de los planetas extrasolares rocosos que se han encontrado hasta la fecha es realmente un planeta ctónico, pero sí que se han observado más allá de nuestro sistema solar gigantes gaseosos que están perdiendo sus atmósferas, como por ejemplo HD 209458 b (apodado también Osiris).[67] Este planeta tiene una masa equivalente a 0,7 veces la de Júpiter, pero su volumen es 2,5 veces mayor, posiblemente porque da vueltas alrededor de su estrella a sólo 7 millones de kilómetros de distancia, lo que resulta en una temperatura superficial de unos 1.000 °C (como sabréis, los gases se expanden al calentarse). Debido a la cercanía a su estrella, se estima que Osiris podría haber perdido ya entre el 1 y el 7% de su masa a causa del intenso viento solar.[68]

Pero, bueno, ya hemos visto cómo el movimiento de los electrones produce una gran variedad de fenómenos sin los cuales no estaríamos vivos. Ahora toca repasar el último aspecto importante del electromagnetismo: la verdadera naturaleza de los electrones y la maldita mecánica cuántica.

LA MECÁNICA CUÁNTICA

Había comentado que el modelo atómico planetario que hemos estado tratando hasta ahora no es totalmente fiel a la realidad. Eso no significa que la manera en la que describe los fenómenos que explica sea incorrecta: los electrones saltan de una órbita a otra cuando absorben la luz, los iones emiten radiación electromagnética cuando vibran y las moléculas se forman cuando a los átomos les da

por intercambiar electrones. El fallo que cometía el modelo planetario era asumir que los electrones son como pequeñas bolitas que dan vueltas alrededor del núcleo en órbitas circulares... Algo que, como se vería más adelante, estaba lejos de representar la siempre molesta realidad.

Para entender mejor cómo de equivocado estaba este modelo, primero tendremos que volver a hablar de la luz.

La vista es el sentido que nos da una mayor cantidad de información sobre el entorno que nos rodea. Y, posiblemente por eso, a lo largo de la historia mucha gente se ha preguntado cómo nuestros ojos son capaces de «ver».

Basándose en la teoría de los cuatro elementos, el filósofo griego Empédocles sugirió que los ojos contienen un fuego interno cuya luz sale a través de nuestras pupilas e ilumina nuestro entorno. Por supuesto, esto no tenía ningún sentido, porque entonces podríamos ver por la noche... Algo que, como es obvio, no ocurre. En vez de descartar la hipótesis, Platón la complicó aún más para que se ajustara a las ideas de Empédocles, sugiriendo que la luz del fuego de nuestros ojos necesitaba otra fuente de luz externa para funcionar. En palabras de Platón:[69]

> Cuando la luz del día rodea la corriente de la visión, entonces lo parecido se une con lo parecido y un cuerpo se forma por afinidad natural en la línea de visión, donde la luz que viene del interior se encuentra con un objeto externo.

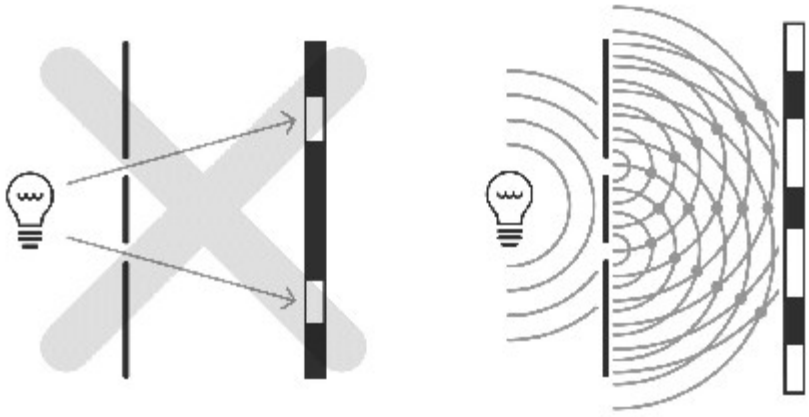
OK, Platón.

Sí, eso digo yo. En el siglo XVII, a Robert Hooke se le ocurrió sugerir que la luz estaba compuesta en realidad por ondas y Christiaan Huygens incluso elaboró un modelo matemático muy convincente que describía su comportamiento. Newton, por su parte, opinaba que los fenómenos de reflexión y refracción de la luz sólo podían ser posibles si en realidad estaba compuesta por diminutas partículas. Por fin, en 1801, un científico inglés llamado Thomas Young se propuso acabar de una vez por todas con la polémica

comprobando empíricamente si la luz es una onda o una partícula. Y para ello utilizó el (sorprendentemente simple) experimento de la doble rendija.

El experimento consistía en pasar la luz de una bombilla a través de dos rendijas paralelas y observar el patrón que se proyectaba sobre una pantalla. Young razonó que, si la luz estaba realmente compuesta por partículas, entonces cada una de ellas pasaría por una de las rendijas, así que en la pantalla deberían aparecer dos franjas luminosas verticales. Pero, en vez de eso, en el experimento de Young aparecieron un montón de líneas luminosas separadas por franjas oscuras, un fenómeno que no tenía mucho sentido si la luz estuviera realmente compuesta por partículas.

Pero este resultado se podía explicar perfectamente si la luz se comporta como una onda: las ondas de luz estaban creando nuevos frentes de onda al chocar contra los bordes de las rendijas. Estos nuevos frentes terminaban interaccionando de manera destructiva en algunos puntos y sumándose entre otros durante su camino hacia la pantalla, creando el patrón de franjas claras y oscuras que Young estaba observando.



Así que, nada, parecía que la luz era una onda.

Entonces ya estaba la polémica aclarada, ¿no?

Eso pensaba todo el mundo... Hasta que llegó Albert Einstein.

A principios del siglo xx, Einstein estaba estudiando cómo la luz es capaz de arrancar electrones de una superficie metálica cuando incide sobre ella, un fenómeno llamado efecto fotoeléctrico. Pero, curiosamente, un rayo de luz necesita tener una frecuencia (y, por tanto, una energía) mínima para provocar este efecto, sin importar su intensidad. Por ejemplo, podrías pasarte la vida apuntando un millón de láseres rojos hacia un pedazo de metal y no conseguirían mover ni un solo electrón de su sitio. Utilizando un láser azul, en cambio, los electrones empezarían a saltar como locos al instante.

Y resulta que Einstein descubrió un aspecto muy interesante de este fenómeno: un rayo de luz siempre arranca el mismo número de electrones de una superficie metálica, por muy energético que sea. En otras palabras, aumentando la frecuencia de la luz sólo conseguía que el mismo número de electrones saliera despedido de la superficie con más energía.

A partir de este fenómeno, Einstein concluyó que cualquier haz de luz está compuesto por un número finito de partículas y que cada una de ellas podía interaccionar con un solo electrón, por mucho que aumentara su energía. Esta interpretación explicaba por qué una fuente de luz más intensa (que emite más partículas), pero poco energética, no era capaz de arrancar electrones de una superficie de metal: por muchas partículas que chocaran contra él, no iban a arrancar ningún electrón si no tenían la energía suficiente.

Einstein publicó esta hipótesis (más detallada de lo que acabo de contar, por supuesto) en 1905, lo que le valió un Premio Nobel en 1921.

¿Cómo? ¿Dieciséis años después?

Bueno, claro, es que llegados a este punto no había una confirmación experimental más sólida de sus ideas. En 1914 el físico estadounidense Robert Millikan confirmó la validez de una serie de predicciones que había hecho Einstein sobre el efecto fotoeléctrico, pero los resultados no bastarían para convencer al mundo de que la luz está compuesta por partículas hasta que se respondiera a una

pregunta crucial: si la luz no tiene masa, ¿cómo podía arrancar electrones (que sí la tienen) de los átomos? ¿Qué mecanismo permitía que las partículas de la luz interaccionaran con la materia?

Resulta que la teoría de la relatividad de Albert Einstein también predecía, entre otras cosas, que las partículas de la luz deberían tener momento, que es una propiedad de los objetos que tienen masa y depende de su propia masa y su velocidad. Cuando un objeto choca con otro, le transfiere parte de su momento y lo acelera, mientras el primer cuerpo pierde momento y, por tanto, velocidad. Pero la teoría de Einstein sugería que el momento de las partículas de luz no debería depender de su masa, sino de su frecuencia, además de una constante denominada «constante de Planck» que determina los incrementos de energía mínimos que debe respetar un rayo de luz para aumentar o reducir su frecuencia.

Y, por suerte, se podía comprobar experimentalmente si la luz tiene o no momento para ver si, en efecto, se podía comportar como una partícula.

Otro físico estadounidense, Arthur Compton, se dio cuenta de que, si la luz tenía momento, entonces debería perder parte de él al interaccionar con la materia, igual que una bola de billar pierde velocidad al chocar contra otra que está quieta. Pero como la velocidad de un rayo de luz no puede cambiar, esa pérdida de momento se manifestaría en forma de un aumento de su longitud de onda.

Para comprobar si estaba en lo cierto, Compton diseñó un experimento con el que podía medir si la longitud de onda de un rayo de luz aumentaba después de interaccionar con los electrones: hizo pasar un haz de rayos X (que no son más que otra forma de luz, al fin y al cabo) a través de un cristal de calcita y colocó un detector al otro lado del cristal que le permitía medir si su longitud de onda había aumentado al pasar a través de él... Y, en efecto, eso fue lo que observó.



O sea, que la luz tenía momento, una característica propia de las partículas que tienen masa. Estas nuevas partículas luminosas se bautizaron con el nombre de fotones y Compton fue galardonado con el Premio Nobel en 1923 por su descubrimiento. Había quedado demostrado de una vez por todas que la luz también se comporta como una partícula... Pero, al mismo tiempo, todo el mundo era consciente de que seguían existiendo situaciones en las que la luz se comporta claramente como una onda.

Entonces, ¿cómo quedamos? ¿La luz es una partícula o una onda?

Ni la una ni la otra. O las dos, si prefieres verlo así. Después de analizar concienzudamente los nuevos datos sobre la luz e intentar casar las dos ideas, los científicos llegaron a la conclusión de que la luz simplemente se comporta de una u otra forma en función de la situación en la que se encuentra: cuando la luz se está propagando por el espacio se comporta como una onda (como sugiere el experimento de la doble rendija) pero, en el momento en el que interacciona con la materia, lo hace como si fuera una partícula (como ocurre durante el efecto fotoeléctrico).

Pero eso no tiene ning...

Sí, *voz cursiva*, sé que cuesta asimilarlo. La dualidad de la luz como onda y partícula nos resulta muy extraña porque no estamos acostumbrados a que las cosas que nos rodean cambien su naturaleza según les conviene, pero el método científico existe precisamente para expandir los límites de nuestra comprensión de la realidad más allá de la imagen limitada de ella que nos ofrecen nuestros sentidos. Por mucho que los científicos desearan que la

realidad no fuera tan enrevesada, no había duda de que estos fenómenos ocurren, así que no les quedaba más remedio que aceptarlo y ver adónde les llevaría este nuevo conocimiento.

Y ahí es donde entra en escena un físico llamado Louis-Victor de Broglie.

En 1924, De Broglie sugirió que los electrones podrían tener un comportamiento parecido al de la luz y que en vez de ser bolitas que dan vueltas alrededor de un átomo en órbitas circulares, existían alrededor del átomo como una especie de onda. Y, ya que estaba, incluso calculó cuál debería ser la longitud de onda de los electrones.

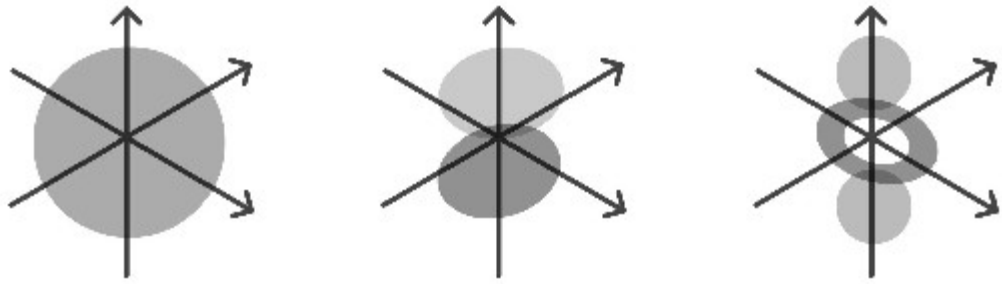
De nuevo, alguien había planteado una hipótesis y había que comprobar si se ajustaba a la realidad. Curiosamente, después de que J. J. Thomson dedujera que los electrones debían ser partículas en base a sus experimentos con los rayos catódicos, entre el equipo que pondría a prueba la hipótesis de De Broglie se encontraba su hijo, George Thomson.

En un experimento muy parecido al de la doble rendija, los investigadores dispararon un chorro de electrones contra un cristal de níquel. En este caso, las «rendijas» que afectarían a la propagación de los electrones eran los espacios que separaban los propios átomos del cristal: si los electrones eran partículas, entonces cabría esperar que empezaran a rebotar contra los átomos de níquel en direcciones aleatorias y salieran despedidos de su interior sin una dirección preferida. Alrededor del cristal habría una pantalla fluorescente que brillaría cada vez que un electrón chocara contra ella, así que, si los electrones realmente eran partículas, la superficie de la pantalla debería iluminarse de manera uniforme.

Pero, cuando pusieron en marcha su experimento, Thomson y su equipo observaron algo muy distinto: en la pantalla fluorescente estaban apareciendo franjas luminosas alternadas con franjas oscuras, el mismo patrón que adoptaba la luz durante el experimento de la doble rendija. Tomando los datos obtenidos, como el ángulo que había entre cada zona iluminada y el espacio que

existe entre los átomos del cristal de níquel, se pudo calcular la longitud de onda que parecían exhibir los electrones... Y resultó que encajaba perfectamente con la predicción hecha por De Broglie.

Este experimento demostraba que los electrones también se comportan como ondas cuando se propagaban por el espacio, un descubrimiento que cambió completamente los modelos atómicos: los electrones ya no eran bolitas que daban vueltas alrededor del núcleo en órbitas circulares, sino que existían en la forma de una onda que representa todos los posibles lugares en los que se pueden encontrar en función de la distribución de las cargas eléctricas de los átomos de cada elemento.



Como podéis ver, los átomos no se parecen en absoluto a un sistema solar en miniatura, como sugería el modelo planetario. Y resulta que esta nueva representación del átomo, el llamado el modelo cuántico, tenía un poder predictivo mucho mayor que el de cualquier otro ideado hasta la fecha.

¿Y qué es lo que hace que los electrones se comporten como una onda? ¿Por qué nosotros no nos podemos comportar también como ondas?

Pues tal vez te sorprenda saber que nosotros también tenemos una longitud de onda asignada. De hecho, el comportamiento de cualquier cosa que tenga masa está definido por una onda cuya longitud equivale a la constante de Planck (que he citado antes) dividida por el momento del objeto (que depende de su masa y de su velocidad). No obstante, esta constante es una cifra increíblemente baja ($6{,}626 \times 10^{-34}$ m^2 kg/s), así que la longitud de

onda de cualquier objeto que se encuentre en el rango de nuestros límites de percepción, desde las bacterias hasta las estrellas, es demasiado corta en relación con el tamaño del objeto como para tener algún efecto sobre él.

En cambio, la longitud de onda que les corresponde a los electrones en función de su masa es comparable al tamaño del espacio en el que se mueven alrededor del núcleo atómico y, por tanto, su comportamiento está determinado por esa onda, en vez de por su masa. De hecho, éste es el descubrimiento que hizo De Broglie: cualquier objeto cuya longitud de onda sea mayor que él mismo dejará de comportarse como una partícula y lo hará como una onda. Por tanto, sólo las partículas subatómicas presentan este comportamiento que nos resulta tan extraño.

O sea, que la próxima vez que alguien os diga que, según la mecánica cuántica, la Luna no existe cuando no la estás mirando o cualquier otra afirmación del estilo, podéis decirle sin ningún remordimiento que no tiene ni idea de lo que está hablando.

La mecánica cuántica es otro ejemplo de que, a nivel fundamental, la realidad se puede llegar a comportar de un modo tan diferente a lo que nos tiene acostumbrados que resulta muy difícil aceptar lo que sugieren los experimentos. Pero, aunque la primera reacción de nuestros cerebros sea rechazar el modelo cuántico del átomo, este modelo nos permite predecir el comportamiento de la materia con una precisión extrema. Y eso significa que esta interpretación de la estructura de los átomos debe ser correcta o, al menos, más válida que otros modelos más intuitivos... Por extraña que nos pueda parecer.

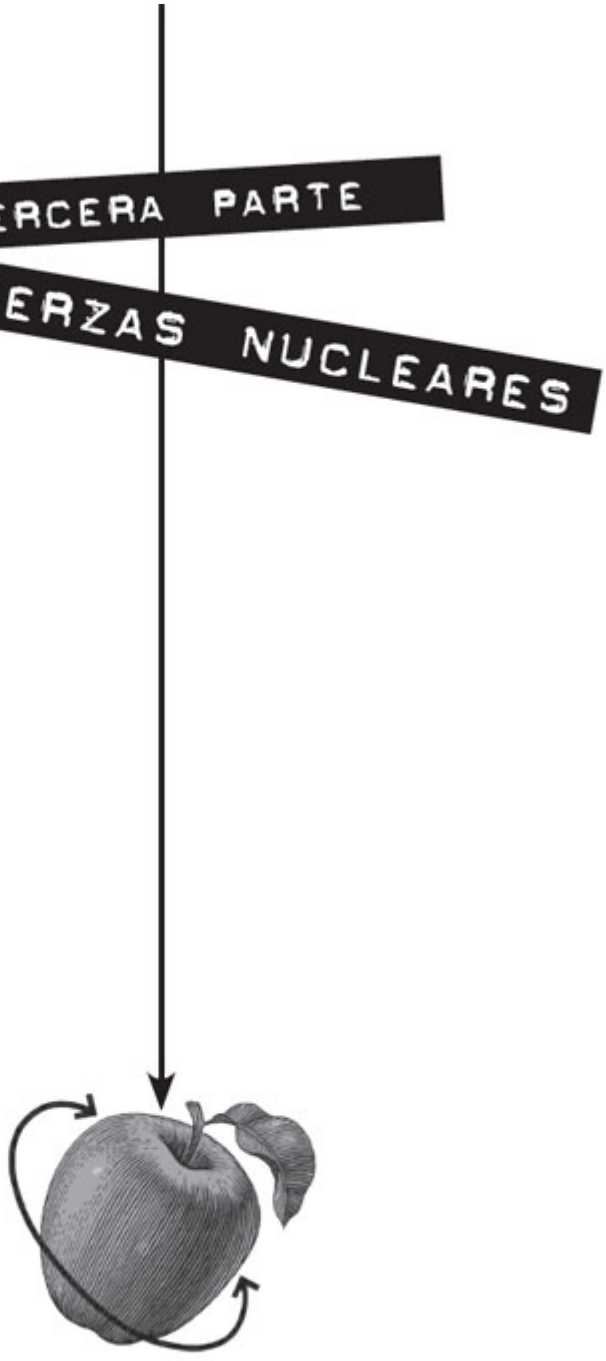
Como hemos visto, las fuerzas electromagnéticas provocadas por el movimiento de los electrones explica la mayor parte de los fenómenos que experimentamos durante nuestra vida, desde la naturaleza de la luz hasta la atracción que siente el hierro por los imanes. De hecho, cada uno de nuestros sentidos ha evolucionado para detectar aspectos diferentes de estas fuerzas: la vista nos sirve para detectar la radiación electromagnética visible, el gusto y el olor

nos permiten detectar algunas propiedades químicas de una sustancia, el oído nos proporciona información sobre el movimiento de las moléculas del aire y el tacto responde ante la resistencia electromagnética que ofrece la superficie de la sustancia que estemos tocando.

Pero, hablando de cosas que nuestra mente no es capaz de procesar, toca cambiar de capítulo.

TERCERA PARTE

LAS FUERZAS NUCLEARES



EL DESCUBRIMIENTO DE LA RADIACTIVIDAD

Me encantaría poder contar una historia sobre cómo en la Antigüedad se descubrieron rocas radiactivas y se les atribuyeron poderes mágicos que dieron lugar a situaciones absurdas, pero la verdad es que el descubrimiento de la radiación es muy reciente... Así que toca saltar directamente al siglo XIX.

Es posible que os suene el concepto de la tabla periódica. Ya sabéis, ese mural repleto de celdas en las que algunas iniciales y números cumplían cadena perpetua colgando de la pared de vuestra clase. Esta tabla es una recopilación de todos los elementos químicos conocidos que, como hemos visto, se combinan para dar lugar a toda la materia que nos rodea.

Esta tabla nació de la necesidad de organizar de alguna manera la gran cantidad de elementos nuevos que se estaban aislando por primera vez entre los siglos XVIII y XIX. Siendo más específicos, fue un científico llamado Dmitri Mendeléiev quien, en 1869, decidió repartir en ocho columnas distintas los elementos que tenían propiedades químicas parecidas, además de ordenarlos en orden creciente según la masa de sus átomos.

Un momento, ¿cómo se supone que se podía medir la masa de los átomos en aquella época? ¿No necesitas separarlos individualmente con alguna tecnología muy sofisticada o algo por el estilo?

Qué va, en esa época contaban con un método muy sencillo para medir las diferencias entre las masas de varios elementos.

En 1811, el científico italiano Amedeo Avogadro dedujo que dos volúmenes iguales de gas que se encuentran a la misma presión y temperatura deben contener el mismo número de átomos, incluso si se trata de gases de distintos elementos. Ese número no se

descubriría hasta principios del siglo xx, pero conociendo este dato se podía comparar directamente la masa de los átomos de diferentes gases pesando recipientes idénticos en los que estuvieran contenidos en las mismas condiciones. De esta manera se descubrió que los átomos de hidrógeno son los más ligeros de todos, así que se empezó a medir la masa del resto de los elementos en función de éstos.

Por otro lado, se podía deducir la masa de los elementos que se encuentran en estado sólido en condiciones normales haciendo que reaccionaran químicamente con algún gas y formaran un compuesto nuevo. Comparando cuánto había cambiado la masa del compuesto resultante respecto a la del gas en estado puro, calcular la masa de los átomos del elemento sólido era una tarea fácil. Gracias a estos métodos rudimentarios que permitían comparar la masa de los átomos del hidrógeno con los de cualquier otro elemento, Mendeléiev pudo organizar los elementos según su masa.

OK, prosiga.

El descubrimiento de que el hidrógeno es el elemento más ligero animó a un químico inglés llamado William Prout a sugerir en 1815 que el hidrógeno es la partícula fundamental que compone la materia y que el resto de los elementos están compuestos por un número mayor o menor de átomos de hidrógeno. A esta partícula la bautizó con el (poco pegadizo) nombre de «protilo».

Y no tenía razón, claro.

Bueno... No tenía razón del todo, pero iba muy bien encaminado.

Resulta que esta teoría tenía un fallo: la masa de los átomos de algunos elementos no era un múltiplo entero de la del hidrógeno. Por ejemplo, un átomo del cloro tiene una masa equivalente a la de 35,5 átomos de hidrógeno así que, si se suponía que en algún lugar en el interior de un átomo de cloro había medio átomo de hidrógeno suelto, entonces el hidrógeno no podía ser una partícula fundamental.

Resolveremos este misterio más adelante pero, mientras tanto, Dmitri Mendeléiev había observado que las masas de los átomos de los elementos químicos conocidos tendían a seguir un patrón, de manera que en su tabla periódica quedaban espacios sin rellenar que, según dedujo, debían corresponder a elementos que aún no se habían descubierto. O sea, que si en aquella época conseguías aislar una sustancia pura que tenía una masa distinta a la de cualquier otro elemento conocido y, encima, su masa encajaba con la de alguno de los huecos libres de la tabla periódica, entonces era probable que hubieras descubierto un elemento nuevo.

Pero el panorama estaba a punto de complicarse, para variar.

En 1896, Wilhelm Conrad Roentgen había descubierto los rayos X, la forma de luz invisible y muy energética que habíamos visto en el capítulo anterior. Su descubrimiento se produjo un poco por casualidad, cuando se dio cuenta de que una pantalla fluorescente que se encontraba cerca de un tubo de rayos catódicos que estaba en funcionamiento, pero cubierto con papel oscuro, se iluminaba como si algún tipo de luz invisible estuviera incidiendo sobre ella.

Por otro lado, un físico francés llamado Henri Becquerel había teorizado que algunas sales fluorescentes, como las sales de uranio, podían estar emitiendo rayos X después de ser expuestas a la luz solar. Esta conclusión estaba basada en un experimento en el que había cubierto una placa fotográfica con papel negro grueso y la había dejado al Sol después de colocar encima del montaje un montón de sales de uranio. Aunque la luz solar no llegaba a tocar la placa fotográfica, tras el revelado aparecía una mancha quemada en la zona donde estaban las sales de uranio, señal de que algún tipo de radiación estaba atravesando el papel negro. En cambio, si se colocaba una moneda o algún trozo de metal en lugar de las sales de uranio, entonces en la placa fotográfica no aparecía nada, como era de esperar.

Si esta hipótesis era correcta y el uranio estaba emitiendo rayos X, significaba que existía algún mecanismo que permitía a algunas sustancias convertir la radiación electromagnética que incide sobre

ellas en ondas aún más energéticas.

Becquerel no pudo repetir el experimento durante los siguientes días porque el cielo estaba nublado, por lo que decidió guardar las sales de uranio y la placa fotográfica en un sitio oscuro hasta que se dieran mejores condiciones. Como no parecía que el tiempo fuese a mejorar, terminó revelando la placa fotográfica de todas maneras, suponiendo que encontraría una imagen muy débil de esta fluorescencia en rayos X que había predicho porque el uranio apenas habría podido absorber luz solar. Pero, en su lugar, encontró una marca igual de intensa que cuando el Sol había incidido sobre ella.[1] Becquerel concluyó que era el propio uranio el que estaba emitiendo los rayos X, sin ayuda de nadie.

Pero aunque, efectivamente, el uranio emite radiación, no lo hace en la forma de rayos X.

Dos años después de este descubrimiento, otro físico llamado Ernst Rutherford empezó a investigar el mismo fenómeno y se dio cuenta de que la radiación que emitían las sales de uranio no se comportaba como la radiación electromagnética, así que no había manera de que el efecto que se había observado estuviera producido por los rayos X. En uno de sus experimentos, Rutherford colocó sales de uranio pulverizadas sobre una placa de metal y situó otra placa por encima de ella. Como se sabía que esta radiación era capaz de arrancar electrones de las moléculas de gas de la atmósfera, conectó las dos placas metálicas a un circuito eléctrico para medir cuánto cambiaba la corriente eléctrica que les inducía la radiación de manera indirecta a través del aire mientras hacía pruebas con las sales de uranio.

A continuación, Rutherford colocó varias láminas de aluminio de diferentes grosores sobre las sales de uranio pulverizadas y observó cómo la corriente eléctrica que estaba midiendo bajaba de golpe (pero no desaparecía) cuando la capa de aluminio superaba unas cuantas centésimas de milímetro de grosor. Esto sólo podía significar que parte de la radiación estaba siendo bloqueada por completo por la lámina de metal y que, por tanto, el uranio debía estar emitiendo

al menos dos tipos de radiación distintos, una que no era capaz de atravesar el aluminio y otra que sí, a los que llamó rayos alfa y rayos beta.[2]

Era un bueno comienzo, pero los científicos de la época se toparon con un problema: la radiación emitida por el uranio era demasiado débil como para experimentar con ella en más detalle. Para observar qué ocurría con estas radiaciones en diferentes situaciones, como por ejemplo cuando se las somete a un campo magnético, se necesitaban elementos que emitieran una radiación mucho más intensa. Y ahí es donde entra en escena Maria Salomea Sklodowska... O Marie Curie, que es el nombre que adoptó en Francia tras casarse con el también investigador Pierre Curie.

Marie Curie empezó a trabajar con el uranio como parte de su doctorado. Una cosa muy interesante que observó es que, cuando se extraía el uranio de la uraninita, el mineral en el que ocurre de manera natural, los restos que se descartaban tras su procesado seguían siendo mucho más radiactivos de lo que cabría esperar, incluso suponiendo que aún contuvieran restos de uranio. Esto le llevó a concluir que en el mineral aún quedaban otros elementos desconocidos que eran aún más radiactivos, así que decidió intentar extraerlos, aislarlos y encontrar su lugar en la tabla periódica.

La idea de descubrir elementos nuevos también atrajo a su marido, que decidió unirse al proyecto. El trabajo requería todas las manos posibles, porque estos nuevos elementos estaban presentes en cantidades minúsculas en la materia prima de la que el matrimonio pretendía extraerlos. Por supuesto, ni Marie ni Pierre conocían los efectos de la radiación sobre el cuerpo humano en aquella época y, mientras procesaban lentamente la tonelada de material radiactivo de la que disponían, solían encontrarse enfermos y exhaustos, unos síntomas que, hoy en día, sabemos que son el resultado de la lenta exposición a la radiación. Pero, por fin, después de pasar tres años procesando pequeños lotes de materia prima

radiactiva, Marie y Pierre lograron extraer un total de 100 miligramos de un nuevo elemento radiactivo al que llamaron radio,[3] del latín *radius* (*rayo*).

Hay que decir que, por el camino, también identificaron la presencia de otro elemento radiactivo que bautizaron con el nombre de polonio, en honor al país de origen de Marie Curie. Por desgracia, el matrimonio nunca logró aislar este elemento porque desaparecía más rápido de lo que podían recuperarlo.

What?

No te preocupes, *voz cursiva*, verás a lo que me refiero un poco más adelante. La cuestión es que el radio emitía una radiación lo suficientemente intensa como para que, por fin, se pudieran estudiar sus misteriosas propiedades.

La radiación beta fue la más fácil de descifrar: en noviembre de 1899, Friedrich Giesel, Stefan Meyer y Egon Ritter metieron un pedazo de radio en un recipiente que dejaba escapar la radiación a través de un agujero y sometieron el haz resultante al efecto de un campo magnético, lo que les permitió descubrir que la radiación beta se desviaba en una dirección que sugería que tenía carga eléctrica negativa. Del desvío que sufría se pudo deducir también que la relación entre su carga y su masa era la misma que la de los electrones. La conclusión era clara: la radiación beta que estaban emitiendo los elementos radiactivos eran simples electrones.

Pero aún faltaba por resolver el misterio de los rayos alfa que, en un primer momento, no parecían verse afectados por la presencia de un campo magnético.

Pero no estaba todo perdido. Pierre Curie observó que sus instrumentos dejaban de detectar la presencia de la radiación alfa cuando los alejaba a más 6,7 centímetros de la fuente de emisión, como si la radiación se desvaneciera en el aire más allá de esta distancia. Por su parte, Marie Curie estuvo estudiando la intensidad con la que el aire absorbía las partículas alfa y descubrió que no desaparecían al alcanzar los 6,7 cm como por arte de magia, sino que iban perdiendo energía durante el camino a un ritmo que

aumentaba cuanto más se alejaban de la fuente de emisión. Este comportamiento le recordó al de un proyectil, que pierde energía a un ritmo mayor a medida que penetra en un obstáculo, así que Marie dedujo que los rayos alfa deberían estar compuestos por algún tipo de partícula que salía despedida del material radiactivo. En 1903, Rutherford confirmó esta hipótesis cuando consiguió desviar rayos alfa en presencia de un campo electromagnético muy intenso, descubriendo que las partículas que los componen tienen carga positiva. Aún no se conocía la identidad exacta de estas partículas positivas que componían los rayos alfa, pero era un buen comienzo.

El trabajo de Marie y Pierre Curie fue crucial para el estudio de la radiación, pero sus esfuerzos terminaron pasándoles factura. Al menos a Marie Curie, quien falleció en 1934, a los sesenta y seis años, a causa de una anemia aplásica, un problema grave de la médula ósea que casi con total seguridad fue producida por su prolongada exposición a la radiación. La muerte de Pierre, atropellado por un coche de caballos en 1906, quizá no pueda ser atribuida a su trabajo como investigador.

El matrimonio Curie, junto con Henri Becquerel, recibieron el Premio Nobel de Física en 1903 por sus contribuciones al estudio de la radiación. Marie Curie no sólo se convirtió en la primera mujer en ganar este reconocimiento sino que, además, recibiría el Premio Nobel de Química en 1911 por su descubrimiento del radio y el polonio, por lo que también fue la primera persona en ganar dos premios Nobel.

El descubrimiento de que tanto la radiación alfa y como la radiación beta estaban compuestas por partículas iba a ser crucial para entender la estructura del núcleo de los átomos. Pero, primero, había que resolver un misterio más escurridizo.

EL NEUTRÓN, LA PIEZA QUE FALTABA EN EL NÚCLEO DEL ÁTOMO

En 1913, J. J. Thompson *s*e entretenía lanzando iones (átomos a los que les falta algún electrón y, por tanto, tienen carga eléctrica) de neón contra una placa fotográfica a través de un campo magnético. Como hemos visto, las partículas cargadas se desvían en mayor o menor medida ante la presencia de un campo magnético en función de su carga y su masa, así que no es de extrañar que a Thomson le pareciera raro que los iones de neón estuvieran dejando dos marcas distintas en la placa fotográfica, señal de que estaban siendo desviados en diferente medida.

Este fenómeno no encajaba con el modelo atómico de la época. En teoría, todos los iones de este elemento debían tener el mismo número de electrones y, por tanto las mismas propiedades eléctricas. A Thomson no le quedó más remedio que deducir que, de alguna manera, estaba utilizando dos tipos de átomos de neón que tenían masas diferentes.

Espera, pensaba que todos los átomos que tienen la misma masa se correspondían con el mismo elemento. Si tenían masa diferente, ¿no deberían ser elementos diferentes?

La respuesta a esta pregunta llegaría en 1917, *voz cursiva*. Ese año, Rutherford descubrió que, cuando se bombardean los átomos de nitrógeno con partículas alfa, de su interior empiezan a salir despedidos un montón de núcleos de hidrógeno. Ojo, que lo que salía del hidrógeno eran núcleos de hidrógeno, no átomos, porque las partículas que observó no tenían el electrón correspondiente que convierte el núcleo en un átomo. O sea, que del interior de los átomos de nitrógeno estaban saliendo partículas que tenían carga positiva y una masa igual a la de un núcleo de hidrógeno.

Este resultado era interesante porque sugería que los átomos del resto de los elementos de la tabla periódica podían estar compuestos por un número mayor o menor de núcleos de hidrógeno, de manera parecida a lo que había sugerido William Prout un siglo antes. La diferencia, claro, es que Prout sostenía que los bloques básicos que componían la materia eran átomos de hidrógeno, no núcleos... Aunque, bueno, teniendo en cuenta que en

su época aún no se sabía nada de la existencia de los electrones, la idea tenía su mérito. De hecho, Rutherford y sus alumnos rescataron la teoría de Prout del olvido y bautizaron esta nueva partícula fundamental, el núcleo de hidrógeno, con el nombre de *protón*.

Pero aún quedaba un misterio por resolver: ¿por qué la masa de algunos elementos químicos, como el cloro, sugería que en su núcleo había «medio núcleo de hidrógeno» suelto en algún lugar?

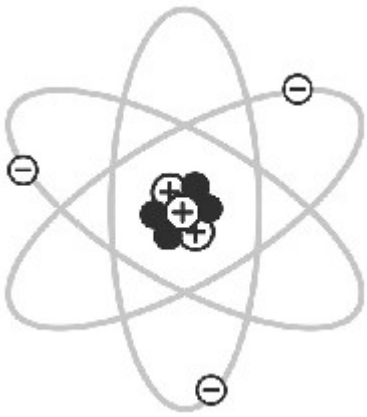
Ante la falta de respuestas, Rutherford propuso que, además de los protones, existía una partícula con carga eléctrica neutra en el núcleo de los átomos que explicaba esta falta de masa. Rutherford bautizó a estas partículas hipotéticas con el nombre de neutrones... Y resultó que tenía razón, pero aún faltaba una década para que alguien confirmara su hipótesis.

En 1928, un científico llamado Walter Bothe observó que los átomos de berilio emiten una radiación muy energética con carga eléctrica neutra cuando un haz de partículas alfa incide sobre ellos. Más tarde, la hija de Marie Curie, Irène Joliot-Curie, descubrió junto con su marido, Frédéric Joliot, que cuando esta radiación neutra emitida por el berilio incide sobre un bloque de parafina, un montón de núcleos de hidrógeno empiezan a salir despedidos de su interior.

Al principio se supuso que esa extraña radiación neutra era alguna forma de rayos gamma, la variante más energética de las ondas electromagnéticas. Pero, al analizar el experimento con más detalle, el matrimonio se dio cuenta de que esta radiación necesitaba tener una energía tremenda para provocar ese efecto sobre la parafina, mucho mayor de lo que podía surgir de la colisión entre los rayos alfa y el berilio. O sea que, por pura conservación de la energía, esa radiación neutra no podía ser una onda electromagnética.

Pero resulta que el balance energético encajaba perfectamente si se asumía que esta radiación neutra desconocida estaba compuesta por unas partículas que tienen una masa similar a los protones, pero que no tiene carga eléctrica. Y de esta manera tan aparentemente sencilla, Irène y Frédéric acababan de verificar la

existencia de los neutrones que Rutherford había predicho una década antes. El modelo atómico ya no consistía en un montón de masas positivas rodeadas por cargas negativas: ahora tenía un núcleo compuesto tanto por cargas positivas como neutras (los protones y los neutrones) alrededor del cual giraban un número mayor o menor de cargas negativas (los electrones).



Y resulta que la existencia de los neutrones permitía responder a un montón de preguntas sobre la naturaleza de los elementos que habían sido un misterio hasta la fecha.

Por ejemplo, ahora que se conocían las partículas que componen el núcleo atómico, los científicos se dieron cuenta de que, en realidad, lo que diferencia un elemento de otro es el número de protones que un átomo contiene en su núcleo. El hidrógeno tiene un solo protón en el núcleo; el helio tiene 2; el litio, 3; la plata, 47; el oro, 79; el mercurio, 80 y el uranio, 92, por poner algunos ejemplos. La tabla periódica está ordenada de izquierda a derecha y de arriba abajo en función del número de protones que contienen los átomos de cada elemento. Si os interesa conocer el número de protones que contiene algún elemento en concreto, aparece escrito en la esquina superior izquierda de cada celda de la tabla periódica.

¿Y ya está? ¿Estás seguro de que la diferencia es tan sencilla?

Bueno, vale, si nos ponemos tiquismiquis el número de protones del núcleo no es lo único que diferencia un elemento de otro porque un átomo tenderá a atraer tantos electrones a su alrededor como

protones haya en su núcleo y, además, un elemento que tenga más protones en su núcleo también necesitará un número mayor de neutrones para mantenerse estable, así que, para ser exactos, el número de protones no es la única diferencia entre un elemento y otro. Pero, si nos dejamos llevar un poco por la emoción, se puede considerar que la diferencia fundamental entre un átomo de oro (con 79 protones en su núcleo) y uno de plomo (con 82 protones) son 3 míseros protones.

Por otro lado, como los neutrones no tienen carga eléctrica, un núcleo con un número concreto de protones puede ir acompañado de distintas cantidades de neutrones. A las formas de un mismo elemento que contienen una cantidad distinta de neutrones se les llama isótopos y son más o menos abundantes, en función de cada elemento.

Por ejemplo, se pueden encontrar tres isótopos diferentes del hidrógeno (H) en la naturaleza.

El más abundante es el hidrógeno-1 (^{1}H), con un solo protón en su núcleo, que representa el 99,98% del hidrógeno que se encuentra en la naturaleza. La mayoría de los mortales nos referimos a este isótopo simplemente como hidrógeno, aunque es posible que en algún texto científico lo encontréis con el nombre de *protio*. Luego está el hidrógeno-2 (^{2}H), o deuterio, con un protón y un neutrón en su núcleo. Este isótopo representa el 0,015% del hidrógeno que se puede encontrar en la naturaleza. Como los neutrones no tienen carga eléctrica, su presencia en el núcleo en una cantidad mayor o menor no afecta a las propiedades químicas del átomo, así que el deuterio se une con el oxígeno para formar moléculas de agua que son ligeramente más masivas de lo normal, la llamada agua pesada. El hidrógeno-3 (^{3}H) o tritio tiene un núcleo formado por un protón y dos neutrones, pero es muy inestable y existe en la naturaleza en cantidades prácticamente indetectables.



Como habréis visto, el número de cada isótopo representa la cantidad total de partículas que contiene el núcleo. Por tanto, de esta nomenclatura se puede deducir que un núcleo de hidrógeno puede contener un protón solitario (^{1}H) o que ese protón puede estar acompañado por uno (^{2}H) o dos (^{3}H) neutrones. De todos los elementos conocidos, el estaño (Sn) es el que tiene un mayor número de isótopos estables porque su núcleo de 50 protones puede ir acompañado de 62, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 72 y 74 neutrones, dando lugar a los isótopos ^{112}Sn, ^{114}Sn, ^{115}Sn, ^{116}Sn, ^{117}Sn, ^{118}Sn, ^{119}Sn, ^{120}Sn, ^{122}Sn, ^{124}Sn.

O sea, que el mundo que nos rodea no sólo está compuesto por una gran variedad de elementos químicos diferentes sino que, además, estos elementos se pueden presentar en varias formas que les otorgan propiedades ligeramente distintas. Y es por eso que Thomson estaba observando diferentes marcas en su placa fotográfica: estaba disparando diferentes isótopos del neón que tenían masas diferentes y, por tanto, se desviaban en diferente medida ante su campo magnético.

Estos descubrimientos eran muy reveladores, pero la existencia de los neutrones permitió responder a otras preguntas aún más trascendentales como: ¿qué diablos hacen los núcleos atómicos para mantenerse estables?

¿Qué?

Ahora lo entenderás todo.

LA FUERZA NUCLEAR FUERTE

Como sabréis, las cargas eléctricas que tienen la misma polaridad se repelen. Es por eso que, desde el momento en el que se descubrió que el núcleo de los átomos contiene partículas con carga positiva, los científicos se empezaron a preguntar cómo era posible que un montón de cargas eléctricas positivas pudieran permanecer confinadas en el núcleo atómico de manera indefinida porque, a primera vista, la repulsión entre los protones debería hacer que el núcleo atómico saltara por los aires en una fracción de segundo.

El hecho de que la materia que nos compone lleve mucho tiempo existiendo sugería que algo más debería estar ocurriendo en el interior de los átomos.

El descubrimiento de los neutrones era un buen comienzo porque significaba que, al menos, el núcleo atómico no está compuesto sólo por cargas positivas. Pero, aun así, ¿eran los neutrones los responsables de mantener la cohesión del núcleo atómico, sin una carga eléctrica que les permitiera contrarrestar la repulsión entre los protones? ¿O había algún otro fenómeno en juego?

Las primeras pistas que permitirían resolver el misterio aparecieron en 1968, en el Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) de California que, básicamente, es un tubo de 3,2 kilómetros de longitud que sirve para acelerar electrones a velocidades cercanas a las de la luz y estrellarlos contra algún pedazo de materia.

A principios de los años sesenta, la comunidad científica tenía asumido que los protones y los neutrones eran partículas fundamentales con un tamaño aproximado de 10^{-13} metros, así que no deberían tener una estructura interna. Pero esta concepción se vio alterada cuando los físicos estadounidenses Murray Gell-Mann y George Zweig propusieron que tanto los protones como los neutrones están compuestos por seis tipos de partículas aún más pequeñas a las que llamaron quarks, y que dividieron a su vez en

seis diferentes «sabores»: arriba, cima, encanto, extraño, fondo y abajo. Lo de los sabores no me lo estoy inventando, de verdad, es su nombre técnico real.

Gell-Mann y Zweig predijeron que la carga eléctrica de los quarks es lo que hace que se unan para dar lugar a otras partículas más grandes, pero esa carga tenía un comportamiento algo distinto a la que los físicos de la época estaban acostumbrados: era fraccional, lo que significa que los quarks no tenían una carga eléctrica completa. Los quarks arriba, cima y encanto tenían dos tercios de una carga positiva (2/3), mientras que extraño, fondo y abajo tenían un tercio de una negativa (-1/3). En este modelo, los quarks sólo podían unirse entre sí para dar lugar a otras partículas que tienen una carga entera. Por ejemplo, el protón tiene carga positiva +1 porque estaría formado por dos quarks arriba (4/3) y uno abajo (-1/3). Los neutrones, en cambio, tendrían una carga eléctrica nula porque en su interior habría dos quarks abajo (-2/3) y uno arriba (2/3).

Para variar, ahora sólo faltaba ver si esta hipótesis, que encajaba muy bien en el marco teórico de la física de partículas, se podía extrapolar a la realidad. En cierto sentido y salvando las distancias, el experimento que se utilizó para verificar la existencia de los quarks era muy parecido al que utilizó Rutherford para poner a prueba el modelo del pastel de ciruelas más de medio siglo antes.[4]

La idea era utilizar el SLAC para disparar un chorro de electrones a velocidades cercanas a las de la luz contra un objetivo de hidrógeno líquido. Si, en efecto, los protones eran partículas fundamentales sin una estructura interna, entonces los electrones deberían pasar a través del hidrógeno en línea recta como si los protones que contenía fueran de mantequilla. Pero, si los electrones se desviaban al impactar contra el objetivo, entonces querría decir que estaban chocado contra algo mientras atravesaban los protones y que, por tanto, éstos no eran unas partículas tan fundamentales como se había pensado en un primer momento.

El experimento del SLAC era bastante más aparatoso que el de Rutherford porque no bastaba con una pantalla fluorescente para detectar los electrones que podían salir disparados en todas direcciones de la muestra de hidrógeno líquido. En este caso, se utilizaban detectores de varias toneladas capaces de medir con precisión la energía con la que llegaban hasta ellos los electrones. El sistema permitía tomar datos con gran detalle, pero era un poco engorroso, ya que los enormes detectores se tenían que posicionar en el ángulo deseado antes de cada prueba para ver si hasta esa posición llegaba algún electrón.

Los experimentos para verificar la existencia de los quarks se prolongaron entre 1967 y 1973. Durante este período, los investigadores también estudiaron interacción de los electrones con los neutrones, pero antes tuvieron que resolver un problema: los neutrones libres sólo permanecen estables durante unos 10 minutos, así que no hay manera de producirlos, transportarlos y aislarlos en cantidades suficientes como para realizar un experimento de esta magnitud. En su lugar, los científicos sustituyeron el hidrógeno contra el que estaban disparando los electrones por deuterio (^{2}H), el isótopo que contiene un protón y un neutrón.

¿Y cómo podían distinguir si los electrones que medían al otro lado del objetivo habían pasado a través de un protón o de un neutrón?

Porque estos experimentos se realizaron después de conocer con detalle el comportamiento de los protones bajo el chorro de electrones del SLAC, así que se podía descartar el efecto de los protones en los datos obtenidos con el deuterio para descubrir cómo los neutrones influenciaban a la trayectoria de los electrones.

En cualquier caso, el experimento reveló que los electrones se estaban desviando cuando pasaban a través de los protones y los neutrones y, además, lo hacían en la medida que cabía esperar si los quarks eran un fenómeno real. Posteriores experimentos de partículas han arrojado suficientes evidencias a favor de la hipótesis quarks como para que su existencia esté universalmente (o, al

menos, mundialmente) aceptada. O sea que, a partir de los años setenta, el núcleo atómico ya no era una simple bola de por protones y neutrones rodeada de electrones: ahora los protones y los neutrones estaban compuestos por otras tres partículas más pequeñas que pertenecían a un grupo de seis partículas minúsculas. Y este nuevo descubrimiento, los quarks, sí que se podían considerar partículas fundamentales.

¿Y qué pasa con los electrones? ¿De qué quarks están compuestos?

Los electrones también son partículas fundamentales, así que no están formados por quarks. Curiosamente, a día de hoy aún no sabemos qué tamaño tiene un quark porque son tan minúsculos que sobrepasan los límites de medición de cualquier instrumento del que se dispone en la actualidad. Las estimaciones que se han hecho predicen que tienen un tamaño mínimo de $0{,}43 \times 10^{-16}$ metros, por lo que tendrían un radio 2.000 veces menor que el de un protón.[5]

Ah, vale, vale. Entonces, ¿qué es lo que mantiene unidos a los protones en los núcleos atómicos? ¿Esa carga eléctrica fraccional de los quarks de la que hablabas?

No, ésa no es la causa, pero es una buena pregunta, *voz cursiva*. La carga eléctrica de los quarks determina cuáles se pueden unir para formar partículas, pero la fuerza que mantiene unidos los núcleos atómicos proviene de otra propiedad de los quarks a la que los físicos llaman «carga de color».

Además de los distintos sabores, los quarks pueden adoptar tres «colores» diferentes (rojo, verde y azul) y sus correspondientes anticolores (antirrojo, antiverde y antiazul). Por supuesto, no estamos hablando del color en su significado literal. En este caso, el «color» de un quark simplemente refleja tres tipos de cargas distintas que pueden tener valores opuestos, igual que ocurre con las cargas positivas y las negativas.

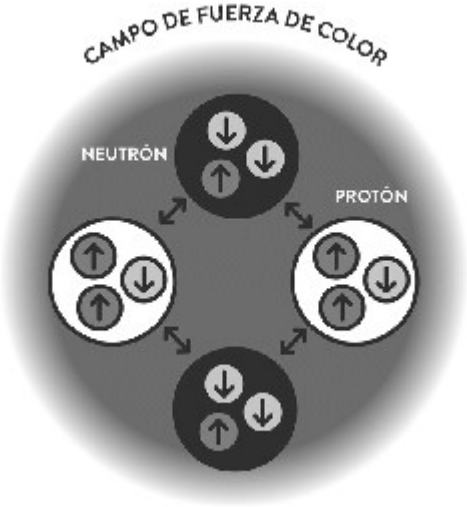
¿Y por qué les denominaron precisamente con «colores»? ¿No había nombres más fieles a la realidad?

Se adoptó el sistema porque, con el tiempo, se confirmó que existían partículas que tenían uno de sus quarks repetidos, como los dos quarks arriba y el quark abajo que componen un protón. Pero en física de partículas existe una ley llamada el principio de exclusión de Pauli que impide que dos partículas con los mismos parámetros formen parte del mismo sistema, de modo que los quarks debían tener alguna otra propiedad que les distinguía y posibilitaba la coexistencia de dos quarks del mismo tipo en el interior de una misma partícula. A este otro parámetro se le llamó *color* simplemente porque da lugar a un sistema muy intuitivo de visualizar las interacciones entre los quarks, que sólo pueden unirse y formar una partícula mayor si, al combinarse, la mezcla de los colores que los representan da como resultado el color blanco.

O sea que, para formar una partícula, no basta con que se unan los tipos de quarks necesarios: además, los quarks deberán ser de «colores» distintos. Y aquí está la clave de la estabilidad del núcleo atómico.

Resulta que los quarks se ven atraídos entre sí por sus diferentes colores. La fuerza que aparece entre ellos, la llamada «fuerza de color», es distinta a las fuerzas electrostáticas y muy intensa a cortas distancias, de manera que se sobrepone a cualquier efecto provocado por la carga eléctrica fraccional de los quarks. De hecho, si no lo hiciera, no podrían formar partículas que tienen carga eléctrica positiva, como el protón.

Pero ahí no acaba la historia: resulta que esta fuerza que mantiene a los quarks unidos se extiende más allá del protón o el neutrón del que forman parte y también atrae a los quarks que contienen las partículas que lo rodean. Es decir, que la llamada fuerza nuclear fuerte, la fuerza que impide que los protones del núcleo atómico se repelan y salgan despedidos, es en realidad la «fuerza de color» residual que mantiene unidos a los quarks.



Por eso los neutrones juegan un papel tan importante en el núcleo del átomo: al no tener carga eléctrica, su presencia en el núcleo atómico intensifica la fuerza de color sin aumentar la fuerza repulsiva, ayudando a retener a los protones en su sitio y permitiendo que los átomos más complejos que el hidrógeno puedan existir... Algo que, como imaginaréis, es bastante importante para la vida tal y como la entendemos.

¿Y cómo es que la llaman también «fuerza nuclear fuerte»? ¿Es que hay una fuerza nuclear débil? ¡Ja, ja!

Pues sí, hay una fuerza nuclear débil. De hecho, es la fuerza que permite que unas partículas se transformen en otras y, junto a la fuerza de color, explica por qué hay elementos que son radiactivos. Pero antes de hablar de ella, quiero hacer un pequeño apunte.

EL ORIGEN DE LAS PARTÍCULAS ALFA

Como hemos visto, a principios del siglo xx se había descubierto que las partículas beta emitidas por los elementos radiactivos no eran más que simples electrones. Pero el único dato que se conocía sobre la identidad de las partículas alfa era su carga positiva.

Déjame adivinar: eran protones.

Pues no, *voz cursiva*. Para variar, la respuesta no era tan sencilla.

En 1902, los físicos Ernst Rutherford y Frederick Soddy descubrieron que, con el tiempo, los elementos radiactivos que emiten partículas alfa se van convirtiendo en elementos distintos. Pero lo más curioso de este extraño fenómeno es que los elementos radiactivos no se transforman en un elemento al azar al emitir partículas alfa, sino en el que tienen dos celdas a su izquierda en la tabla periódica. Por ejemplo, el uranio se va convirtiendo en torio a medida que irradia partículas alfa. Como el número de protones del núcleo determina a qué elemento corresponde un átomo, este comportamiento indicaba que los átomos de uranio debían estar perdiendo dos protones cada vez que emitían una partícula alfa.

Por otro lado, la relación entre la masa y la carga de las partículas alfa llevó a Rutherford a concluir que estas partículas eran en realidad núcleos de helio que, precisamente, contienen dos protones (y dos neutrones, aún desconocidos en su época). Rutherford demostró esta hipótesis en 1907 junto con otro físico llamado Thomas Royds mediante un experimento muy interesante.

Los dos científicos bombardearon un tubo de ensayo que tenía un cristal muy fino con partículas alfa provenientes de una muestra del recién descubierto radio. El tubo estaba vacío así que, si realmente se trataba de núcleos de helio, las partículas alfa atravesarían el cristal y quedarían flotando en su interior. El siguiente paso era pegar una descarga eléctrica al tubo y proporcionarles a los núcleos de helio los electrones necesarios para que se convirtieran en átomos. Si todo iba bien, podrían detectar la presencia de los átomos de helio en el interior del tubo analizando su luz con ayuda de un espectroscopio... Y eso es precisamente lo que consiguieron.[6]

O sea, que había núcleos de helio saliendo disparados de algunos elementos químicos. Genial. La pregunta que les debió pasar por la cabeza a Rutherford y Royds seguramente fue la misma que se está preguntando la *voz cursiva*.

¿Por qué?

Exactamente.

Resulta que todos los isótopos de los elementos que tienen más de 84 protones en su núcleo son radiactivos (o todos los elementos del *polonio* en adelante, que es lo mismo). Esto se debe a que, a medida que aumenta el número de protones que contiene un núcleo atómico, también lo hace la magnitud de la fuerza repulsiva que aparece entre ellos.

Como habíamos visto, los neutrones evitan que el núcleo atómico se desmorone porque la fuerza de color residual que mantiene sus quarks unidos también mantiene los protones bien sujetos. Pero el radio de acción de la fuerza de color es muy limitado así que, a medida que se añaden protones a un núcleo, llega un momento en el que hay regiones del núcleo que quedan fuera del alcance de esta fuerza atractiva. Y, cuando en alguna región del núcleo la fuerza atractiva no es lo suficientemente intensa como para sobreponerse a la repulsión entre los protones, éstos pueden salir disparados del átomo, llevándose consigo algún neutrón. Y ése es precisamente el origen de las partículas alfa, compuestas por dos protones y dos neutrones, que emiten los elementos radiactivos.

Aaaah, amigo. ¿Y qué pasa con las partículas beta? ¿Por qué hay electrones que salen despedidos de algunos núcleos?

El mecanismo que regula la emisión de partículas beta es ligeramente diferente.

LAS PARTÍCULAS BETA Y LA FUERZA NUCLEAR DÉBIL

En 1913, tanto Frederick Soddy como un físico polaco llamado Kazimerz Fajans habían observado (cada uno por su cuenta) que los átomos de un elemento que emite partículas beta se convierten en

el elemento que está una posición a su derecha en la tabla periódica. Y esto significaba que, de alguna manera, esos átomos estaban ganando un protón.[7]

Además, en 1911 se descubrió que los átomos que emiten partículas beta pierden una cantidad de masa ligeramente mayor de la que se podía explicar a través de la pérdida de un electrón. Para explicar esta discrepancia, un físico italiano llamado Enrico Fermi postuló en 1933 que, al irradiar partículas beta, los átomos emiten también otra partícula muy ligera que bautizó con el nombre de *neutrino* por su carga eléctrica neutra y su pequeño tamaño. De hecho, Fermi también sugirió que los electrones que componen las partículas beta no provenían de la nube de electrones del átomo, sino que salían despedidos directamente desde el propio núcleo.

Este tal Fermi iba un poco desencaminado, ¿no? ¿Cómo iban a salir electrones del núcleo, si ahí sólo hay protones y neutrones?

Pues la verdad es que no iba nada desencaminado, *voz cursiva*.

Fermi hipotetizó que los electrones emitidos por la radiación beta provenían de la transformación de los neutrones en el núcleo de los átomos que, según él, se estarían descomponiendo espontáneamente en un protón, un electrón y un antineutrino. Cuando esto ocurre, la fuerza de color retiene al protón recién formado en el núcleo, lo que aumenta su número atómico en una unidad y, por tanto, lo convierte en un elemento nuevo, mientras que las otras dos partículas, al no tener carga de color, salen disparadas del núcleo. Y este mecanismo explicaba perfectamente la emisión de partículas beta.

El hecho de que los electrones estuvieran saliendo despedidos del núcleo de los átomos debía significar que alguna fuerza que los estaba acelerando. Esta fuerza que permite que unas partículas se conviertan en otras y que acelera los productos resultantes se bautizó con el nombre de *fuerza nuclear débil*... Y su mecanismo de acción es más difícil de visualizar que las demás.

La fuerza nuclear débil permite que los quarks cambien de sabor a través de su interacción con otro tipo de partículas, los llamados bosones W, que pueden tener una carga eléctrica entera positiva (W^+) o negativa (W^-), igual que la de un protón o un electrón. Por poner un ejemplo de esta interacción, cuando un quark arriba (carga 2/3) interacciona con un bosón W^- (carga –1), su carga pasará a ser de –1/3 y, por tanto, se convertirá en un quark abajo.

Cuando el sabor de uno de los quarks que están contenidos en un protón o en un neutrón cambia a través de este mecanismo, entonces esa partícula adoptará una composición nueva y dejará de ser precisamente un protón o un neutrón. Por ejemplo, la emisión de partículas beta se produce cuando uno de los quarks abajo que contiene un neutrón emite un bosón W^-, convirtiéndose en un quark arriba y transformando el neutrón en un protón. A su vez, el bosón W^- se descompone muy rápidamente, produciendo un electrón y un antineutrino que salen disparados del núcleo, dando lugar al fenómeno de la radiación beta.

Hum... No me acaba de convencer esta historia de los intercambios de partículas.

Lo sé, *voz cursiva*, es un enfoque diferente al que hemos estado viendo hasta ahora y necesita algo más de contexto. Pero, no te preocupes, que en el último capítulo hablaré sobre el Modelo Estándar de Partículas y todo tendrá más sentido. Lo importante es que en 1983 se detectaron los bosones W que median la interacción nuclear débil utilizando el llamado Súper Sincrotrón de Protones, en Suiza, así que su existencia quedó confirmada.

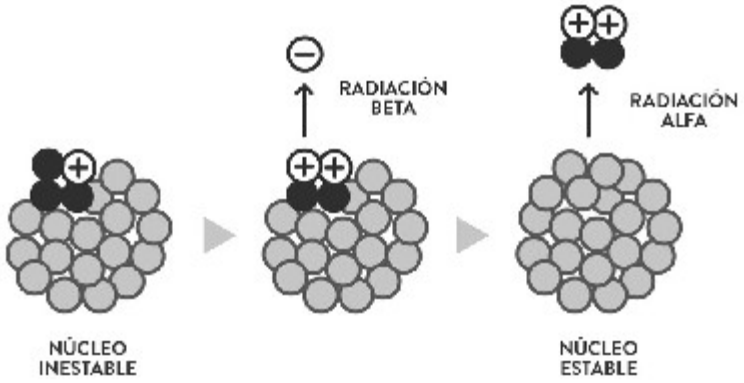
Y, de momento, esta información nos sirve para continuar con nuestra historia.

LAS CADENAS DE DESINTEGRACIÓN

En 1913, Frederick Soddy había observado que los átomos de una muestra radiactiva se transforman en otros elementos mientras emiten partículas alfa y beta, un proceso que se detiene cuando los átomos han convertido en un elemento que no es radiactivo... O, lo que es lo mismo, que tiene un núcleo estable.

O sea, ¿que no hay sustancias que sean radiactivas eternamente?

En efecto, *voz cursiva*. Esto se debe a que, como hemos visto, la razón por la que los núcleos emiten radiación es que los núcleos atómicos excesivamente grandes tienden a perder las partículas que no están bien sujetas por la *fuerza de color* o la *fuerza débil*. Como resultado, los núcleos de estos átomos van perdiendo masa hasta que alcanzan un tamaño lo suficientemente reducido como para que todos sus componentes estén confinados. Llegados a este punto, el núcleo puede permanecer estable de manera indefinida convertido en un elemento que no es radiactivo.



Por otro lado, cada isótopo radiactivo está compuesto por una proporción distinta de protones y neutrones, así que cada uno sigue su propia secuencia particular de transformaciones hasta que alcanza la estabilidad. Esta secuencia recibe el nombre de cadena de desintegración.

Por ejemplo, el torio-232 se convierte en radio-228 al emitir una partícula alfa. Como podéis ver en el número que representa el número total de partículas que contiene el isótopo, el torio-232

pierde dos protones y dos neutrones a través de esta emisión, de ahí que se convierta en radio-228. A su vez, el radio-228 pasa a ser actinio-228 a través de la emisión de una partícula beta. En este caso, el número total de partículas que hay en el núcleo no varía, porque uno de sus neutrones se ha transformado en un protón, pero sí que cambia el elemento del que estamos hablando, precisamente porque ahora tiene un protón más en su núcleo. A partir de este momento, podéis fijaros en el cambio del número de partículas en el núcleo de cada isótopo radiactivo para deducir qué tipo de radiación emiten a medida que se transforman en otros: el actinio-228 se convierte en torio-228, que pasa a ser radio-224, radón-220, polonio-216, plomo-212 y bismuto-212. El bismuto-212 puede emitir tanto una partícula alfa como una beta, convirtiéndose en talio-208 o polonio-212 pero, en cualquier caso, el proceso termina en la siguiente transformación, ya que los dos isótopos se transforman en plomo-208, que contiene una configuración de protones y neutrones estable.

Pero como Frederick Soddy no conocía la existencia de los neutrones y, por tanto, de los isótopos, la cadena de desintegración del uranio le parecía un fenómeno extrañísimo.

A lo largo de la cadena de desintegración del uranio Soddy había llegado a distinguir la masa de cuarenta elementos que no parecían coincidir con la masa de ningún otro elemento conocido, lo que significaba que podía haber descubierto hasta cuarenta elementos nuevos. Pero había un pequeño problema: en la tabla periódica sólo quedaban diez espacios vacíos entre el uranio y el plomo así que, en teoría, sólo podían existir diez elementos diferentes a lo largo de esa cadena de transformaciones. En realidad, lo que Soddy estaba observando eran diferentes «versiones» (isótopos) de los mismos diez elementos que faltaban en la tabla periódica que, al tener un número distinto de neutrones en sus núcleos, tenían diferentes masas.

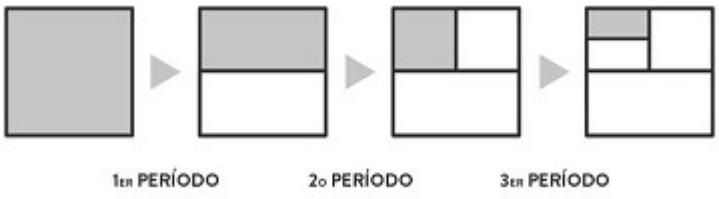
Pero en esta época se descubrió otra propiedad muy curiosa de este fenómeno.

Rutherford había notado que la masa de un elemento radiactivo en concreto siempre se transforma en otros isótopos al mismo ritmo, independientemente del tamaño de la muestra. La cifra que cuantifica el ritmo al que los átomos radiactivos se transforman en otros es el llamado período de semidesintegración. Esta cifra representa el tiempo que tarda la mitad de una muestra de un elemento radiactivo en convertirse en otro elemento, dando una idea de cuántos átomos se están transformando en un momento dado y, por tanto, de cómo de radiactivo es un elemento.

Como este fenómeno no está relacionado con la fuerza electromagnética, el ritmo al que se desintegra una muestra radiactiva es independiente de sus propiedades químicas o de la temperatura y la presión a las que esté sometida.[8] O sea, que puedes tener dos bloques del mismo elemento radiactivo y de tamaños muy dispares, a distinta temperatura o incluso formando moléculas diferentes y, al final, cuando haya transcurrido el período de semidesintegración, la mitad de los átomos de cada bloque se habrán transformado en otro elemento.

Vaya, entonces, si esperas otro período, todo el bloque se habrá transmutado en un elemento distinto.

Recuerda, *voz cursiva*, que el período de semidesintegración es independiente del tamaño de la muestra. Una vez transcurrido el primer período de desintegración aún queda la mitad de nuestro bloque de material radiactivo así que, si esperamos a que transcurra el segundo período, entonces la mitad de esa mitad restante se va a convertir en otro elemento. Y la mitad de esa otra mitad se transformará durante el tercer período... Y el bucle seguirá esta progresión (poco intuitiva, a primera vista) hasta que no quede ninguno de los átomos originales.



El período de semidesintegración de los diferentes isótopos radiactivos puede durar desde una fracción de segundo hasta miles de millones de años, dependiendo de lo inestables que sean sus núcleos.

Por ejemplo, el uranio-238 (^{238}U), el isótopo más estable del uranio y que representa el 99,27% del que se puede encontrar en la corteza terrestre, tiene un período de semidesintegración de casi 4.500 millones de años. Como esa cifra se corresponde aproximadamente con la edad de nuestro planeta, esto significa que la mitad del ^{238}U que pudo haber contenido la Tierra en el momento de su formación se ha transformado en otros elementos durante todo este tiempo.

Otros isótopos del uranio son más inestables y, por tanto, desaparecen más deprisa. Con un período de semidesintegración que ronda los 700 millones de años, cualquier cantidad de ^{235}U contenida en la Tierra ha pasado por varios períodos desde que el planeta se formó y, como resultado, su concentración actual en la corteza terrestre es muy baja (un 0,72% del uranio total). Y luego están los isótopos aún más inestables, como el ^{237}U, con un período de semidesintegración de sólo 6,75 días. Como podéis imaginar, poco queda del ^{237}U que pudo haber llegado hasta nuestro planeta hace 4.500 millones de años.

Este fenómeno se puede extrapolar a cualquier elemento radiactivo y, de hecho, explica por qué en la corteza terrestre sólo podemos encontrar 90 de los 118 elementos conocidos en la actualidad.

Hay elementos que, a efectos prácticos, han desaparecido por completo de la superficie. El tecnecio (Tc), con 43 protones en su núcleo, es el elemento más ligero del que todos sus isótopos son radiactivos. Su isótopo más estable, el ^{98}Tc, tiene una vida media de unos 4,5 millones de años, así que los átomos de este elemento han pasado por unos 1.000 períodos de semidesintegración desde que la Tierra se formó. Aun así, siempre hay algo de tecnecio en el planeta porque es uno de los productos de la fisión espontánea del uranio

(me extenderé en este tema un poco más adelante). De hecho, se estima que hay alrededor de un nanogramo de tecnecio en cada kilo de uranio[9] del planeta así que, haciendo una estimación a ojo, deberían existir alrededor de 10 kilos de tecnecio repartidos por los 10 millones de toneladas de uranio que contienen las reservas explotables de la corteza terrestre.[10]

Como observaron Marie y Pierre Curie, el radio (Ra) y el polonio (Po) también son muy escasos: incluso sus isótopos más longevos, el ^{226}Ra y el ^{209}Po, tienen períodos de semidesintegración de sólo 1.600 y 125 años, así que su presencia en la naturaleza depende de que otros elementos radiactivos se transforman en ellos en algún punto de su cadena de desintegración. En el caso del radio, normalmente hay que procesar alrededor de 7 toneladas de uraninita para obtener un solo gramo del elemento...[11] Lo que da una mejor idea del trabajo que tuvieron que realizar los Curie para aislarlo.

Pero el campeón de la escasez en la naturaleza es el astato, un elemento tan inestable que sólo existen entre 1 y 30 gramos de este elemento en todo el planeta en cualquier momento dado.[12] Los átomos de este elemento se convierten en otros a un ritmo tan elevado que se vaporizaría de manera instantánea si reuniéramos suficiente astato delante de nuestras narices como para que pudiéramos observarlo a simple vista. De hecho, su isótopo más estable tiene una vida media de sólo 56 segundos.

Como ya he comentado antes, todos los isótopos de cualquier elemento que tenga más de 84 protones en su núcleo son radiactivos. Pero, curiosamente, hay elementos más ligeros que tienen alguna versión radiactiva.

Un buen ejemplo es el potasio (K), con 19 protones en su núcleo, que se puede encontrar a nuestro alrededor en tres formas: ^{39}K, ^{40}K y ^{41}K. El ^{39}K es el isótopo más abundante (93,258% de todos los átomos de potasio), seguido por el ^{41}K (6,73%). Estas dos formas del potasio son estables, así que no necesitan deshacerse de ninguna partícula de su núcleo para ganar estabilidad y, por tanto,

no son radiactivos. Pero resulta que el 0,0117% del potasio restante se corresponde con el isótopo ^{40}K, cuyo núcleo contiene 19 protones y 21 neutrones. Con un período de semidesintegración de unos 1.200 millones de años, esta configuración es inestable y, por tanto, radiactiva, tendiendo a convertirse en calcio-40 o argón-40.

Pero ¿cómo puede ser que estos átomos que tienen los núcleos pequeños emitan radiación? ¿No debería la fuerza nuclear fuerte ser capaz de mantener su cohesión perfectamente?

Muy buena observación, *voz cursiva*. De hecho, tu suposición es correcta y es el motivo por el que estos elementos tan ligeros no suelen emitir partículas alfa. En su lugar, suelen emitir radiación beta o se deshacen de las partículas que les sobran de maneras más «exóticas».

Por ejemplo, puede ocurrir que uno de los electrones de la órbita más interior de un átomo se precipite contra el núcleo y se una con un protón, convirtiéndolo en un neutrón y emitiendo un neutrino. Así es como, por ejemplo, el carbono-11 (6 protones, 5 neutrones) se convierte en boro-11 (5 protones, 6 neutrones).

También puede ocurrir que el núcleo simplemente no contenga suficientes neutrones como para evitar la repulsión entre los protones y termine eyectando alguno de ellos, como es el caso del nitrógeno-11 (7 protones, 4 neutrones), que se deshace espontáneamente de unos de sus protones para convertirse en carbono-10 (6 protones, 4 neutrones). A veces también puede darse el caso de que un elemento tenga demasiados neutrones, como ocurre con el berilio-13, y terminen deshaciéndose de alguno de ellos para ganar estabilidad.

En definitiva, para variar, las cosas no son tan simples como parecen.

Ya veo. Pero, oye, si todos los elementos se están transformando en otros de manera constante para ganar estabilidad, ¿llegará un momento en que no quede ningún átomo radiactivo en la Tierra?

Es verdad que, con el tiempo, la cantidad de elementos radiactivos que contiene nuestro planeta irá disminuyendo a medida que los que tienen un período de desintegración más largo vayan ganando estabilidad. Pero no desaparecerán por completo de la faz de la Tierra mientras el resto del universo exista porque, aunque llegue el día en el que todo el material radiactivo de nuestro planeta haya desaparecido, existen otros procesos externos que se empeñan en desestabilizar los átomos de nuestra atmósfera.

LOS RAYOS CÓSMICOS Y LA DATACIÓN POR CARBONO-14

Resulta que la Tierra está siendo continuamente bombardeada por radiación que proviene del espacio.

¡¿Qué?! ¡¿Ha llegado el Independence Day?! ¡¿Y nosotros aquí tan tranquilos sin tomar represalias?!

Mantén la calma, *voz cursiva*, que no se trata de un ataque de una civilización extraterrestre.

Como hemos visto, la radiación nuclear no es más que un montón de núcleos atómicos acelerados a grandes velocidades al salir disparados del núcleo de los átomos, como si fueran proyectiles diminutos. Y, en realidad, la radiación cósmica no es más que eso: núcleos atómicos que han sido acelerados a grandes velocidades mientras flotaban por el espacio, normalmente por algún evento muy energético, como la onda de choque producida por una supernova.

Incluso aunque esta radiación hubiera sido dirigida hacia nosotros con mala intención, tampoco tendrías que preocuparte, *voz cursiva*, porque nuestra atmósfera absorbe la inmensa mayoría de estos núcleos e impide que lleguen hasta la superficie. Pero, curiosamente, el hecho de que la atmósfera absorba la radiación cósmica nos permite datar restos de organismos antiguos.

Pues ya me dirás qué tiene que ver una cosa con la otra.

Pues sí, te lo voy a decir.

Los núcleos atómicos que componen la radiación cósmica impactan contra nuestra atmósfera a una fracción considerable de la velocidad de la luz, así que tienen una energía cinética tremenda. Como resultado, los rayos cósmicos destrozan los átomos de gas de las capas superiores de la atmósfera al impactar contra ellos, haciendo que los protones y neutrones que contienen salgan despedidos en todas las direcciones.

Y resulta que, cuando alguno de estos neutrones sueltos choca contra alguno de los átomos de nitrógeno-14 (^{14}N) que lo rodea, puede arrancar uno de los protones de su núcleo y quedar incrustado en él en su lugar, convirtiéndolo en un átomo de carbono-14 (^{14}C). Con un período de semidesintegración de unos 5.730 años, el ^{14}C es inestable y, por tanto, radiactivo, pero recupera su estabilidad emitiendo radiación beta y convirtiéndose de nuevo en ^{14}N.

Y aquí viene lo interesante.

Resulta que el ritmo al que los rayos cósmicos bombardean nuestro planeta es constante y, por tanto, también lo es el ritmo al que producen ^{14}C en las capas altas de la atmósfera. Además, como el ^{14}C se está convirtiendo constantemente en ^{14}N, su proporción respecto al isótopo más abundante del carbono, el ^{12}C, que sí es estable, es siempre la misma.

Por otro lado, el ^{14}C tiene las mismas propiedades químicas que el ^{12}C. Esto es muy importante, porque significa que los cuerpos de los seres vivos no son capaces de distinguir entre un isótopo y otro, así que lo asimilan como si se tratara de ^{12}C normal y corriente.

Pero ¿cómo puede este carbono radiactivo terminar en nuestros cuerpos, si está en el aire?

Porque tanto el ^{12}C como el ^{14}C se encuentran en la atmósfera combinados con el oxígeno, dando lugar a las moléculas el dióxido de carbono que las plantas absorben durante el día: sus hojas separan el carbono del oxígeno a través de la fotosíntesis para producir azúcares o fijarlo a su estructura, independientemente del

isótopo que se trate así que, al final, las plantas terminan conteniendo la misma proporción de ^{12}C y ^{14}C que el aire que las rodea.

Al mismo tiempo, los animales herbívoros se comen las plantas y asimilan el carbono que contienen. Los carnívoros se comen a los herbívoros y, cuando mueren, sus cuerpos son consumidos por otros insectos y bacterias. Como resultado, todos los organismos que participan en la cadena alimentaria terminan conteniendo la misma proporción de ^{12}C y ^{14}C que la atmósfera.

Y esa es la clave del asunto: en el momento en el que un ser vivo muere, deja de tomar carbono de su entorno y el ^{14}C que contienen sus restos empezará a transformarse en ^{14}N a un ritmo que depende de su período de desintegración. Por tanto, se puede saber cuándo murió (y vivió) un organismo analizando cuál es la proporción de ^{12}C y ^{14}C que presentan sus restos en la actualidad.

El período de semidesintegración del ^{14}C es de 5.730 años. Esto significa que si, por ejemplo, encontramos unos restos biológicos que contienen la mitad del ^{14}C del que cabría esperar en función de su contenido en ^{12}C, entonces podemos concluir que el carbono del organismo ha pasado por un período de desintegración desde que murió y que, por tanto, su edad ronda los 5.730 años. Si los restos hubieran retenido sólo el 10% del ^{14}C que les correspondería, entonces se podría calcular que han pasado 18.940 años desde que ese organismo dejó de absorber carbono de su entorno.

Qué manera más rebuscada de referirte a la muerte. Por cierto, ¿cómo sabemos que los resultados obtenidos por la datación de ^{14}C son fiables?

Porque, como podrás imaginar, los científicos no utilizan sus métodos a ciegas, sino que los ponen a prueba antes de empezar a utilizarlos. Los resultados obtenidos mediante la datación por ^{14}C se han comparado con otros métodos fiables de datación que no dependen de ningún elemento radiactivo. Por ejemplo, tanto el recuento de anillos como la datación por ^{14}C proporcionan la misma cifra cuando se calcula la edad de un árbol.[13]

Eso no quiere decir que la datación por ^{14}C no tenga sus limitaciones, por supuesto.

Por un lado, el ^{14}C tiene un período de semidesintegración muy corto en comparación con otros elementos. Después de que transcurran ocho o nueve ciclos, la cantidad de ^{14}C que queda en los restos de un organismo es demasiado baja como para que se pueda detectar con precisión, de modo que la proporción entre ^{12}C y ^{14}C sólo permite datar de manera fiable los restos que tienen una antigüedad inferior a 50.000 años.

Además, los seres humanos hemos estado alterando la proporción de ^{12}C y ^{14}C de la atmósfera durante nuestra historia reciente.

Por ejemplo, a partir de la revolución industrial se empezaron a quemar grandes cantidades de combustibles fósiles que, como su nombre indica, están compuestos por los restos de organismos que habitaron la Tierra hace millones de años. Como resultado de este aislamiento subterráneo tan prolongado, todo el carbono contenido en estos combustibles se encuentra en la forma de ^{12}C porque todo el ^{14}C se ha convertido en ^{14}N. Por tanto, la quema de combustibles fósiles a gran escala ha estado inundando la atmósfera con dióxido de carbono que sólo contiene ^{12}C, diluyendo en un 2% el contenido de ^{14}C.

Pero la industrialización no ha influido tanto en la proporción de ^{12}C y ^{14}C atmosférico como las bombas atómicas: resulta que las pruebas nucleares llevadas a cabo durante los años cuarenta y cincuenta crearon tanto ^{14}C en la atmósfera de manera artificial que no es posible datar los restos de cualquier ser vivo que muriera después de 1955. El nivel de ^{14}C en la atmósfera alcanzó su pico máximo en la década de los sesenta, llegando a doblarse en 1963 pero, aunque ha estado bajando desde que se prohibieron las pruebas atómicas, aún no ha vuelto a la normalidad.

Curiosamente, aunque este fenómeno afectara (negativamente) a la datación de restos recientes, esta alteración artificial de la proporción de isótopos de carbono ha permitido hacer un mejor

seguimiento del camino que recorre este elemento a través de la biosfera,[14] permitiendo a los científicos estudiar entre qué partes se produce su intercambio y en qué lugares permanece más tiempo.

Oye, ¿y qué se hace para datar cosas más antiguas? Por ejemplo, ¿cómo se sabe que una roca tiene una edad de millones de años, si el carbono sólo nos permite remontarnos 50.000 años en el pasado?

Es que la datación por ^{14}C sólo sirve para conocer la edad de un material que ha formado parte de algún ser vivo en tiempos relativamente recientes. Para datar las rocas y otras sustancias inorgánicas, los científicos analizan las proporciones de otros elementos radiactivos.

Una herramienta especialmente útil para datar las rocas son los minerales, ya que los átomos que permanecen encerrados en el interior de sus cristales quedan aislados del resto del mundo. Algunos minerales especialmente resistentes, como el zircón, pueden soportar la erosión a lo largo de miles de millones de años sin alterarse lo más mínimo, conservando en sus cristales los mismos átomos que contenían en el momento de su formación.

Por esta razón el zircón es el mineral idóneo para estimar la edad de la Tierra.

Los cristales de zircón están compuestos por átomos de circonio, silicio y oxígeno. Pero resulta que el uranio tiene unas propiedades químicas bastante parecidas a las del circón, así que algunos de los átomos de uranio se pueden llegar a colar en la estructura del cristal durante su formación, quedando bloqueados en su interior cuando éste termina de solidificarse.

Al contrario que el circonio, el uranio es radiactivo así que, con el paso de los años, los átomos de uranio se van convirtiendo en otros elementos: se transforman en varios isótopos de torio, radio, polonio, bismuto... Y así hasta que se convierten en plomo que, como hemos visto, es estable.

Pero resulta que las propiedades químicas del plomo no tienen nada que ver con las del circonio, así que su presencia en la estructura de los cristales de este mineral sólo puede significar que, en el pasado, esos lugares estaban ocupados por átomos de uranio. Por tanto, midiendo la proporción de uranio y plomo de un trozo de zircón y conociendo el período de semidesintegración del uranio (4.468 millones de años), se puede calcular cuánto tiempo hace que se formó el cristal.

Esta técnica ha permitido encontrar los cristales más antiguos del planeta en *Jack Hills*, en Australia, que tienen una antigüedad de 4.375 millones de años.[15] Ojo, que eso no significa que la roca que los rodea sea igual de antigua: los cristales de zirconio son muy duros y soportan muy bien la erosión, así que la roca de la que formaban parte podría haber desaparecido del lugar hace mucho tiempo. Pero, al menos, esta cifra sirve para calcular la edad mínima del planeta que, además, concuerda con el resto de las evidencias que apuntan a que la formación de la Tierra tuvo lugar hace alrededor de 4.500 millones de años. De hecho, estas mismas técnicas de datación son las que se utilizan para saber cuándo se formaron los meteoritos, con los que se ha podido calcular que la edad del sistema solar ronda los 4.600 millones de años.

Pero, bueno, ya hemos visto que hay elementos radiactivos que se dedican a expulsar partículas de sus núcleos. Vamos a ver ahora qué ocurre cuando tiene lugar el proceso contrario.

LA ALQUIMIA MODERNA

Alégrate, *voz cursiva*, que para este apartado sí que tengo anécdotas históricas.

Bieen...

En la Antigüedad, los alquimistas se pasaban el día mezclando sustancias diferentes con la esperanza de que, algún día, darían con la combinación que convertiría cualquier metal sin valor en oro. Las

«recetas» con las que creyeron haber dado llegaron a ser, como mínimo, curiosas.

Una de las celebridades históricas más famosas que trasteó con la alquimia fue Isaac Newton, quien aseguraba que se podría crear una piedra filosofal, la sustancia que transmuta todo lo que toca en oro, combinando «una parte de Dragón Llameante, algunas palomas de Diana y al menos siete águilas de Mercurio».[16] Por desgracia, no he logrado conseguir una traducción muy coherente de esta receta. Según las fuentes que he consultado, parece que el dragón llameante podría referirse al vapor de mercurio, las palomas de Diana equivaldrían a la plata pura y la referencia a las siete águilas de Mercurio se correspondería con el mismo número de destilaciones de mercurio. A mi parecer, da la impresión que Newton estaba hablando de algún tipo de amalgama de plata y mercurio pero, vaya, podría estar totalmente equivocado.

Otro método con el que, en teoría, se podía convertir el cobre en oro[17] empezaba dejando nueve huevos pudriéndose en la basura durante al menos treinta días. Pasado este tiempo, en el interior de cada huevo debería aparecer un gusano. Los huevos infectados se transfieren entonces a un recipiente nuevo, donde los gusanos se comerán entre ellos hasta que sólo quede un superviviente. Coge este último gusano, quémalo y esparce cobre pulverizado sobre sus cenizas y, *voilà*, de alguna manera, el cobre debería convertirse en oro.

Evidentemente, lo único que conseguían los alquimistas al mezclar diferentes sustancias era provocar reacciones que movían a los electrones de un lado a otro, pero que no tenían ningún efecto sobre el número de protones de sus núcleos atómicos que, al fin y al cabo, es lo que determina la naturaleza de un elemento. No es de extrañar, entonces, que los alquimistas nunca llegaran a hacer realidad su sueño de transmutar unos elementos en otros.

Pero, curiosamente, el sueño de los alquimistas sí que ha visto cumplido con la tecnología actual... Aunque posiblemente no a la escala que a ellos les hubiera gustado.

Los aceleradores de partículas son máquinas que, a través del uso de potentes campos magnéticos, permiten acelerar partículas cargadas hasta velocidades cercanas a las de la luz. Hay unos 30.000 aceleradores de partículas repartidos por todo el mundo, siendo el LHC el más grande de ellos: un túnel magnético circular con una circunferencia de 27 kilómetros, enterrado a una profundidad de 175 metros a los dos lados de la frontera franco-suiza.

La cuestión es que se pueden utilizar estas máquinas para disparar núcleos atómicos en direcciones opuestas a velocidades tan altas que queden incrustados entre sí al chocar, dando como resultado un nuevo núcleo que contiene un número mayor de protones y, por tanto, es un nuevo elemento.

A primera vista, sintetizar un elemento más pesado parece una tarea fácil: basta con combinar dos núcleos que, en conjunto, sumen el número de protones del elemento que se desea obtener. Por ejemplo, si tu objetivo fuera producir oro, que tiene 79 protones en el núcleo, podrías bombardear una lámina de osmio (76 protones), con átomos de litio (3 protones) y, si tienes paciencia, es posible que al final de tu experimento encuentres que algunos núcleos de litio se habrán fusionado con un número igual de núcleos de osmio, convirtiéndose en unos cuantos átomos de oro (unos pocos miles, posiblemente).

Pero estrellar dos núcleos atómicos a altas velocidades no garantiza que vayas a obtener el elemento que deseas porque las colisiones pueden arrancar parte de los átomos, destruirlos o, simplemente, terminar convertidos en algo que no quieres. De hecho, destruir parte de los núcleos atómicos para producir un elemento de manera artificial suele ser más fácil que fusionarlos.

En 1980, el físico estadounidense Glenn Seaborg bombardeó una lámina de bismuto con átomos de carbono y neón en un acelerador de partículas. Cuando inspeccionaron los «escombros», se descubrió que los proyectiles habían arrancado 4 protones y entre 6 y 15 neutrones a unos cuantos miles de átomos de bismuto,

produciendo varios isótopos del oro. Pero, antes de que llames al CERN para intentar alquilar el LHC, *voz cursiva*, te diré que el proceso no es ni remotamente rentable: producir un solo gramo de oro utilizando este sistema te costaría alrededor de 3,5 trillones de dólares.[18] Un precio muy poco competitivo, teniendo en cuenta que el que se extrae del suelo ronda los 40 dólares/g.

Aunque el sistema de Seaborg no nos va a hacer millonarios, hay métodos que nos permiten obtener cantidades pequeñas de elementos radiactivos que no se podemos encontrar en la naturaleza, como por ejemplo el americio (Am).

Los detectores de humo contienen americio-241 (^{241}Am), un isótopo que tiene un período de semidesintegración de 432,2 años. Incluso el isótopo del americio más estable, el ^{243}Am, tiene una vida media de 7.370 años así que, como podéis imaginar, ninguno de los dos está presente en la naturaleza en cantidades que permitan su extracción de manera rentable.

Por ello el ^{241}Am se obtiene de manera artificial irradiando plutonio-239 (^{239}Pu) con neutrones para que convierta en ^{241}Pu, que se convierte a su vez en ^{241}Am a través de la emisión de una partícula beta. Pero, claro, el ^{241}Pu tiene una vida media de catorce años así que, una vez obtenido, no queda más remedio que guardarlo en un lugar seguro y esperar a que se transforme lentamente en americio, porque no hay manera de acelerar el proceso.[19] De hecho, el proceso es tan lento y costoso que el precio de venta del ^{241}Am ronda los 1.500 dólares/g pero, por suerte para nuestros hogares (y bolsillos), cada detector de humo contiene sólo 0,3 microgramos de americio.

Pero ¿cómo sabe el americio que mi casa está quemándose?

Bueno, el americio en sí no es capaz de detectar nada. Lo que pasa es que los detectores de humo contienen un sensor que detecta cuándo impactan contra él las partículas alfa emitidas por el ^{241}Am, así que, mientras haya radiación chocando contra el sensor, el detector interpretará que todo va bien. Pero, en el momento en el que el humo de un incendio se introduce en el espacio que hay entre

el americio y el sensor, las partículas alfa se ven bloqueadas. El detector interpreta la interrupción del flujo de partículas como una señal de que hay humo en el aire y es entonces cuando hace saltar las alarmas.

Pero, bueno, aunque disparar partículas y núcleos atómicos contra otros átomos es una manera útil de producir elementos que son difíciles de encontrar en la naturaleza, estos mismos métodos también se pueden utilizar para sintetizar elementos que jamás se habían observado.

¿Quieres decir que nos permiten descubrir elementos nuevos?

Eso mismo, *voz cursiva*.

LOS LÍMITES DE LA TABLA PERIÓDICA

Como hemos visto, a medida que añadimos protones al núcleo de los átomos y hacemos que suban posiciones en la tabla periódica, los elementos se vuelven cada vez más inestables. Y, de hecho, hay algunos elementos que son tan inestables que ninguno de sus isótopos existe durante más de una fracción de segundo, así que no hay ninguna posibilidad de que podamos aislarlos a partir de materiales que podemos encontrar en la naturaleza.

O sea que, para estudiar estos elementos, no nos queda más remedio que producirlos de manera artificial.

Por ejemplo, en diciembre de 2015 se confirmó la síntesis del oganesón (antes llamado ununoctio de manera provisional), el elemento que tiene 118 protones en su núcleo. Si los pocos miles de átomos de oro que logró obtener Seaborg os habían parecido una miseria, tened en cuenta que los investigadores que descubrieron este nuevo elemento se pasaron cuatro meses disparando iones de calcio (unos 40 millones de billones en total) contra un objetivo de californio, para finalmente producir cuatro átomos de oganesón.[20] Cuatro míseros átomos que, además, se desintegraron en un par de milisegundos. Pero, bueno, al menos se mantuvieron estables

durante más de 10^{-14} segundos, el límite que marca cuándo se puede considerar que se ha descubierto un elemento nuevo, porque ése es el tiempo que tarda un núcleo atómico en formar una nube de electrones a su alrededor.

Uf, 118 protones son muchos protones. Entonces, ¿podría añadir tantos protones y neutrones a un átomo como quisiera hasta crear un núcleo del tamaño de un balón de fútbol? ¿O la tabla periódica tiene un límite?

Muy buena pregunta, voz cursiva. Como ya he comentado, los átomos se vuelven más inestables cuantos más protones contienen en sus núcleos porque la fuerza nuclear fuerte no es capaz de llegar muy lejos. De hecho, los elementos más recientes que se han añadido a la tabla periódica, el moscovio, el livermorio, el tenesio y el oganesón (a mí también me gustaban más los nombres provisionales), con 115, 116, 117 y 118 protones en su núcleo, son tan extremadamente inestables que sólo existen durante una fracción de segundo. La verdadera incógnita es, entonces, si se pueden añadir partículas a un núcleo de manera indefinida y obtener de vez en cuando alguna combinación de protones y neutrones que sea estable.

Aunque sintetizar elementos nuevos es un proceso caro y que no tiene garantías de éxito, los físicos están lo suficientemente familiarizados con las propiedades de las partículas subatómicas como para ser capaces de predecir la estabilidad que tendrá un núcleo atómico en función del número de protones y neutrones que contenga. De esta manera, se pueden encontrar combinaciones teóricas de protones y neutrones que den lugar a un núcleo potencialmente estable. A estas posibles combinaciones de protones y neutrones alrededor de las cuales pueden existir átomos relativamente longevos, con período*s* de semidesintegración que podrían abarcar desde unos minutos hasta varios millones de años,[21] se les llama *islas de estabilidad*.

Actualmente se cree que habría isla de estabilidad alrededor del unbinilio, que es el nombre provisional del elemento que tendría 120 protones en su núcleo, pero se especula que podría existir otra isla de estabilidad en los núcleos atómicos que contienen alrededor de 164 protones. En realidad, nadie sabe con seguridad cuál es el número máximo de protones que puede tener un elemento en su núcleo al mismo tiempo que mantiene algo de estabilidad... O, lo que es lo mismo, cuál es el límite de la tabla periódica.

Varios científicos han propuesto en el pasado que el límite de la tabla periódica se encuentra en los elementos con 128, 137 o 155 protones en el núcleo, mientras que otras estimaciones más recientes predicen que no deberían existir elementos con más de 173.[22] Eso no quita que la IUPAC, el organismo que se encarga de catalogar estas cosas, tenga nombres provisionales que llegan hasta el elemento que tiene 999 protones en su núcleo.[23]

Las propiedades químicas de estos elementos químicos muy masivos se pueden predecir hasta cierto punto, pero es difícil contrastarlas experimentalmente precisamente porque permanecen estables durante tan poco tiempo que no es posible estudiarlas con detalle. Incluso en la forma actual de la tabla periódica, de los elementos que se encuentran más allá del hassio, con 108 protones en su núcleo, tan sólo se conocen las propiedades químicas aproximadas del copernicio (112) y el flevorio (114).

Pero, incluso aunque existan núcleos relativamente estables más allá de los límites actuales de la tabla periódica, existe otro problema que nos podría impedir sintetizarlos con la tecnología actual: las versiones estables de los núcleos de estos elementos hipotéticos necesitarían una gran cantidad de neutrones. Y resulta que los únicos elementos con suficientes neutrones como para producirlos son demasiado inestables como para que sea viable estrellarlos e intentar crear elementos nuevos.

O sea, que de momento no parece que en la frontera de la tabla periódica vayamos a encontrar ningún material digno de una historia de ciencia-ficción. Sin embargo, aunque siempre es interesante

invertir una gran cantidad de energía para fusionar núcleos atómicos y descubrir elementos nuevos, también podemos destruir esos núcleos y liberar la energía que contienen para nuestro uso personal.

LA ENERGÍA NUCLEAR

Las partículas alfa que emiten los núcleos radiactivos se mueven a unos 15.000 km/s, mientras las partículas beta casi alcanzan la velocidad de la luz. Hay algunos elementos radiactivos a los que les sobra tanta energía que incluso emiten rayos gamma. Sabiendo esto, no es de extrañar que estas formas de radiación sean capaces de transferir suficiente energía a su entorno como para tener algún efecto sobre su temperatura. De hecho, no os costará encontrar en internet fotos en las que aparecen pedazos de plutonio incandescentes, calentados hasta el rojo vivo por su propia radiación.

Había comentado hace un rato que el astato es tan inestable que cualquier muestra de este elemento lo suficientemente grande como para que se pueda apreciar a simple vista desaparecería ante vuestras narices casi de inmediato. Pues bien, resulta que reunir semejante cantidad de astato en un mismo sitio no sería muy buena idea, precisamente porque la radiación es capaz de generar calor cuando interacciona con la materia que la rodea. Bastante calor.

Con un período de semidesintegración de 56 segundos, el isótopo más longevo del astato que se puede encontrar en la naturaleza es el ^{219}As. Asumiendo que los núcleos de ^{219}As se descompusieran a través de la emisión de una partícula alfa el 100% de las veces (en realidad lo hacen el 96%, pero es para simplificar los cálculos) y conociendo la energía cinética de las partículas que emiten, se puede deducir que la descomposición de los 30 gramos de astato que existen en nuestro planeta en cualquier momento libera al entorno una energía equivalente a la producida por 10,5 toneladas de TNT durante el primer minuto.[24] O sea que, a menos

que vuestro sueño sea morir vaporizados junto con el resto de vuestra habitación, no os recomiendo que reunáis cantidades considerables de astato sobre vuestros escritorios.

Pero las cosas se tuercen incluso más cuando hablamos de elementos aún más inestables.

Por ejemplo, el livermorio-293 (^{293}Lv) tiene un período de semidesintegración de sólo 61 milisegundos y emite partículas alfa casi el doble de energéticas que el ^{219}As. Por tanto, una muestra de 30 gramos de ^{293}Lv se desintegraría por completo de manera instantánea, liberando la energía equivalente a 25 toneladas de TNT.[25] Por suerte, tan sólo se han conseguido producir unos cuantos átomos de livermorio hasta la fecha, ya que se trata de uno de estos elementos tremendamente inestables y difíciles de producir que se han descubierto durante los últimos años.

Éstos son los casos más extremos, por supuesto. En las dosis adecuadas, el calor generado por algunos elementos radiactivos puede ser de gran ayuda.

Por ejemplo, los satélites necesitan sistemas que aporten energía durante años a sus componentes electrónicos. Si el satélite pasará su vida útil cerca del Sol, como es el caso de los que dan vueltas alrededor de la Tierra, entonces unas placas solares pueden resolverte fácilmente el problema. Pero esta solución no es válida si la nave se dirige al espacio profundo, donde la luz del Sol llega muy debilitada.

Ésta es la razón por la que muchas misiones espaciales llevan encima un pequeño bloque de algún elemento inestable que emite suficiente radiación como para que su temperatura se mantenga elevada durante años. A bordo de la nave, el bloque radiactivo se halla rodeado de termopares, dispositivos que son capaces de crear un potencial eléctrico a partir de una diferencia de temperatura y proporcionar a los circuitos de la nave la electricidad que necesitan para mantenerse en funcionamiento.

A este sistema se le llama generador termoeléctrico de radioisótopos (o RTG, por sus siglas en inglés) y, curiosamente, como presenta la ventaja de que no contiene piezas móviles que puedan averiarse y, por tanto, no necesita mantenimiento, se utiliza también en tierra firme para proporcionar energía a las instalaciones que se encuentran en lugares muy remotos.

Por ejemplo, como sabréis, Rusia es enorme y gran parte de su territorio está prácticamente despoblado. No es de extrañar entonces que la Unión Soviética equipara muchos de sus faros y balizas de navegación con células radiactivas. Se estima que aún quedan unos mil faros que han terminado su vida útil en zonas remotas del país, pero que siguen cargados de estroncio radiactivo y sin mucha vigilancia, motivo por el cual varias agencias piden su retirada.[26]

El material radiactivo que se elige para un RTG depende en gran medida del tiempo que el aparato al que suministra la energía vaya a pasar activo.

Los satélites suelen contener ^{238}Pu, un isótopo del plutonio que tiene un período de semidesintegración de casi 87,7 años y apenas emite rayos gamma, el tipo de radiación más penetrante, así que prácticamente no necesita blindaje. Por otro lado, el estroncio-90 (^{90}Sr) es abundante en los desechos radiactivos de las centrales nucleares, así que se trata de una alternativa mucho más barata al ^{238}Pu, pero tiene la desventaja de que su período de semidesintegración es de «sólo» 28,8 años y que alcanza temperaturas menores que el uranio.

Otras alternativas incluyen el polonio-210 (^{210}Po), que tiene una densidad energética 260 veces mayor que el ^{238}Pu pero tiene una vida media de sólo 138 días. Luego está el americio-241 (^{241}Am), el mismo isótopo radiactivo que se encuentra en los detectores de humo, que produce menos energía que el ^{238}Pu, pero tiene una vida media de 432 años. Debido a la escasez actual de ^{238}Pu, la Agencia Espacial Europea está estudiando seriamente el uso del polonio como combustible para futuros RTG.

En cualquier caso, Rusia no es el único país que ha utilizado RTG sobre la superficie terrestre: allá donde haya un circuito eléctrico tan inaccesible que revisarlo de manera periódica no sea posible, es probable que también haya un bloque de material radiactivo proporcionándole la energía que necesita. Es por eso que, además de en el interior de satélites lejanos o de misiones espaciales que se encuentran sobre otros cuerpos celestes, se pueden encontrar RTGs[27] en boyas meteorológicas, faros, instrumentos sismográficos... Y junto a vuestros corazones. O, al menos, ése podría ser el caso si os implantaron un marcapasos durante los años setenta.

En esta época los cirujanos se dieron cuenta de que las baterías químicas que llevaban los marcapasos eran muy molestas para el paciente, en concreto para los jóvenes, porque fallaban a menudo y se tenían que cambiar con frecuencia. Y, claro, podéis imaginar lo molesto que es que te tengan que abrir el pecho una vez cada dos años.

Este problema se solucionó cuando empezaron a aparecer los primeros marcapasos nucleares que funcionaban gracias a unos RTG en miniatura que iban cargados con entre 0,2 y 0,4 gramos de plutonio-238,[28] capaz de proporcionar energía a su circuito durante muchísimos años. Las partículas alfa y beta emitidas por el plutonio se veían absorbidas por las paredes del marcapasos, produciendo la diferencia de temperatura que generaba la corriente eléctrica, así que el riesgo para el paciente era prácticamente inexistente.

Pero el invento no pasó mucho tiempo en el mercado. A mediados de los años ochenta, los marcapasos nucleares habían sido sustituidos por los de baterías de litio que, pese a que tenían una vida útil de entre diez y quince años, se consideraban una alternativa más segura. Curiosamente, no era el miedo a que el plutonio de los marcapasos estuviera haciendo daño a los pacientes lo que preocupaba a las autoridades, ya que tan sólo aumentaba en un 25% la dosis de radiación a la que estaban expuestos

anualmente de manera natural.[29] Lo realmente preocupante era la posibilidad de que, después de que fallecieran, el marcapasos pudiera ser incinerado junto con ellos por accidente.

El calor producido por los elementos radiactivos también es muy importante para la vida en la Tierra, ya que se estima que hasta el 50% del calor interno de la Tierra proviene de la desintegración de los elementos radiactivos que contiene (como el uranio, el torio o el isótopo radiactivo del potasio),[30] siendo el resto el calor residual producido por los impactos entre los cuerpos que dieron lugar a nuestro planeta.

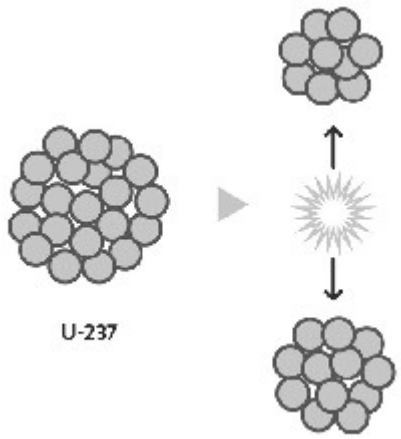
Sea como sea, es probable que el núcleo externo de la Tierra no hubiera permanecido tanto tiempo en estado líquido sin la ayuda de estos átomos radiactivos y, por tanto, podríamos habernos quedado sin campo magnético hace mucho tiempo. Un escenario poco deseable, como hemos visto en el capítulo anterior.

Captado. Entonces, ¿es así es como se genera la energía de las plantas nucleares? ¿Con trozos de material radiactivo caliente?

No, no exactamente. Las plantas nucleares se aprovechan de un proceso llamado *fisión nuclear*.

LA FISIÓN NUCLEAR

Hasta ahora habíamos visto que los núcleos radiactivos pueden ganar estabilidad emitiendo partículas alfa y beta, aunque alguna vez también lo hacen a través de otros procesos más infrecuentes, como la emisión de un solo protón. Pero, a veces, el núcleo atómico está tan incómodo que directamente prefiere ganar estabilidad partiéndose por la mitad, formando dos nuevos núcleos más ligeros. A este proceso se le llama fisión nuclear.



La fisión de un átomo libera una cantidad tremenda de energía. Tanta, de hecho, que la energía que contiene un trozo de combustible nuclear es millones de veces mayor que la contenida en los enlaces químicos de los combustibles fósiles, como el carbón o la gasolina. Pero para liberar toda esa energía hay que conseguir que la mayor parte de los átomos que contiene un bloque de material radiactivo se descompongan a través del mecanismo de la fisión... Y ésa es una tarea complicada porque, en condiciones normales, los átomos radiactivos son muchísimo más propensos a ganar estabilidad a partir de la emisión de una partícula alfa o beta que a partirse por la mitad. En el caso del uranio-235 (^{235}U), el isótopo fisible más utilizado en las centrales nucleares, sólo 1 de cada 500 millones de núcleos se descomponen a través de la fisión de manera natural.

Por suerte, la fracción de átomos que se fisionan se puede alterar bajo las condiciones adecuadas.

Cuando un átomo de ^{235}U absorbe un neutrón, su núcleo se desestabiliza e intenta convertirse en ^{236}U, pero se deforma tanto durante el proceso que termina dividiéndose en dos núcleos diferentes. Por tanto, se puede forzar a la mayoría de los átomos de un bloque de ^{235}U se fisionen a través de este mecanismo si se bombardean constantemente con neutrones. Curiosamente, no se puede predecir qué dos nuevos núcleos más ligeros va a producir la

fisión de un átomo en concreto pero, estadísticamente, se sabe que uno de ellos contendrá alrededor de 95 partículas en su núcleo, mientras que el otro rondará las 137.[31]

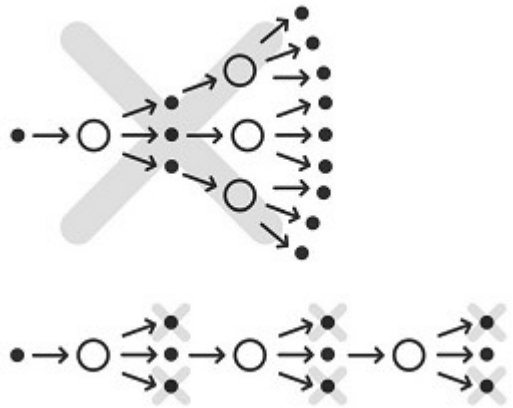
Pero, además de producir dos átomos nuevos, la descomposición de un elemento a través de la fisión también emite partículas sueltas, como por ejemplo neutrones. Y esto es muy importante en el caso que nos ocupa, porque cada átomo de ^{235}U emite tres neutrones cuando se fisiona.

¡Ah, vale! Entonces puedes hacer que esos neutrones que salen disparados del ^{235}U durante la fisión se estrellen contra otros tres átomos de ^{235}U, de manera que cada uno de ellos libere otros tres que provoquen la fisión de nueve átomos nuevos... Y, bueno, empezar una reacción en cadena que libere una gran cantidad de energía, ¿no?

Sí, claro, ese proceso liberará una cantidad tremenda de energía... Pero acabas de describir cómo funciona una bomba atómica, *voz cursiva*: un proceso rápido y descontrolado, que libera una cantidad tremenda de energía en una fracción de segundo. Lo contrario de lo que querrías en una planta de producción de energía, vaya.

Toda esa energía contenida en el ^{235}U se puede aprovechar si se libera lentamente. Si se controla el ritmo al que transcurre la reacción de fisión en cadena que se produce en el interior de un bloque de material radiactivo, puedes conseguir que se mantenga a una temperatura lo suficientemente elevada como para que ese calor se pueda utilizar de una manera segura.

Por esta razón el objetivo principal de un reactor nuclear es absorber dos de los tres neutrones que emite cada átomo después de fisionarse, de modo que la fisión de cada uno de los átomos sólo detone la fisión de uno más, prolongando la reacción en el tiempo en vez de magnificarla.



Desde el punto de vista mecánico, las centrales nucleares producen energía como cualquier central térmica convencional, calentando agua para convertirla en vapor que hace girar una turbina conectada a un imán colocado en una bobina de cables. La diferencia está en el método que utilizan para calentar el agua: las centrales térmicas queman combustibles fósiles, mientras que una central nuclear utiliza el calor emitido por las barras de combustible gracias a las reacciones de fisión que tienen lugar en su interior.

El concepto es sencillo, pero llevarlo a la práctica contiene algunos pasos enrevesados.

En primer lugar, los cilindros de material radiactivo que contienen los tubos de una central nuclear no están compuestos por uranio puro, sino por óxido de uranio. Además, sólo entre el 3 y el 5% del uranio que contienen se encuentra en forma de ^{235}U. El resto es ^{238}U que, como hemos visto, es mucho más estable y no es fisible.

Y ahí está el primer problema: el ^{235}U representa sólo el 0,7% de cualquier muestra de uranio que puedes recoger en la naturaleza, así que el primer paso es aumentar la concentración de ^{235}U del material de partida. Como los dos isótopos tienen propiedades químicas idénticas, la única manera eficiente de separarlos es aprovechando que el ^{235}U es un 1,26% menos denso que el ^{238}U.

Para ello, se mezcla el uranio con flúor para producir hexafluoruro de uranio (UF_6), un gas que se introduce en el interior de unas centrifugadoras que rotan a gran velocidad, de manera que las moléculas que contienen el ^{238}U, al ser ligeramente más densas, están sometidas a una aceleración centrífuga mayor y se acumulan cerca las paredes del depósito. Las plantas de enriquecimiento de uranio están llenas de centrifugadoras conectadas en serie, de manera que el gas que está contenido más cerca del eje de la máquina, donde hay una mayor concentración de ^{235}U, pasa a la siguiente para refinarlo aún más. Cuando el gas tiene la concentración de ^{235}U deseada, el uranio se separa químicamente del flúor para convertirlo de nuevo en un óxido y se prensa en forma de cilindros que se colocarán en el interior de las barras de combustible que alimentan el reactor nuclear.

Llegados a este punto, aparece otro problema: cuando un átomo ^{235}U se fisiona, los neutrones que salen disparados de su interior se mueven demasiado rápido como para que otros átomos de ^{235}U los capturen y se separen en dos núcleos nuevos. Por tanto, para reducir la velocidad de los neutrones que salen disparados entre las barras de combustible, éstas se sumergen en un medio que los ralentiza mientras pasan a través de él. Estas sustancias se llaman moderadores de neutrones y, aunque su nombre suene a tecnología sacada de un libro de ciencia-ficción, en el 75% de los reactores no es más que agua.[32]

Pero, como hemos visto, no queremos que todos los neutrones que salen despedidos del interior de las barras de combustible provoquen la fisión de algún otro átomo porque, como hemos visto, la situación se descontrolaría rápidamente. Por eso el ritmo al que se produce de la cadena de fisión se controla colocando varas de cadmio o de boro entre las barras de combustible, que absorben gran parte de los neutrones que salen de ellas.

De todas maneras, estas barras dejan de ser necesarias a medida que los átomos de uranio se descomponen en elementos más ligeros ya que, con el tiempo, terminan siendo éstos últimos los

que absorben el exceso de neutrones.

Comprendo, pero, si los átomos de uranio casi nunca se fisionan sin ayuda, ¿de dónde viene el primer neutrón que detona la reacción en cadena?

Pues resulta que alrededor de los tubos de combustible también se colocan otras barras que contienen elementos que sí que se fisionan con frecuencia de manera natural y, por tanto, emiten neutrones constantemente. Un ejemplo son los átomos de californio-252, que ganan estabilidad a través de la fisión 1 de cada 32 veces.[33]

El proceso que se utiliza para obtener energía de la fisión nuclear es más complicado, por supuesto, pero esta breve descripción puede dar una idea general sobre el funcionamiento de las centrales nucleares. Además, ayudará a la *voz cursiva* a entender por qué en la región de Oklo, en Gabón, un reactor nuclear subterráneo estuvo produciendo energía hace casi 2.000 millones de años.

¡¿Qué?! ¡Lo sabía! ¡Los extraterrestres han estado aquí!

Calma, *voz cursiva*, que este reactor no fue construido por ninguna civilización inteligente, sino por el azar.

En mayo de 1972, los técnicos de una planta de enriquecimiento de uranio francesa descubrieron que unas muestras minerales que les habían enviado desde Oklo tan sólo contenían un 0,60% de ^{235}U cuando, como hemos visto, lo normal es que éste represente el 0,72% del uranio total. Parecía que, de alguna manera, alguien había estado fisionando el ^{235}U de la roca de donde procedían estas muestras, reduciendo su contenido.

Como querían asegurarse de que no les estaban mangando uranio para fabricar armas nucleares, el gobierno francés decidió investigar la mina de Oklo y el análisis de nuevas muestras de roca reveló que algunas de ellas tenían una concentración de ^{235}U menor del 0,44%. Todo aquello era muy raro pero, cuando se midió la proporción isotópica otros elementos que contenía el material de la zona, como el neodimio o el rutenio, las autoridades entendieron lo

que había pasado: parecía que el depósito de uranio había conseguido sostener procesos de fisión nuclear en el pasado y, a juzgar por las proporciones de los distintos elementos que había producido, se dedujo que este reactor natural estuvo activo hace unos 1.700 millones de años.

En esta época hacía menos tiempo que la Tierra se había formado y, por tanto, el ^{235}U representaba alrededor del 3,1 % del uranio que contenía el planeta (en vez del 0,7% actual) porque había pasado por menos períodos de desintegración.

Pero, para sostener una reacción de fisión controlada, no bastaba con que la proporción de ^{235}U en los minerales del lugar fuera la adecuada: este reactor nuclear natural empezó a funcionar cuando el depósito de uranio de Oklo se llenó de agua.

El reactor de Oklo seguía un ciclo de tres horas. En primer lugar, el depósito se inundaba y el efecto moderador de neutrones del agua «encendía» el reactor, haciendo que el depósito de minerales empezaba a calentarse. Este aumento de temperatura evaporaba el agua y, por tanto, las reacciones de fisión iban perdiendo intensidad hasta que la presión disminuía lo suficiente como para que el agua entrara de nuevo en el depósito y repitiera el proceso, entrando en un bucle que duró cientos de miles de años y se detuvo cuando el contenido de ^{235}U de los minerales descendió por debajo del límite que posibilita la fisión.

Bueno, bueno. ¿Y hoy en día no queda ningún reactor nuclear natural que pueda pinchar para ahorrar un poco en la factura de la luz?

Pues resulta que no, porque el uranio se ha estado convirtiendo en otros elementos durante todo este tiempo y, como he comentado antes, la concentración de ^{235}U de los minerales actuales es del 0,72%, muy lejos de la proporción que posibilita las reacciones de fisión. O sea, que ya no hay manera de que la naturaleza vuelva a producir un reactor natural en nuestro planeta.

Pero tal vez te sorprenda saber que la radiación no es un fenómeno reservado a los laboratorios y las centrales nucleares, *voz cursiva*. De hecho, estamos expuestos a ella todo el tiempo.

LA RADIACIÓN DE FONDO

Tras el descubrimiento de la radiación, la gente tardó un tiempo en darse cuenta de los peligros que podía entrañar. Nuestros cuerpos son capaces de notar los efectos de las otras fuerzas fundamentales: notamos la aceleración de la gravedad cuando caemos, la descarga de los electrones cuando una corriente eléctrica pasa a través de nosotros o incluso el efecto de un ácido al reaccionar con nuestra piel... Pero podemos pasar por delante de un elemento altamente radiactivo sin notar que las partículas que emite están chocando contra nosotros.

La radiación nuclear daña nuestros cuerpos de manera parecida a la que lo hace, por ejemplo, la radiación ultravioleta del sol: las partículas que impactan contra nosotros son capaces de romper los enlaces moleculares, dañándolos y poniendo en peligro la integridad de las células. El impacto negativo de la radicación puede afectarnos de dos maneras diferentes.

Si recibimos una dosis relativamente baja de radiación, algo que depende tanto del número de partículas que chocan contra nosotros como de la energía de cada uno de los impactos, entonces el mayor peligro es que alguna de las partículas destruya parte del ADN de una célula y ésta se empiece a replicar sin control, convirtiéndose en un tumor. En este caso, el daño se produce a largo plazo. En cambio, si nos exponemos a una dosis de radiación muy alta, el intenso bombardeo de partículas sobre nuestros cuerpos puede destruir tantas células que nuestros órganos empiecen a fallar, provocando la muerte en unos días o semanas.

Teniendo en cuenta estas alegres descripciones, vamos a echar un vistazo a algunos incidentes interesantes que ocurrieron antes de que la gente aprendiera a manipular los elementos radiactivos con seguridad.

Por un lado, el descubrimiento de la radiactividad inspiró a muchos charlatanes que empezaron a aprovecharse del desconocimiento general de la población sobre este nuevo fenómeno para vaciarles los bolsillos. En esta época empezaron a aparecer «productos milagro» que contenían materiales radiactivos como, por ejemplo, dentífricos aderezados con torio que prometían dejar los dientes más blancos o jarras que liberaban átomos de radón radiactivo en el agua que harían que te sintieras más enérgico.[34]

Pero el caso más sonado fue el del Radithor, un producto que tuvo una gran repercusión mediática en 1930 porque provocó la muerte del atleta y aristócrata estadounidense Eben Byers.

Byers empezó a tomarlo aconsejado por su médico después de que sufriera una lesión en un brazo. Este brebaje, que prometía acelerar la recuperación de las enfermedades, era en realidad un frasco lleno de agua con alrededor de dos microgramos de radio (Ra)[35] diluido en su interior Durante dos años, Byers estuvo bebiendo tres botellas de Radithor diarias. No hay duda de que no fue la mejor decisión de su vida.

El Radithor contenía los isótopos ^{226}Ra y ^{228}Ra, que se descomponen emitiendo una partícula alfa y una partícula beta respectivamente. Las partículas alfa son la forma de radiación nuclear que tiene el potencial de hacernos más daño porque se ven absorbidas por la materia con mucha facilidad. Pero esta capacidad para transferir energía a su entorno también limita las situaciones en las que nos puede hacer algún mal: disipan toda su energía después de recorrer sólo 6,7 centímetros a través del aire y una capa de aluminio de unas pocas centésimas de milímetro de grosor es capaz de detenerlas. Incluso aunque estemos lo suficientemente cerca de

una fuente radiactiva como para que las partículas choquen contra nuestro cuerpo, éstas son detenidas por completo por nuestra piel que, dentro de lo que cabe, es un órgano muy resistente.

Pero si un elemento radiactivo termina dentro de tu cuerpo, entonces sus átomos pueden bombardear tus delicados órganos internos desde dentro con partículas alfa. Y ahí es donde hacen daño de verdad. Y por eso beber Radithor era una idea tan mala.

A Byers se le empezaron a caer los dientes en 1930 debido al daño que le estaba produciendo la radiación en la mandíbula. El radio se estaba acumulando en sus huesos, haciendo que perdiera masa ósea, y le empezaron a salir agujeros en el cráneo, además de abscesos en el cerebro. De hecho, parte de su mandíbula inferior tuvo que ser extirpada quirúrgicamente porque estaba demasiado dañada. Byers murió en 1932 pero, al menos, su muerte sirvió para concienciar a la población sobre los peligros de la charlatanería radiactiva y los productos como el Radithor desaparecieron del mercado.

Otra historia interesante sobre la radiactividad es la de las Chicas del Radio, un grupo de mujeres que alrededor de 1917 fueron expuestas a dosis altas de radiación en una fábrica de Nueva Jersey que producía relojes con manecillas fluorescentes. Estas mujeres pintaban las manecillas a mano con una pintura radiactiva que contenía radio y que, según les habían dicho, era totalmente inofensiva. Convencidas de que esto era cierto, las trabajadoras no tenían ningún reparo en afilar las hebras de los pinceles con los labios o pintarse las uñas con esta pintura de vez en cuando.[36]

Pero con el tiempo algunas mujeres empezaron a sufrir anemia, sus huesos se volvían frágiles o desarrollaban necrosis en sus mandíbulas. La empresa atribuyó estos efectos a otras enfermedades, pero cinco de las trabajadoras (apodadas las Chicas del Radio) se unieron para llevarla ante los tribunales. La justicia terminó dándoles la razón, reconociendo que sus síntomas estaban

causados por la manipulación de la pintura radiactiva y la empresa fue obligada a dotarlas con una compensación económica por los daños.

La última de las Chicas del Radio murió en la década de 1930. No se conoce el número total de trabajadores de la empresa cuya muerte pudo estar provocada por los efectos de la radiación a largo plazo pero, independientemente de la cifra, el caso tuvo una gran repercusión en los medios y sentó los precedentes que terminarían en la aprobación de la legislación que reconocía los derechos de los empleados ante las enfermedades laborales.

Después de contar estas historias tan alegres, ahora me toca decir que la naturaleza nos está bombardeando con radiación de manera constante. No mucha, por supuesto, pero, básicamente, allá donde existan isótopos inestables de algún elemento, estaremos sometidos a su radiación.

Un ejemplo inesperado son los plátanos, la comida más radiactiva que os podéis llevar a la boca. Como sabréis, los plátanos tienen un alto contenido en potasio (K) y, como he comentado, el 0,012 % de todo el potasio que ocurre de manera natural se encuentra en la forma de ^{40}K, un isótopo inestable que se descompone emitiendo una partícula beta o capturando uno de sus propios electrones, un proceso que emite rayos gamma.

Pero no os preocupéis porque, al no emitir partículas alfa, la radiación emitida por el ^{40}K no es especialmente perjudicial para nuestro cuerpo. Además, su período de semidesintegración es muy largo (unos 1.200 millones de años), así que aunque 4.000 átomos de potasio se estén desintegrando en tu interior cada segundo, tendrías que comer trescientos plátanos, uno detrás de otro, para que te bombardearan con la misma cantidad de radiación que una radiografía... Lo que tampoco os tiene que preocupar porque la dosis recibida durante una radiografía también es muy baja.

En realidad, gran parte de la radiactividad que reciben nuestros cuerpos cada año proviene del uranio de manera indirecta.

Incluso aunque nos pusieran un bloque de uranio delante de nuestras narices, su alto contenido en ^{238}U poco radiactivo difícilmente nos provocaría algún daño mientras el material permaneciera fuera de nuestro cuerpo. El problema es que el ^{238}U se convierte en radón-222 (^{222}Rn) a lo largo de su cadena de desintegración, un isótopo inestable de este gas noble que, a diferencia del uranio, puede colarse con facilidad en nuestro organismo a través de las vías respiratorias y sabotearnos desde dentro con partículas alfa. Para rematar el asunto, los átomos de radón se convierten en polonio-210 (^{210}Po) después de varias transformaciones, otro elemento radiactivo que emite más partículas alfa y se convierte en plomo-206 (^{206}Pb), que es estable... Pero tóxico, claro.

Bueno, por suerte no tengo uranio en casa, así que no me tengo que preocupar del radón.

Pues resulta el uranio se encuentra de manera natural en muchos tipos de roca, como por ejemplo el granito. Por tanto, si tu casa está construida sobre este tipo de terreno, no está bien ventilada y han aparecido grietas en sus cimientos, el ^{222}Rn producido por la descomposición del uranio se puede empezar a acumular en el aire y causar problemas a largo plazo. De hecho, se estima que, sólo en Estados Unidos, entre 15.000 y 22.000 muertes anuales por cáncer de pulmón son atribuibles al radón.[37]

Saliéndonos un poco del tema, *voz cursiva*, ¿sabes de dónde sale el helio con el que llenan los globos de feria y que hace que tu voz suene más aguda cuando lo respiras?

No sé. Del aire, supongo, ¿no?

Pues no, porque el helio es mucho menos denso que el resto de los gases de la atmósfera, así que tiende a flotar hasta las capas más altas y perderse en el espacio. Curiosamente, el helio se extrae de los depósitos de uranio, donde las partículas alfa que han estado emitiendo los elementos radiactivos durante millones de años han recogido electrones de su entorno, convirtiéndose en átomos de helio.

Ah... Pero el hielo no es radiactivo, ¿no?

No, no, pero me parecía curioso.

OK.

Por otro lado, parte de la radiación que recibimos cada año proviene directamente del espacio. Los rayos cósmicos de los que he estado hablando antes no sólo producen el isótopo radiactivo del carbono que respiramos y nos comemos sino que, además, generan grandes cantidades de partículas ligeras (protones, partículas alfa, electrones...) cuando destrozan los átomos de las capas altas de la atmósfera terrestre, que llueven sobre nosotros cuando llegan a la superficie.

La cantidad de radiación de origen espacial que recibirás cada año depende de la altura a la que vivas: cuanto más alta esté tu casa, menor será la cantidad de atmósfera que habrá por encima de tu cabeza para protegerte de la radiación. Por ejemplo, a una altura de 1,6 kilómetros, la ciudad de Denver recibe el doble de radiación anualmente que una ciudad que se encuentre a nivel del mar.[38] Y, como podréis imaginar, la cantidad de radiación que recibimos también aumenta de manera sustancial cuando estamos surcando el cielo a bordo de un avión.

Combinando todas estas fuentes de radiación obtenemos la llamada radiación de fondo o radiactividad natural, la cantidad de radiación a la que estamos expuestos anualmente por mucho que intentemos huir de ella.

¡Oh! ¡Entonces estamos rodeados! ¡Vamos a morir todos!

Tienes razón, *voz cursiva*, todos vamos a morir. Pero no será por la radiación de fondo.

La radiación es un proceso estocástico, lo que significa que una dosis mayor no tiene por qué ser necesariamente más letal. Básicamente, esto se debe a que nada garantiza que alguna de las partículas que termina estrellándose contra tu cuerpo vaya a terminar provocando un cáncer o no. La dosis de radiación absorbida

se mide en sieverts (Sv), donde una dosis de 1 Sv refleja un incremento del 5,5% en la probabilidad de desarrollar un cáncer a causa de ella.

La dosis de radiación que recibimos anualmente ronda entre los 3 y los 6 milisieverts (mSv). En los países desarrollados, la mayor parte de esta dosis procede de los procedimientos médicos y del aire.[39] El personal de los aviones recibe unos 2,19 mSv extras al año, mientras que el límite para cualquier trabajo está en los 50 mSv anuales, no pudiendo acumular más de 100 mSv durante cinco años en casos extraordinarios.

Pero, curiosamente, aunque la radiación puede llegar a provocarnos cáncer, la medicina moderna también puede utilizarla para curarlo.

¿Con suplementos como el Radithor?

No, no, nada que ver con el Radithor, de verdad, porque los métodos de los que hablo han demostrado ser efectivos.

Por ejemplo, la glándula tiroides absorbe la mayor parte del yodo (I) que llega a nuestro cuerpo, de modo que si inyectas ^{131}I en tu torrente sanguíneo, los átomos de este isótopo radiactivo terminarán alojados en esta glándula. Esto es muy útil en los casos en los que un cáncer ha obligado a extirpar la glándula tiroides, porque se puede mandar una carga de yodo radiactivo hasta ella para que elimine las células cancerígenas que puedan haber quedado tras la cirugía.[40]

En otras terapias, se introducen anticuerpos artificiales en el torrente sanguíneo del paciente que simulan los anticuerpos humanos y van cargados con algún agente radiactivo. Estos anticuerpos deambulan por el cuerpo hasta que encuentran una célula cancerígena, se acoplan a ella y la irradian con su carga letal sin dañar al resto de las células sanas.[41] Y luego está la radioterapia, por supuesto, la técnica en la que dirige un haz de radiación contra un tumor que destruye el ADN de las células malignas para limitar su crecimiento o incluso eliminarlas por completo, dependiendo del tipo de cáncer al que se aplique.

Como hemos visto, las fuerzas nucleares que posibilitan la existencia de elementos radiactivos mantienen caliente el interior de nuestro planeta, nos proporcionan energía, nos permiten crear elementos nuevos y pueden provocarnos cáncer, aunque también son capaces curarlo. Pero he guardado su contribución más interesante para el final, para terminar este capítulo de manera más dramática.

EL ORIGEN DE LA MATERIA

Es muy probable que hayáis escuchado alguna vez eso de que «somos polvo de estrellas». Y, sí, es verdad que la materia que nos compone se generó en el interior de alguna estrella que la esparció por el espacio al terminar su vida en forma de supernova. Pero tampoco os sintáis muy especiales por ello porque el gusano más gordo que jamás hayáis visto, el chicle que habéis encontrado pegado debajo de la mesa, la telilla que se forma en la sopa y, en general, todo lo que no esté compuesto únicamente por hidrógeno y helio, también está compuesto por polvo de estrellas.

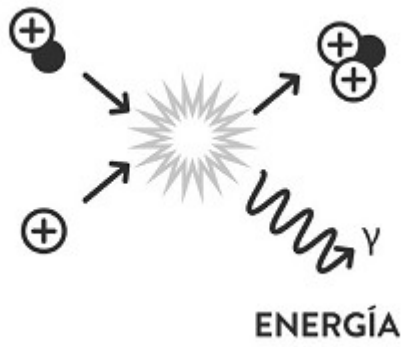
Ya, pero, las estrellas sólo son bolas de hidrógeno gigantescas... ¿Cómo puede ser que todos los elementos que nos rodean provengan de su interior?

Para responder a esta pregunta, hay que hablar de la fusión nuclear.

En condiciones normales, los núcleos de los átomos sólo se pueden acercar tanto unos a otros como los electrones de su órbita más externa les permitan. Como, de media, el diámetro de un núcleo atómico es alrededor de 100.000 veces menor que el del átomo en conjunto, los núcleos de los átomos siempre están increíblemente lejos los unos de los otros en condiciones normales.

Pero en los núcleos de las estrellas las condiciones son de todo, menos normales.

La materia que está contenida en el núcleo del Sol, que ni siquiera es una estrella especialmente grande, se ve comprimida por una presión equivalente a unos 100.000 millones de atmósferas.[42] La fuerza compresiva que actúa sobre los átomos es tan intensa que sus núcleos se llegan a acercar lo suficiente como para que entren en contacto. Como resultado, los dos núcleos atómicos se pueden combinar para dar lugar a un nuevo núcleo que tiene un número de protones mayor y, por tanto, se ha convertido en un elemento nuevo. Este proceso, la llamada fusión nuclear, es la fuente de energía que proporciona el calor que permite que las estrellas brillen.



La cadena de fusión nuclear que tiene lugar en el interior de las estrellas empieza con dos núcleos de hidrógeno... O con dos protones sueltos, que es lo mismo. La unión forzada de los dos protones provoca que uno de ellos se convierta en un neutrón, dando como resultado un núcleo de deuterio (^{2}H), el isótopo del hidrógeno que contiene un protón y un neutrón en su núcleo. A continuación, el deuterio se une con alguno de los núcleos de hidrógeno que lo rodea, formando un nuevo núcleo que contiene dos protones y un neutrón. Como el número de protones de su núcleo ha aumentado, nos encontramos ahora ante un elemento nuevo, el helio (He), concretamente el ^{3}He. Llegados a este punto,

dos núcleos de ^{3}He se pueden combinar entre sí para formar ^{4}He, el isótopo más abundante del helio y que está acompañado por dos neutrones.

Espera, ¿cómo puede ser que la fusión de dos núcleos de ^{3}He dé lugar a un átomo que sigue teniendo dos protones en su núcleo? ¿Qué ha pasado con los dos protones que faltan?

Buena observación, *voz cursiva*. La combinación de todas las partículas que contienen los dos núcleos de ^{3}He intenta dar lugar a ^{6}Be, un isótopo del berilio que contiene cuatro protones y dos neutrones en su núcleo. Esta configuración no contiene suficientes neutrones como para contrarrestar la repulsión de los protones y, como resultado, los dos protones sobrantes salen disparados del núcleo de inmediato y se incorporan a alguna otra cadena de fusión, dejando atrás un núcleo con dos protones y dos neutrones, el ^{4}He.

Este proceso irá agotando las reservas de hidrógeno del núcleo de la estrella mientras la concentración de helio va aumentando. El tiempo que durarán estas reservas dependerá del tamaño de la estrella. El Sol, por ejemplo, ha agotado más o menos la mitad de su hidrógeno durante los 4.600 millones de años que lleva brillando,[43] así que aún le queda hidrógeno para rato. Pero el Sol es una estrella mediana: aunque las estrellas más masivas tienen mayores reservas de hidrógeno, su núcleo está sometido a unas condiciones de presión y calor tan intensas que las reacciones nucleares se suceden a un ritmo muchísimo mayor. Como resultado, las estrellas gigantes pueden utilizar todo su hidrógeno en unas pocas decenas de millones, o incluso sólo millones, de años.

Fantástico, pero hay algo que no entiendo. ¿Cómo se supone que este proceso proporciona energía a la estrella?

Ah, claro, es que como se puede ver en la ilustración anterior, los núcleos de los átomos no sólo se recombinan y forman nuevos elementos al fusionarse, sino que el proceso también emite un montón de energía, tanto en forma de rayos gamma como de partículas más pequeñas que se mueven velocidades tremendas. Estos subproductos de la fusión nuclear sacuden con fuerza los

átomos que los rodean, haciendo que se muevan más rápido y, por tanto, aumentando su temperatura. O sea, que la radiación producida por las reacciones de fusión del núcleo de las estrellas es lo que les proporciona el calor que las convierte en bolas de gas incandescente.

Pero, siguiendo con lo nuestro.

Al ser ligeramente más denso que el hidrógeno, la gravedad va acumulando en el centro de la estrella el helio producido por las reacciones de fusión nuclear. Pero el núcleo de una estrella mediana (como el Sol) no está sometido a la temperatura y presión necesarias como para fusionar ese helio en elementos más pesados y producir energía de modo que, a medida que el hidrógeno se agota, su núcleo se va debilitando hasta que llega un momento en el que la potencia de la fusión nuclear ha disminuido tanto que deja de ser capaz de oponerse al peso de toda la masa de la estrella. Curiosamente, cuando esto ocurre la gravedad comprime un poco la estrella, creando una nueva región alrededor del nuevo núcleo de helio donde el calor y la presión aumentan lo suficiente como para que la fusión del hidrógeno continúe en ella.

Esta nueva capa tiene un volumen mucho mayor del que tenía el núcleo de hidrógeno original, así que la estrella empieza a generar más calor que nunca. Este aumento de la producción energética hace que la luminosidad global de la estrella aumente entre 1.000 y 10.000 veces pero, su superficie se empieza a enfriar. Esto se debe a que las nuevas reacciones de fusión más energéticas empujan las capas externas de la estrella desde dentro, alejándolas del núcleo y, como resultado, el calor producido durante esta fase termina repartido por una superficie mucho mayor. Como consecuencia la temperatura de la superficie de la estrella disminuye durante esta fase de expansión y su brillo adopta longitudes de onda más largas, por lo que acaba emitiendo una luz con tintes anaranjados o rojizos. Por esta razón los astrónomos llaman a estas estrellas *gigantes rojas*, una fase en la que pueden hincharse hasta alcanzar un tamaño cientos de veces mayor a su diámetro original.

Esto significa que...

Sí, *voz cursiva*, es muy posible que el Sol termine tragándose la Tierra cuando se convierta en una gigante roja. Los astrónomos no saben con seguridad si esto va a ocurrir o no pero, suponiendo que el Sol no se llevara nuestro planeta por delante durante este proceso y que viviéramos miles de millones de años, podríamos llegar a ver la siguiente fase de su evolución.

La fusión continúa alrededor del núcleo inerte de helio hasta que el hidrógeno se agota de nuevo, la estrella se vuelve a contraer y aparece otra región nueva alrededor del núcleo, ahora un poco más grande, donde el hidrógeno se puede seguir fusionando. Este ciclo se repite mientras la estrella se expande hasta que no queda hidrógeno lo suficientemente cerca del núcleo como para inaugurar una nueva capa que pueda sostener la fusión de este elemento.

Llegados a este punto, si la estrella tiene una masa equivalente a entre 0,5 y 8 veces la de nuestro Sol, en su núcleo se darán las condiciones de calor y presión necesarias para que el propio helio se empiece a fusionar a través del llamado proceso triple alfa, en el que tres núcleos de ^{4}He se unen para formar uno de ^{12}C. Además, algunos átomos de ^{12}C se unen con otro núcleo de ^{4}He, dando como resultado átomos de oxígeno. Eso sí, las estrellas que se encuentran en este rango de tamaños son incapaces de fusionar el carbono o el oxígeno para producir otros elementos aún más pesados, como el neón. Por tanto, cuando la estrella agota su hidrógeno, empieza a «quemar» el helio alrededor de un creciente núcleo de neón y oxígeno.

Mientras todo esto tiene lugar alrededor del núcleo de la estrella, las reacciones cada vez más energéticas de fusión nuclear empujan hacia afuera las capas externas de la estrella, que empiezan a difuminarse por el espacio y a formar una nebulosa planetaria. Las nebulosas planetarias se llaman así porque, por su forma, a William Herschel le dio la impresión de que parecían los discos de un planeta a través del telescopio, no porque vayan a formar planetas nuevos ni nada por el estilo. En el centro de esta

gigantesca masa dispersa de gas quedará una *enana blanca*, el núcleo de carbono y oxígeno de la estrella original, cuya masa puede oscilar entre 0,17 y 1,33 veces la masa del Sol.

Estos escombros estelares son objetos curiosos, porque tienen el tamaño de un planeta rocoso, pero una masa comparable a la de una estrella. Estas dos características combinadas hacen que la materia que compone las enanas blancas alcance densidades tremendas, del orden de miles de millones de kilos por metro cúbico.

¡Hala! ¿Y cómo son los átomos de este material tan denso?

Bueno, en realidad la materia que compone las enanas blancas se encuentra en un estado bastante... Inusual.

La densidad de una sustancia depende de la cantidad de partículas que caben en un volumen determinado. Por ejemplo, los núcleos atómicos, compuestos por protones y neutrones, tienen una densidad que ronda los 230.000 billones de kilos por metro cúbico.

¿¡Qué!? ¿Estás loco? ¿Cómo va a tener el núcleo esa densidad, si la materia que nos rodea no se acerca ni de lejos a esa cifra?

Pues porque los protones y los neutrones tienen una masa enorme (para ser partículas) y están muy juntos. Pero, claro, su densidad no se refleja en el mundo macroscópico en condiciones normales porque el núcleo del átomo medio tiene un diámetro 100.000 veces menor que su capa más externa de electrones, de manera que el 99,99999999999% del volumen de un átomo y, por tanto, de la materia que nos rodea, es espacio vacío, lo que provoca que su densidad global sea mucho más baja. De hecho, el elemento químico más denso conocido, el osmio, tiene una densidad de «sólo» 22.590 kg/m^3. Esto significa que una botella de agua de un litro llena de osmio pesaría 22,59 kg.

Pero la materia que compone una enana blanca tampoco se encuentra sometida precisamente a condiciones muy normales.

En el interior de las enanas blancas ya no se producen reacciones de fusión nuclear, así que no tienen manera de mantener a raya su propia masa que, impulsada por la gravedad, empieza a compactarlas con tanta fuerza que aplasta los átomos hasta que

todos sus electrones están tan cerca sus núcleos atómicos que dejan de estar ligados a él. Llegados a este punto, la gravedad se encuentra con la resistencia que ofrece la repulsión entre los electrones, que impide que la estrella siga comprimiéndose.

¿La repulsión de sus cargas eléctricas, quieres decir?

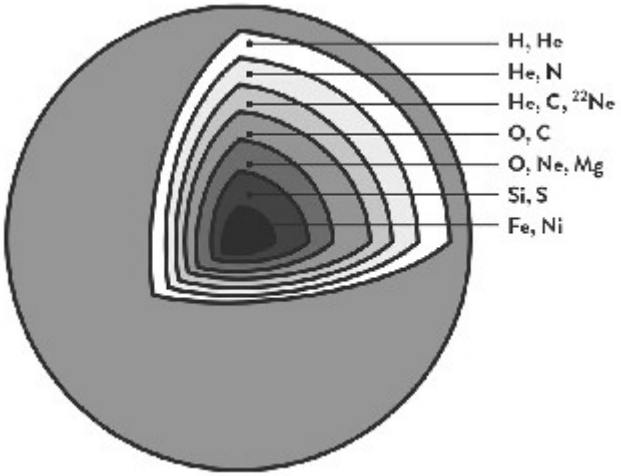
No, no, me refiero a la repulsión cuántica entre los electrones, provocada por el principio de exclusión de Pauli, la ley que impide que dos partículas con las mismas propiedades existan en la misma región estadística.

Por otro lado, como las enanas blancas no tienen ningún mecanismo interno que produzca energía, irradiarán al espacio el calor acumulado durante su formación, enfriándose mientras su luz se apaga a lo largo de escalas de tiempo inimaginables.

Pero las estrellas que nos interesan en este capítulo son las que tienen, como mínimo, una masa ocho veces superior a la del Sol.

Las estrellas gigantes empiezan su vida de la misma manera que las demás, fusionando el hidrógeno y el helio en sus núcleos hasta que el carbono y el oxígeno empiezan a ocupar su lugar en el centro de la estrella. Pero esto no es un contratiempo para estas estrellas tan masivas, porque en su núcleo se dan las condiciones de presión y calor necesarias para que los átomos de estos elementos se fusionen y sigan produciendo energía. De hecho, pueden fusionar elementos mucho más pesados que el oxígeno.

A medida que el interior de la estrella va generando elementos cada vez más pesados, éstos se van ordenando según su densidad, formando varias capas a lo largo del volumen de la estrella en las que los elementos más densos terminan más cerca del núcleo. En cada una de estas capas, la fusión produce elementos más pesados que se hunden hacia la siguiente, donde se convierten en elementos que tienen aún más protones en su núcleo: helio, carbono, nitrógeno, oxígeno, neón, magnesio, cloro, calcio... Y así hasta llegar a las zonas más profundas de la estrella convertidos en níquel.



Pero, al contrario que el resto de las reacciones que se llevaban a cabo hasta este momento en el núcleo de la estrella, la fusión del níquel absorbe energía en vez de producirla. Por tanto, cuando en el núcleo de una estrella muy masiva se acumula una cantidad de níquel considerable, de repente toda la energía producida por la estrella se invierte en fusionar este elemento, que no da nada a cambio. Llegados a este punto, las reacciones de fusión en el núcleo se detienen y, sin una fuerza que contrarreste el efecto de la gravedad, toda la masa de la estrella se precipita hacia su núcleo con una rapidez extrema, alcanzando hasta un 23% de la velocidad de la luz. Esto hace que la estrella entera se comprima, generando presiones tremendas a lo largo y ancho de todo su volumen que provocan la fusión repentina de toda la masa de la estrella y una de las explosiones más intensas del universo, una supernova, un evento que pueden llegar a emitir tanta luz como el resto de la galaxia en la que tienen lugar.

Estas explosiones descomunales no sólo esparcen por el espacio las entrañas ricas en elementos pesados de las estrellas gigantes, sino que, además, los núcleos atómicos que salen despedidos tras la explosión también colisionan y se fusionan, como si de un acelerador de partículas se tratara, formando el resto de los elementos pesados de la tabla periódica. Y así es como las estrellas gigantes llenan al espacio de elementos que nunca se habrían llegado a formar en el

universo. Es por eso que, sin ellas, el espacio no contendría los elementos necesarios para formar planetas rocosos y, con una cantidad indeterminada de suerte, la vida.

Sabiendo esto, es interesante conocer las ideas con las que las culturas antiguas intentaban explicar el origen del mundo que les rodeaba. En algunas versiones de la mitología china, cada parte del mundo se corresponde con un órgano diferente del cadáver de un dios gigante llamado Pangu. En la mitología Kuba, en África central, Mbombo era un gigante blanco que vomitó la Tierra después de sufrir un dolor de estómago. Los indios Kiowa-Apache creían que el mundo había sido creado por un tipo barbudo del tamaño de una rana que se llamaba Kuterastan. Muchas culturas hablan sobre un huevo cósmico del que nacería la Tierra. Algunas tradiciones egipcias sostenían que el mundo había surgido de las aguas sin vida del caos. Tales de Mileto creía que toda la materia provenía del agua, que tenía el poder de transmutarse en el resto de los elementos clásicos. Y había quien creía que las cosas no tenían un origen, que siempre habían estado allí. Pero, curiosamente, parece que nadie se esperaba que toda la materia que nos rodea proviniera del interior de esos pequeños puntos brillantes e inmutables que pasan cada noche por encima de nuestras cabezas.

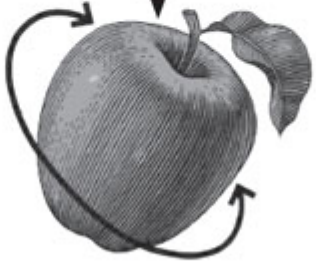
Hasta donde sabemos, las fuerzas nucleares eran las últimas fuerzas fundamentales que nos faltaban por identificar, pero eso no significa que hayamos resuelto todos los misterios que esconden. ¿Existe alguna relación entre estos cuatro comportamientos tan distintos de la materia? ¿Podría ser que estas cuatro fuerzas fueran diferentes manifestaciones de un principio fundamental que está enterrado en una capa aún más profunda de la realidad? Y, de ser así, ¿seríamos capaces de desarrollar un nuevo modelo que explicara todos estos fenómenos a partir de un mismo elemento en común, una Teoría del Todo?

No sé... ¿Sí?

Bueno, vamos a ver cómo están las cosas, *voz cursiva*.

CUARTA PARTE

HACIA UNA TEORÍA DEL TODO



A lo largo de estos capítulos hemos visto cómo, desde la antigüedad, los seres humanos hemos intentado encontrar explicaciones que nos permitieran entender cuál es la causa de todo lo que ocurre a nuestro alrededor. Pero, claro, durante la mayor parte de nuestra historia no contábamos con instrumentos y métodos que nos permitieran medir las magnitudes de los fenómenos que observamos cada día, como la aceleración de la gravedad o la velocidad del viento, de modo que nuestra capacidad para estudiarlos era muy limitada. No es de extrañar, entonces, que nuestra primera reacción fuera atribuir causas sobrenaturales a todo lo que no podíamos explicar, como el brillo del Sol, el agua que cae del cielo o el crecimiento de las plantas. Miráramos donde miráramos, siempre nos parecía ver la influencia de algún dios o una entidad con poderes sobrehumanos.

Pero, entonces, los griegos propusieron que sería una buena idea intentar explicar por qué ocurren las cosas sin recurrir a las explicaciones sobrenaturales. Después de pasar miles de años proponiendo ideas que no conseguían describir la realidad, esta idea tan simple aceleró de manera espectacular el ritmo al que adquiríamos nuevos conocimientos sobre el mundo que nos rodea.

Por ejemplo, a Demócrito se le ocurrió que la realidad podría estar compuesta por diminutas piezas indivisibles llamadas átomos y que cualquier fenómeno se puede explicar a través de las colisiones entre ellos. O sea que, según esta interpretación, todo lo que ocurre en el universo estaría mediado por la transferencia de movimiento a través del contacto físico entre los átomos.

La lógica de esta hipótesis la hizo especialmente popular. De hecho, como hemos visto, hubo quien sugirió que un imán podía mover un pedazo de hierro porque era capaz de apartar el aire que había entre ellos. Esta misma hipótesis fue la que en el siglo XVII

inspiró a René Descartes a sugerir que los planetas dan vueltas alrededor del Sol porque están atrapados en remolinos de éter, una sustancia hipotética muy ligera que inundaba el universo.

Pero entonces llegó Newton y señaló que el espacio no podía estar lleno de éter porque, si esto fuera cierto, los planetas perderían velocidad a través del rozamiento con esa sustancia. Como no había señal en los registros astronómicos de que eso estuviera ocurriendo, la hipótesis del éter debía de estar equivocada. O sea, que Newton no sólo modeló la gravedad de una manera tremendamente precisa, sino que además dejó claro que no hace falta que existiera ningún tipo de materia entre dos objetos para que una fuerza se transmita entre ellos.

Llegados a este punto también se había notado que las interacciones magnéticas tampoco necesitaban un medio físico para «propagarse» pero, más importante aún, en el siglo XIX se descubrió que la electricidad y el magnetismo tenían la misma causa fundamental: el movimiento de los electrones.

El hecho de que dos fenómenos tan aparentemente distintos tuvieran un origen común hizo que un científico británico llamado Michael Faraday se preguntara si, en realidad, la gravedad y la electricidad podrían estar también relacionadas de alguna manera. En sus propias palabras, escritas en 1850:[1]

> La larga y constante persuasión de que todas las fuerzas de la naturaleza son mutuamente dependientes, que tienen un origen común o, más bien, que son manifestaciones diferentes de un mismo poder fundamental, me ha hecho plantearme la posibilidad de establecer experimentalmente una conexión entre la gravedad y la electricidad, introduciendo a la primera en el grupo, la cadena del cual, incluyendo también el magnetismo, la fuerza química y el calor, une tantas y tan variadas exhibiciones de fuerza mediante relaciones comunes. Aunque las investigaciones que he realizado con este objetivo en mente sólo han producido resultados negativos, creo que una exposición corta de la cuestión tal y como se ha presentado en mi mente [...] podría ser útil, tanto como un enunciado general del problema como para despertar las mentes de otros a su consideración.

De hecho, Faraday llegó a postular que la fuerza atractiva a la que llamamos gravedad sería en realidad una forma de atracción electrostática provocada por la carga eléctrica opuesta de los objetos que están en órbita. La idea no era correcta pero, como descubridor del fenómeno de la inducción electromagnética, no es de extrañar que Faraday asumiera que un mecanismo parecido podía aparecer a gran escala.

James Clerk Maxwell seguiría uniendo fenómenos aparentemente inconexos cuando añadió la luz a la lista de fenómenos causados por el movimiento de los electrones, lo que no haría más que intensificar la sensación de que, tal vez, había alguna manera de encontrar un origen común de la gravedad y el electromagnetismo. En el siglo XX, los científicos se pusieron manos a la obra, con la misión de encontrar una única interpretación de la realidad que explicara todas las fuerzas que gobiernan el universo. Una Teoría del Todo, vaya.

Albert Einstein fue uno de los pioneros en este campo. Después de que se le ocurrieran ideas tan revolucionarias como la teoría de la relatividad o explicara la causa del efecto fotoeléctrico, Einstein intentó dar con una interpretación de la realidad que permitiera unir los fenómenos de la gravedad y el electromagnetismo. Pero, llegados a este punto de la historia, la tarea ya no parecía tan sencilla: la física cuántica había revelado que los electrones, las partículas que dan origen a la fuerza electromagnética, se rigen por las leyes estadísticas... Una característica que no comparten con los objetos que interaccionan gravitacionalmente, como los planetas y las estrellas.

Hay que mencionar también que la fuerza electromagnética es muchísimo más fuerte que la gravedad. Podéis observar a lo que me refiero mirando los imanes que tienes pegados en la puerta de la nevera, que no caen al suelo pese a que la masa de todo nuestro planeta está tirando de ellos. De hecho, la intensidad de la fuerza

gravitatoria que aparece entre dos electrones es 39 órdenes de magnitud menor que la fuerza electromagnética repulsiva que actúa entre ellos.

Para visualizar esta cifra se puede tener en cuenta que dos botellas de agua de un litro separadas por una distancia de un metro se ven repelidas con una fuerza de casi 50.000 billones de newtons debido a la repulsión producida entre los electrones que contienen, lo que equivale al peso de los 5 billones de toneladas de hielo que ha perdido nuestro planeta desde 2002 debido al cambio climático.[2]

Pero ¿qué dices? ¿Entonces por qué las botellas de agua no salen disparadas a velocidades absurdas y en direcciones opuestas por la repulsión entre los electrones?

Porque, en la vida real, los electrones de cada botella dan vueltas alrededor de los núcleos atómicos que componen las moléculas de agua, que contrarrestan el efecto con su carga positiva.

Más allá de estas diferencias, la gravedad y el electromagnetismo sí que tienen un rasgo en común: el alcance de las dos fuerzas es (teóricamente) infinito y la intensidad de ambas disminuye con el cuadrado de la distancia. De todas maneras, a Einstein no le hacía ninguna gracia el indeterminismo que acompaña a la mecánica cuántica. De hecho, su famosa frase «Dios no juega a los dados» es una referencia a su negativa a aceptar existen fenómenos naturales que se rigen por el azar. Y, con su no tan famosa respuesta, «Einstein, deja de decirle a Dios lo que tiene que hacer», Niels Bohr pretendía decirle que sus ideas preconcebidas no tenían un peso mayor que la realidad.

Pero parece que Einstein hizo caso omiso a este consejo porque con el tiempo, mientras se volcaba en la formulación de una teoría que debería unir la gravedad y el electromagnetismo, fue centrando cada vez más su atención en la elegancia matemática de su planteamiento que en la realidad que quería describir. Tras treinta años intentando casar las dos teorías, Einstein murió en 1955 sin

completar su tarea con éxito.[3] Bueno, sin completar esta tarea en concreto con éxito, porque el resto de su trabajo científico le fue bastante bien.

Hay que decir que Einstein jugaba con una gran desventaja cuando intentó unificar la gravedad y el electromagnetismo: durante gran parte de su vida ni siquiera conocía la existencia de los neutrones y, además, tampoco había señales de la fuerza nuclear fuerte y la fuerza nuclear débil que rigen el comportamiento de los núcleos atómicos. De hecho, cuando estas fuerzas se identificaron, se observó que cada una de ellas parecía actuar a una escala distinta.

Los efectos de la gravedad son los que dan forma al universo a gran escala, colocando grandes colecciones de átomos en órbita alrededor de otros, haciendo que colisionen o dándoles una forma más o menos esférica, como hemos visto. A nivel atómico, la fuerza electromagnética dirige el comportamiento de los electrones que, como también hemos visto, determina la interacción entre los átomos de toda la materia que nos rodea. En el reino aún más reducido del núcleo de los átomos, mucho más pequeño que el dominio de los electrones, la fuerza nuclear fuerte y la débil son las que cortan el bacalao.

Sabiendo esto, ¿podrían estas fuerzas que actúan a niveles tan distintos tener algún punto en común? ¿Es posible que pudieran ser manifestaciones diferentes de un mismo fenómeno más fundamental? ¿Podría existir una interpretación de la realidad en la que los cuatro fenómenos tuvieran un origen común, una Teoría del Todo?

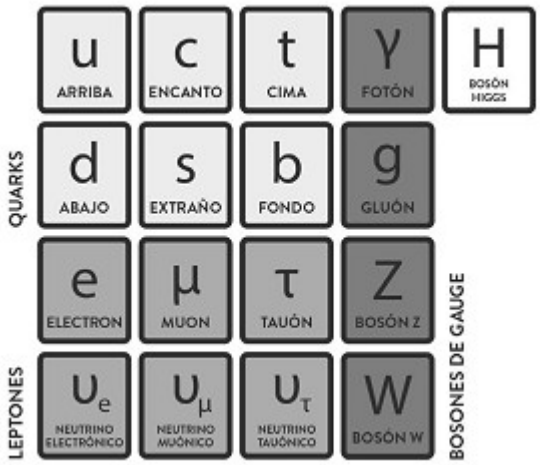
Pues resulta que, de momento, el planteamiento que se encuentra más cerca de encontrar un denominador común entre todos estos fenómenos es el Modelo Estándar, una interpretación que propone que el origen de las fuerzas fundamentales está en el intercambio de *bosones* entre el resto de las partículas que componen la materia.

Creo que tendrás que explicarte mejor.

Sí, creo que sí.

Como hemos visto en el último capítulo, a mediados del siglo xx los científicos habían empezado a darse cuenta de que existen varios tipos de partículas más simples que los protones o los neutrones y que eran realmente fundamentales, como los quarks, que explicaban diferentes aspectos de las interacciones que se producen entre la materia a nivel subatómico. Para catalogar estos descubrimientos, científicos de todo el mundo crearon el Modelo Estándar de Partículas, la formulación que recoge todas esas partículas fundamentales y describe cómo interaccionan entre ellas para producir todos los fenómenos que ocurren a nuestro alrededor.

En la siguiente imagen podéis ver los diferentes grupos de partículas que contiene este modelo (que ahora voy a describir brevemente, antes de que la *voz cursiva* se indigne).



En primer lugar, tenemos los quarks. En el capítulo anterior hemos visto que los seis tipos de quarks se unen mediante la fuerza de color para dar lugar a partículas más grandes, los llamados hadrones... Que es el nombre que reciben las partículas que están compuestas por varios quarks y que, por tanto, no son partículas fundamentales.

Hay dos tipos de hadrones. Los bariones, como los protones y los neutrones, están compuestos por tres quarks, mientras que los mesones sólo contienen dos quarks en su interior. Entre los mesones se pueden encontrar los piones, los kaones y aproximadamente otras doscientas partículas inestables que se producen durante la desintegración de otras partículas más grandes y que no forman parte del núcleo de los átomos.

El Modelo Estándar también cuenta con otro grupo de partículas fundamentales, los leptones, entre las que se entra el electrón. A medida que la tecnología ha avanzado, los científicos han podido reconocer nuevas partículas fundamentales con propiedades similares a nuestros queridos electrones que también forman parte este grupo.

Por ejemplo, en 1936, Carl D. Anderson y Seth Neddermeyer notaron que cuando los rayos cósmicos interaccionan con la atmósfera producen (entre otras cosas) unas partículas fundamentales que tienen la misma carga y el mismo spin que los electrones, pero una masa 207 veces mayor.[4] A estas nuevas partículas las llamaron muones.

Pero ¿qué lugar ocupan los muones en un átomo? ¿Están en el núcleo, camuflados entre los neutrones?

Pues no, porque una de las características de los leptones es que no se ven atraídos por la fuerza de color de los quarks. De hecho, los muones no existen en la naturaleza de manera estable y se desintegran 2,2 microsegundos después de ser creados a partir de la descomposición de otras partículas, transformándose en un electrón y dos neutrinos. Es verdad que un muon puede llegar a sustituir uno de los electrones de un átomo en unas condiciones muy específicas pero, como podéis imaginar, no se trata de una situación duradera debido a su corta vida.[5]

En la familia de los leptones también se pueden encontrar los tauones, descubiertos durante los experimentos del SLAC, 17 veces más masivos que los muones y con un tiempo de desintegración de sólo 29 billonésimas de segundo. También existe un tipo teórico de

materia que podría estar formada por un antitauón, con carga positiva, orbitado por un electrón... Pero, de nuevo, no brilla precisamente por su estabilidad.

Tanto los electrones como los muones y los tauones están asociados a otro tipo de partículas llamadas neutrinos, que son leptones con una masa muy pequeña y carga eléctrica neutra. Los neutrinos electrónicos son los que salen disparados junto con el electrón que aparece tras la transformación de un neutrón en un protón a través de la radiación beta. Cuando un muon se descompone, da lugar a un neutrino electrónico y un electrón, que además van acompañados por un neutrino distinto llamado neutrino muónico.

Y supongo que los tauones producen algo así como un neutrino tauónico al descomponerse, ¿no?

En efecto, *voz cursiva*.

Los neutrinos tampoco forman parte de la materia, por cierto, sino que simplemente son productos que se forman cuando alguna partícula se transforma en otra... Un fenómeno que, como hemos visto, ocurre a menudo durante las reacciones de fusión nuclear o algunos tipos de desintegración radiactiva. Curiosamente, al ser partículas tan ligeras y sin carga eléctrica, los neutrinos pueden pasar fácilmente entre los átomos sin ser detenidos. Tanto es así que un neutrino podría atravesar un bloque de plomo de un año luz de grosor sin interaccionar con una sola partícula, saliendo intacto por el otro lado.[6]

Pero los componentes del Modelo Estándar que realmente nos interesan en esta sección son los bosones que, al ser intercambiados por el resto de las partículas, transmiten las distintas fuerzas fundamentales: las interacciones electromagnéticas se realizan a través de los fotones, los gluones median la fuerza nuclear fuerte y, como ya sabéis, los bosones W y Z son los responsables de la fuerza nuclear débil.

Y resulta que, de momento, éste es el sistema más preciso con el que se ha conseguido describir todas estas interacci...

Un momento, un momento, que esto me suena muy raro. ¿Cómo puede ser que haga falta una partícula para llevar una fuerza de un lado a otro? ¿Se sabe que estos bosones existen o no son más que construcciones teóricas para facilitar los cálculos o algo por el estilo?

Pues existen, *voz cursiva*. De hecho, ése es el punto más fuerte del Modelo Estándar: las propiedades de las partículas fundamentales que contiene fueron predichas de manera teórica antes de que se confirmara su existencia a través de los experimentos... Menos en el caso de los fotones, claro, esos los conocíamos con anterioridad.

Pero nuestros sentidos no son capaces de detectar los bosones que transmiten las fuerzas nucleares, así que los científicos no pudieron confirmar su existencia hasta que, para variar, inventaron los instrumentos que permitieron expandir los límites de nuestra percepción en la dirección adecuada.

Como hemos visto, los aceleradores de partículas son útiles para disparar núcleos atómicos a alta velocidad romperlos en pedazos más pequeños o que queden incrustados, creando así elementos nuevos.

Pero estas sofisticadas máquinas también se pueden utilizar para acelerar chorros de partículas a velocidades tan altas como para que, al impactar, el choque destruya las partículas por completo. Cuando esto ocurre, los bloques fundamentales que las componen salen disparados en todas las direcciones y los científicos pueden analizar la trayectoria de estos escombros fundamentales para identificar qué partículas en concreto han aparecido tras la colisión. De esta manera no sólo pueden descubrir qué partículas fundamentales componen ciertos hadrones, sino que también pueden identificar otras partículas desconocidas.

Ya, pero, si no las puedes ver con un microscopio, ¿cómo identificas esas partículas tan pequeñas que salen despedidas?

Buena pregunta, *voz cursiva*: las diferentes partículas fundamentales que aparecen tras el impacto tienen una masa y/o una carga eléctrica determinadas, así que se pueden identificar por su interacción con su entorno, de manera parecida a la que los científicos empezaron a estudiar las propiedades de las partículas observando cómo se desviaban en presencia de un campo magnético... Aunque, para variar, las cosas no son tan sencillas como parecen.

Pongamos como ejemplo el proceso que llevó al descubrimiento del bosón W^+.

Se había predicho que un bosón W^+ se podía producir a partir de la interacción de un quark arriba y un quark antiabajo. Estupendo, ahora bastaba con estrellar unos cuantos quarks de cada tipo y ver si de la interacción entre alguno de ellos aparecía el ansiado bosón W^+. Primer problema: no puedes hacer que dos «rayos de quarks» se estrellen en el interior de un acelerador de partículas, porque los quarks no son estables en estado libre.

Bueno, pero los protones contienen quarks. Estrellas unos cuantos protones y ya está, ¿no?

Eso tampoco funcionaría, porque los protones están formados por quarks arriba y abajo, pero no contienen ningún quark antiabajo. La partícula que sí que contiene un quark antiabajo es el antiprotón, una configuración de quarks que tiene la misma masa que un protón, pero carga negativa. Por tanto, para forzar la aparición de bosones W^+ debería bastar con dirigir un chorro de protones contra otro de antiprotones a altas velocidades.

Pero los antiprotones son una forma de antimateria que se desintegra al entrar en contacto con la materia ordinaria, así que no se pueden encontrar a nuestro alrededor en ninguna cantidad remotamente apreciable. Como resultado, la antimateria necesaria para realizar este tipo de experimentos se tiene que producir de manera artificial en un laboratorio en unas condiciones muy controladas y, por desgracia, en cantidades muy pequeñas.

Esto de la «antimateria» suena a ciencia-ficción. ¿Estás seguro de que se utiliza en la vida real?

Menuda desconfianza, *voz cursiva*. Pues sí que existe, porque resulta que al acumular una gran cantidad de energía en una región del espacio empezarán a aparecer en ella pares de partículas y antipartículas que, al tener cargas opuestas, tienden a atraerse, colisionar y desintegrarse, convirtiendo el 100% de su masa de nuevo en energía.

O sea, que para crear antimateria de manera artificial basta con producir una gran cantidad de energía en un espacio reducido y separar las partículas y las antipartículas que aparezcan antes de que se vuelvan a unir. Un método de producción de antimateria consiste en dirigir un rayo de protones que se mueven a velocidades cercanas a las de la luz contra una barra de iridio para separar magnéticamente las partículas y las antipartículas que se crean a partir de la energía de la colisión.

Pero, bueno, el caso es que, en 1983, el CERN llevó a cabo un experimento llamado UA1 en el que estrellaron un rayo de partículas y otro de antipartículas en sentidos opuestos para observar el camino que seguían los distintos pedazos de metralla subatómica que salían despedidos tras el impacto cuando interaccionaban con las diferentes capas de material que recubrían el tubo en el que tuvo lugar la prueba.

Y resultó que, de entre los miles de millones de colisiones que tuvieron lugar, seis de ellas apuntaban inequívocamente a la existencia del bosón W^+.

¿Cómo que «apuntaban»? ¿No se detectó el propio bosón W^+?

No, no, no se detectaron bosones W^+ propiamente dichos, sino los productos de su descomposición: por un lado, dos electrones que habían salido despedidos de la colisión en unas trayectorias muy concretas; y por otro, una falta de energía asociada a la emisión de un neutrino que no se podía detectar.[7]

Variaciones más o menos sofisticadas de estos métodos se han utilizado para detectar el resto de los bosones que actúan como mediadores de las fuerzas nucleares. Por ejemplo, los bosones Z se detectaron cartografiando en tres dimensiones las trayectorias de todas las partículas cargadas producidas por las colisiones entre protones y antiprotones. En una de estas colisiones se detectó que un positrón y un electrón habían salido despedidos en direcciones opuestas, señal de que el bosón Z se estaba descomponiendo de la manera en la que se había predicho que lo haría.[8]

De hecho, el punto más fuerte del Modelo Estándar de partículas es su gran poder predictivo. Una muestra de su precisión es que el modelo predecía que los hipotéticos bosones W y Z deberían tener una masa de 80,390 y 91,1874 GeV), respectivamente (donde el electrón-volt, eV, es la unidad que se utiliza en la física de partículas para medir la masa y la energía). Más tarde, los experimentos posteriores en el CERN confirmaron la existencia de dos partículas con masas de 80,387 y 91,1876 GeV que, por supuesto, se correspondían con estos bosones. El logro más reciente de este modelo ha sido la confirmación de la existencia del bosón de Higgs, en 2013, la partícula que explica por qué tienen masa algunas partículas que no deberían tenerla.

Entonces, ¿el Modelo Estándar es la famosa Teoría del Todo que la humanidad lleva milenios buscando?

Pues resulta que no. Aunque es el modelo más preciso con el que contamos para explicar las interacciones que ocurren a nivel subatómico, aún tiene que resolver un problema bastante gordo si pretende alcanzar el estatus de Teoría del Todo: si es una descripción fiel de la realidad y, en efecto, todas las fuerzas fundamentales están mediadas por el intercambio de unas partículas llamadas bosones, entonces fuerza gravitatoria no debería ser una manifestación de la distorsión del tejido espacio-tiempo, como postuló Einstein, sino que también debería existir una partícula que llevara la gravedad de un lado a otro. A estas partículas hipotéticas se las conoce con el nombre de gravitones.

Bueno, pero basta con hacer lo de siempre, ¿no? Estrellar unas cuantas partículas y a ver si asoma algún gravitón después del impacto.

Pues no es tan sencillo porque, como hemos visto, la fuerza gravitatoria es increíblemente débil en comparación con las demás. De hecho, para detectar la interacción de algún gravitón con la materia se necesitaría un detector del tamaño de Júpiter colocado en órbita alrededor de una estrella de neutrones. E, incluso a esta escala, tan sólo se detectaría un gravitón cada diez años.[9]

Por esta razón mucha gente considera el Modelo Estándar como una «teoría de casi todo»: es capaz de explicar satisfactoriamente las interacciones que ocurren a nivel subatómico, pero no incorpora la gravedad, que está mucho mejor descrita según la interpretación de la teoría de la relatividad de Einstein. O sea que, de momento, el Modelo Estándar y la teoría de la relatividad son los modelos que utilizamos para describir lo que ocurre a nuestro alrededor.

Aunque los dos modelos son extremadamente precisos en sus respectivos campos de aplicación, durante el siglo xx muchos científicos empezaron a buscar otras interpretaciones de la realidad que permitieran explicar la gravedad y las demás fuerzas a través de una causa común, algo parecido a la manera en la que se descubrió que dos fenómenos tan distintos como la electricidad y el magnetismo eran el resultado del movimiento de los electrones.

Una de estas interpretaciones es la famosa teoría de cuerdas, una idea que se empezó a fraguar en los años sesenta, cuando la comunidad científica se estaba dando cuenta de que una de las teorías que intentaba explicar el mecanismo tras las interacciones nucleares, la teoría de Matrices S, era mucho menos precisa que la cromodinámica cuántica, la parte del Modelo Estándar que describe cómo funciona la fuerza de color que mantiene el núcleo unido.

Pero, entre 1968 y 1973, los científicos que estaban trabajando en el marco teórico de esta teoría notaron que sus fórmulas estaban describiendo en realidad las interacciones entre unos objetos unidimensionales mucho más pequeños que las partículas

fundamentales a los que llamaron cuerdas, así que concluyeron que esta interpretación parecía ofrecer una descripción de la realidad a un nivel aún más fundamental del que se había considerado hasta la fecha.

Con el tiempo, la idea evolucionó hasta convertirse en la teoría de cuerdas que conocemos hoy en día, en la que se postula que los bloques fundamentales que componen la realidad no son las distintas partículas fundamentales conocidas, sino unos objetos aún más pequeños, las cuerdas, filamentos energéticos unidimensionales que, en función de la frecuencia con la que vibren, adoptan las propiedades de una partícula u otra. Y, por supuesto, según esta interpretación, todo lo que ocurre a nuestro alrededor sería el resultado de la interacción entre estas cuerdas vibrantes.

¿Y sabemos si esta teoría es cierta?

Bueno, la única manera de comprobar si una teoría se ajusta o no a la realidad es mediante la experimentación. Y aquí es donde, según sus críticos, la teoría de cuerdas se encuentra en terreno pantanoso.

Por ejemplo, esta teoría predice que el tamaño de las cuerdas en las que está basada es del orden de la longitud de Planck (10^{-35} metros) o, lo que es lo mismo, 22 órdenes de magnitud menor que los protones o los neutrones que, como sabéis, ya son endiabladamente pequeños de por sí. La tecnología actual no puede detectar objetos que tienen una longitud menor a 10^{-16} metros, así que necesitaríamos mejorar un trillón de veces su resolución para corroborar si la materia está realmente compuesta o no por cuerdas en su nivel más fundamental.[10]

Otra de las propiedades de la teoría de cuerdas es que sólo tiene validez en un universo donde existen 11 dimensiones espaciales algo que, como habréis comprobado, no parece ser el caso a primera vista. Los científicos que estudian esta teoría afirman que este concepto no es incompatible con nuestra percepción del

universo y que estas dimensiones adicionales podrían estar limitadas a escalas microscópicas pero, de nuevo, no hay manera de verificar esta suposición con la tecnología actual.

En definitiva, los críticos de la teoría de cuerdas sostienen que, aunque su planteamiento matemático es muy elegante, en sus cincuenta años de historia no ha ofrecido ninguna predicción que se pueda poner a prueba experimentalmente para confirmar su validez por encima de la de otros modelos.[11] Por ejemplo, como hemos visto, Einstein demostró que su teoría describía mejor el universo que la física newtoniana porque predijo que, si estaba en lo cierto, un rayo de luz debería curvarse en presencia de un campo gravitatorio. Entonces se observó cómo se comportaba la luz de las estrellas cercanas al Sol durante un eclipse y se pudo comprobar que, en efecto, las ideas de Einstein explicaban mejor la naturaleza de la gravedad que las de Newton.

Es posible que la alternativa más realista a la teoría de cuerdas como candidata a Teoría del Todo sea la llamada gravedad cuántica de bucles.

Esta otra conjetura surgió en 1986 cuando al físico Abhay Ashtekar se le ocurrió expresar la teoría de la relatividad de Einstein de una manera distinta, asumiendo que el espacio está dividido en unas unidades mínimas del tamaño de la longitud de Planck, como si fueran «partículas fundamentales de espacio». Aunque la intención inicial de este modelo era modelar el efecto de la gravedad a nivel cuántico, con el tiempo ha ido ganando inercia como otra posible Teoría del Todo porque, entre otras cosas, hay quien ha sugerido que la forma de los lazos que unirían estas unidades mínimas de espacio podría dar lugar a las propiedades que presentan las partículas fundamentales.[12] Pero, aunque esta teoría ha cosechado algún logro, como el cálculo de la entropía de los agujeros negros, le ocurre lo mismo que a la teoría de cuerdas: nuestra tecnología aún está muy lejos de poder distinguir esas unidades fundamentales en las que estaría dividido el espacio.

En cualquier caso, en 1967, incluso antes de que los defensores de cada una de estas teorías alternativas se empezaran a pelear, los científicos que trabajaban con el Modelo Estándar ya habían conseguido unificar de manera teórica la fuerza electromagnética y la fuerza nuclear débil en la llamada fuerza electrodébil.

¿¡Qué!? ¿Dos de las cuatro fuerzas fundamentales ya tienen una explicación común y nadie me había avisado?

Es que tampoco habías sacado nunca el tema, *voz cursiva*. Lo que se notó en aquella época es que los bosones Z, W^+ y W^- (muy masivos) y los fotones (sin masa) deberían ser en realidad cuatro manifestaciones distintas de una misma partícula que, de alguna manera, estaba obteniendo masa en tres de sus cuatro formas. Los científicos propusieron que la causa de estas diferencias debía encontrarse en la interacción de estas partículas con otra partícula llamada bosón de Higgs... Cuya existencia se verificó en 2013, confirmando la hipótesis y reforzando aún más el poder predictivo del Modelo Estándar.[13]

De momento, incluso aunque describan fenómenos que actúan a escalas diferentes, el Modelo Estándar y la teoría de la relatividad son las mejores herramientas de las que disponemos para describir las interacciones fundamentales que dan forma al universo. Dado el estado actual de la física, el concepto de una Teoría del Todo aún es una idea lejana e incierta.

Es posible que en las próximas décadas se haga algún descubrimiento que permita ir un poco más allá y unificar los gluones que median la fuerza nuclear fuerte con la teoría electrodébil convirtiendo el Modelo Estándar en una interpretación que explicaría todos los fenómenos que ocurren a nivel subatómico a través de una única interacción fundamental. Pero, aunque esto ocurriera, no se espera que en un futuro cercano aparezca ninguna evidencia que favorezca la existencia de los gravitones... Y, por tanto, no hay señal de que la fuerza gravitatoria se vaya a poder explicar a través del Modelo Estándar.

Por otro lado, la teoría de cuerdas y la gravedad cuántica de bucles aún no se encuentran en su forma final, así que no hay manera de decir si alguna de ellas conseguirá unificar todas las fuerzas fundamentales en un futuro o si, por cualquier motivo, la Teoría del Todo aparecerá a partir de una mezcla de las dos.

Aunque, por supuesto, también está la posibilidad de que no exista ninguna Teoría del Todo y que la gravedad y el resto de fuerzas fundamentales simplemente se rijan por principios totalmente distintos.

Pero no desesperes, *voz cursiva*: como hemos visto a lo largo del libro, la ciencia avanza más deprisa cuando se descubren fenómenos desconocidos, así que sólo podremos resolver la mayor incógnita que existe en el campo de la física si llevamos la realidad al límite y seguimos haciéndonos preguntas. Con suerte, al final terminaremos encontrando los fenómenos aparentemente inconexos que nos permitirán descubrir si todas las fuerzas que rigen el universo tienen una relación más estrecha de lo que parece.

Perdona, ¿decías algo? Es que he conseguido pillar WiFi y no te estaba escuchando.

Nada, *voz cursiva*, quería recordarte que, gracias a internet, hoy en día el ser humano medio tiene al alcance de su mano más información de la que la mayor parte de todos los científicos y pensadores de los que he hablado en estas páginas pudieron consultar durante toda su vida. Así que sigue sacándole la puntilla a todo lo que escuchas, haciéndote preguntas y buscando respuestas. Quién sabe si serás tú quien, en un futuro, descubra si existe algún principio fundamental que conecte todas las fuerzas que dan forma a la realidad.

¿Eh? Ah, sí, sí, lo que tú digas. Oye, ¿habías visto este vídeo de un gato que toca el piano?

Más bibliografía de interés:

«Convection in the Earth's Mantle», P. J. Brancazio. SAO/NASA Astrophysics Data System (ADS). 08-09/04/1963. <http://adsabs.harvard.edu/full/1964oeao.conf...64B>.

«Mantle Convection», David Bercovici. Enclyclopedia of Solid Earth Geophysics, 26/12/2010. <http://people.earth.yale.edu/sites/default/files/files/Bercovici/17_MantlConvection-ESEG2011-2_0.pdf>.

«A researcher's guide to: plant science», National Aeronautic and Space Administration (NASA) <https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/NP-2015-03-014-JSC_Plant-Research-ISS-mini-book-508(1).pdf>.

«Grapling with gravity: how will life adapt to living in space?» Robert. W. Phillips.

Notas

Prólogo

1. «What is Anaximander's Apeiron?», Elizabeth Asmis. Project MUSE. <https://muse.jhu.edu/article/227216/pdf>.

2. «Pythagoras», Stanford Encyclopedia of Philosophy. 23/02/2003, revisado el 28/05/2014. <http://plato.stanford.edu/entries/pythagoras/>.

3. *Metafísica*, Aristóteles. Libro 1, parte 5. <http://classics.mit.edu/Aristotle/metaphysics.1.i.html>.

4. *Archytas of Tarentum: Pythagorean, Philosopher and Matematician King*, pp. 492-93, Carl Huffman. Cambridge University Press, 23/05/2005. Accedido a través de Google Boooks, <books.google.com>.

Primera parte. La gravedad

1. *Vitruvius: the ten books of architecture*, Morris Hicky Morgan, PhD. Harvard University Press, 1914, <http://www.gutenberg.org/files/20239/20239h/29239-h.htm#Page_215>.

2. *Bīrūnī, Muḥammad ibn Aḥmad, Alberuni's India (v. 1)*, Kegan Paul, Trench, Trübner & Co., 1910. P. 272. Columbia University Libraries, Digital Collection. <http://www.columbia.edu/cu/lweb/digital/collections/cul/texts/ldpd_5949073_001/pages/ldpd_5949073_001_00000328.html>.

3. «On Motion», Al Van Helden. The Galileo Project, 1995. <http://galileo.rice.edu/sci/theories/on_motion.html>.

4. «Hammer vs Feather – Physics on the Moon», AIRBOYD. Youtube, 01/04/2010. <https://www.youtube.com/watch?v=KDp1tiUsZw8>.

5. «Brian Cox visits the world's biggest vacuum chamber – Human Universe: Episode 4 Preview; BBC Two», BBC. Youtube, 24/10/2014. <https://www.youtube.com/watch?v=E43-CfukEgs>.

6. «The first predicted return of comet Halley», Peter Broughton. Journal for the History of Astronomy, vol. 16, no. 2/Jun/46, 1985. <http://adsabs.harvard.edu/full/1985JHA....16..123B>.

7. «Pendulum Clock», Al Van Heiden. The Galileo Project (1993). <http://galileo.rice.edu/sci/instruments/pendulum.html>.

8. «The first man/machine interaction in medicine: the pulsilogium of Sanctorius» <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/370523>.

9. «Huygens' clocks», M. Bennet, M. F. Schatz, H. Rockwood, K. Wiesenfeld. Georgia Institute of Technology. <http://web.archive.org/web/20080410084732/http://www.physics.gatech.edu/research/schatz/pubs/royclocks2.pdf>.

10. «History Topic: Longitude and the Académie Royale», J. J. O'Connor, E.F. Robertson. MacTutor History of Matematics, febrero de 1997. <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/history/PrintHT/Longitude1.html>.

11. *How we got to now: six innovations that made the modern world*, Steven Johnson. Penguin UK, 16/10/2014. Accedido a través de Google Books, <books.google.com>.

12. «The meridian arc measurement in Peru 1735-1745», Jim R. Smith. HS4 Surveing and mapping the Americas – Andes of South America, abril de 2002. <https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig_2002/Hs4/HS4_smith.pdf>.

13. «Isaac Newton and the problem of Earth's shape», John L. Greenberg. History of Exact Sciences Volume 49, Issue 4, pp. 371-391 (diciembre de 1998). <http://link.springer.com/article/10.1007/BF00374704>.

14. «List of Foucault pendulums», Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Foucault_pendulums>.

15. «South Pole Foucault Pendulum», Amudsen-Scott South Pole Station. Invierno de 2001. <http://www.southpolestation.com/trivia/00s/southpolefoucault.html>.

16. «Height of the ISS», Heavens Above. <http://www.heavens-above.com/IssHeight.aspx>.

17. «America at the Threshold – Report of the Synthesis Group on America's Space Exploration Initiative», Thomas P. Stafford, p.31, 1991. Accedido a través de Google Books, <books.google.com>.

18. «ISS – Orbit», Chris Peat. Heavens Above. <http://heavens-above.com/orbit.aspx?satid=25544>.

19. «Escape Velocity – List of Escape Velocities», Wikipedia.org. <https://en.wikipedia.org/wiki/Escape_velocity#List_of_escape_velocities>.

20. «The RAVE survey: constraining the Local Galactic escape speed». Martin C. Smith et al. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 04/02/2008. <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/0611671v2.pdf>.

21. «LGG 104», SIMBAD Astronomical Database. <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=LGG+104>.

22. «The Rocket», Man-Vehicle Laboratory. MIT Department of Aeronautics and Astronautics, 8/05/1996. <http://web.mit.edu/16.00/www/aec/rocket.html>.

23. «Earth Fact Sheet», Dr. David R. Williams. NASA Goddard Space Flight Center, actualizado por última vez el 19 de mayo de 2016. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>.

24. «New Horizons. The first mission to Pluto and the Kuiper Belt: Exploring Frontier Wolrds», NASA/SRI/APL, febrero de 2007. <http://pluto.jhuapl.edu/News-Center/Resources/Press-Kits/011607_JupiterPressKit.pdf>.

25. «The fastest spacecraft ever?», Caleb A. Scharf. Scientific American, 25/02/2013. <http://blogs.scientificamerican.com/life-unbounded/the-fastest-spacecraft-ever/>.

26. «Voyager, the interstellar mission. Weekly Reports», NASA/JPL. <http://voyager.jpl.nasa.gov/mission/weekly-reports/>.

27. «Voyager 1 hasn't left the Solar System, but that's OK», Rachel Courtland. IEEE Spectrum, 13/09/2013. <http://spectrum.ieee.org/tech-talk/aerospace/astrophysics/voyager-1-hasnt-really-left-the-solar-system>.

28. «Juno arrives at Jupiter: 'It's the end of the voyage, but the beginning of the science'», Amina Khan, Science Now. *Los Angeles Times*, 05/07/2016. <http://www.latimes.com/science/sciencenow/la-sci-sn-juno-in-jupiter-orbit-20160704-snap-story.html>.

29. <https://en.wikipedia.org/wiki/Asteroid_belt#Characteristics>.

30. «The Potato Radius: a lower mínimum size for dwarf planets», Charles H. Lineweaver, Marc Norman. National Space Society of Australia (2010). <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1004/1004.1091.pdf>.

31. «¿Qué pasaría si la Tierra fuera plana? (1.ª Parte)», Jordi Pereyra. Ciencia de Sofá, 18/01/2015. <http://cienciadesofa.com/2015/01/que-pasaria-si-la-tierra-fuera-plana-1a-parte.html>.

32. «¿Qué pasaría si la Tierra tuviera una forma distinta? (de cubo, tetraedro...)», Jordi Pereyra. Ciencia de Sofá, 28/02/2016. <http://cienciadesofa.com/2016/02/que-pasaria-tierra-tuviera-forma-distinta.html>.

33. «Planet Tables», Nick Strobel. Astronomy Notes, última actualización 10/05/2013. <http://www.astronomynotes.com/tables/tablesb.htm>.

34. «Flattest star ever seen», European Southern Observatory (ESO), 11/06/2013. <https://www.eso.org/public/news/eso0316/>.

35. «Size distribution of faint jovian L4 trojan asteroids», F. Yoshida, T. Nakamura. *The Astronomical Journal*, Vol. 130, n.º 6 (2005). <http://iopscience.iop.org/article/10.1086/497571/meta>.

36. «The Moon in ancient Egypt», Tour Egypt. <http://www.touregypt.net/featurestories/moon.htm>.

37. *The Cambridge guide to the solar system*, Kenneth R. Lang, p. 198. Cambridge University Press, 03/03/2011. Accedido a través de Google Books, <books.google.es>.

38. «Tides around the worlds», AVISO (Satellite Altimetry Data). <http://www.aviso.altimetry.fr/en/applications/ocean/tides/tides-around-the-world.html>.

39. «¿Existen mareas en tierra firme?», Jordi Pereyra. Ciencia de Sofá, 20/08/2015. <http://cienciadesofa.com/2015/08/existen-mareas-en-tierra-firme.html>.

40. «Age of the moon», Fraser Cain. Universe Today, 24/12/2015. <http://www.universetoday.com/19599/age-of-the-moon/>.

41. «Lunar orbital evolution: a synthesis of recent results», Bruce G. Bills, Richard D. Ray. Geophysical Research Letters, vol. 26, n.º 19, pp. 3045-3048, 01/10/1999. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/1999GL008348/pdf>.

42. «Geological constraints on the Precambrian history of Earth's rotation and the Moon's orbit», George E. Williams. <https://www.eoas.ubc.ca/~mjelline/453website/eosc453/E_prints/1999RG900016.pdf>.

43. «Geological constraints on the Precambrian history of Earth's rotation and the Moon's orbit», George E. Williams. <https://www.eoas.ubc.ca/~mjelline/453website/eosc453/E_prints/1999RG900016.pdf>.

44. «Earth/Moon system with tidal bulge», Kevin Gill. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=7AHshzLquOU>.

45. «Eclipse predictions and Earth's rotation», Fred Espenak. NASA Eclipse, actualizado por última vez el 11/07/2005. <http://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEhelp/rotation.html>.

46. «Hallan los fósiles más antiguos conocidos hasta ahora», Agencia SINC, 31/08/2016. <http://www.agenciasinc.es/Noticias/Hallan-los-fosiles-mas-antiguos-conocidos-hasta-ahora>.

47. «Big Sauropods – Really, really big sauropods», Gregory S. Paul. The Dinosaur Report, otoño de 1994. <http://gspauldino.com/DinoArtSauropods.pdf>.

48. Recomiendo buscar imágenes del animal, es una pasada. <https://en.wikipedia.org/wiki/Paraceratherium>.

49. «Shoulder height, body mass and shape of proboscideans», Asier Larramendi. *Acta Paleontologica Polonica* (2014). <http://www.app.pan.pl/archive/published/app60/app001362014_acc.pdf>.

50. «Biology of sauropod dinosaurs: the evolution of gigantism», *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3045712/>.

51. «Study limits máximum tree height», Jonathan Amos. BBC, 21/04/2004. <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/3643899.stm>.

52. «Water's the limit for tall trees», Mark Kinver. BBC, 13/08/2008. Estimación basada en los abetos de Douglas. <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/7556065.stm>.

53. «A nuclear F-actin scaffold stabilazes ribonucleoprotein droplets against gravity in large cells», Marina Feric, Clifford P. Brangwynne. Nature Cell Biology 15, pp. 1253-59, 01/09/2013. <http://www.nature.com/ncb/journal/v15/n10/full/ncb2830.html>.

54. «Animals and man in space», Dietrich E. Beischer, Alfred R. Fregly. US Naval School of Aviation Medicine, US Naval Aviation Medical Center (1960).

55. «The begginings of research in space biology at the Air Force Missile Development Center, 1946-1952», NASA, History of research in space biology and biodinamics. <http://history.nasa.gov/afspbio/part1.htm>.

56. «A brief history of animals in space», NASA. <http://history.nasa.gov/animals.html>.

57. «Space elevator economics, costs of current systems (rockets)», Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Space_elevator_economics#Costs_of_current_systems_.28rockets.29>.

58. «Gravitropism in higher plants», Rujin Chen, Elisabeth Rosen, Patrick H. Masson. American Society of Plant Phyisiologists (1999) <http://www.plantphysiol.org/content/120/2/343.full>.

59. «Chronic exposure to ethylene induces stress symptoms in radish», I. Eraso, G. W. Stutte, E. C. Stryjewski. *Biology and Biotechnology of the plant hormone ethylene III* (2003).

60. «Growing Pains», Robert Zimmerman. Smithsonian Air&Space Mag, 09/2003. <http://www.airspacemag.com/space/growing-pains-4148507/>.

61. «First successful space seed-to-seed plant growth experiment in SVET-2 Space Greenhouse in 1997», Tania Ivanova, Svetlana Sapunova, Plamen Kostov, Ivan Dandolov. Space Research Institute, Bulgarian Academy of Sciences. <http://www.space.bas.bg/astro/Aerosp16/tania1.pdf>.

62. «Station investigation to test fresh food experience», NASA, 16/10/2010. <http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/veggie.html>.

63. «Astronauts snack on space-grown lettuce for the first time», Robert Z. Pearlman. Space.com, 10/08/2015. <http://www.space.com/30209-astronauts-eat-space-lettuce.html>.

64. «Birds in space II: quails in the cosmos», Finch Wench. 06/09/2011. <https://finchwench.wordpress.com/2011/09/06/cosmoquails/>. «The impact of gravity in life», Emily R. Morey-Holton. <http://www.dsls.usra.edu/biologycourse/workbook/Unit7-1.2%20Suppl.pdf>.

65. «Experiment results: insect flight observation at zero gravity», Todd E. Nelson, James R. Peterson. NSTA-NASA Shuttle Student Involvement Project, Final Report. 20/09/1982.
<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19830025642.pdf>.

66. «Autonomous flying microrobots (RoboBees)», Hansjorg Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering at Harvard University. <http://wyss.harvard.edu/viewpage/457>.

67. «Flying the Vomit Comet has its ups and downs», Glen Golightly. Space.com, 20/10/1999.
<https://web.archive.org/web/20060310204522/http://www.space.com/peopleinterviews/yaniec_991020.html>.

68. «Pigeons in space», AIRBOYD. <https://www.youtube.com/watch?v=w4sZ3qe6PiI&ab_channel=AIRBOYD>.

69. «Disorientation of animals in microgravity», Shigeo Mori. Space Medicine Research Center, Institute of Enviromental Medicine (1995).

70. «Weightless cats-can I has gravity», AIRBOYD. <https://www.youtube.com/watch?v=O9XtK6R1QAk>.

71. «Hafele-Keating experiment», Wikipedia <en.wikipedia.org>. <https://en.wikipedia.org/wiki/Hafele%E2%80%93Keating_experiment>.

72. ¿Qué pasa si me caigo en un agujero negro?», Jordi Pereyra. Ciencia de Sofá, 26/07/2015. <http://cienciadesofa.com/2015/07/que-pasa-si-caigo-en-un-agujero-negro.html>.

73. «A trip forward in time. Your travel agent: Einstein», Dennis Overbye. *New York Times*, 28/06/2005. <http://www.nytimes.com/2005/06/28/science/a-trip-forward-in-time-your-travel-agent-einstein.html?_r=1>.

74. «¿Por qué es importante la detección de ondas gravitacionales?» Jordi Pereyra. Ciencia de Sofá, 17/01/2016. <http://cienciadesofa.com/2016/01/por-que-es-importante-la-deteccion-de-ondas-gravitacionales-2.html>.

75. «Epic gavitational wave detection: how scientists did it», Mike Wall. Space.com, 11/02/2016. <http://www.space.com/31913-how-scientists-detected-gravitational-waves-ligo.html>.

Segunda parte. El electromagnetismo

1. «The Fire of St. Elmo», Keith C. Heidron, PhD. Weather Phenomenon and Elements, 30/05/1998. <http://www.islandnet.com/~see/weather/elements/stelmo.htm>.

2. «First voyage around the world (1519-1522): an account of Magellan's expedition», Antonio Pigafetta. Google Books <books.google.es>. Páginas no enumeradas, Rerefencia [13].

3. «St. Elmo’s Fire on mast of ship at sea», Dr. G. Hartwig. NOAA Photo Library, recuperado a través de Arhive.org. <http://web.archive.org/web/20030828005734/http://www.photolib.noaa.gov/library/libr0525.htm>.

4. «Atmospheric Phenomena, Unusual phenomena around the world». <https://atoptics.wordpress.com/tag/st-elmos-fire/>.

5. «Malapterurus electricus», Heok Hee Ng. Animal Diversity Web (ADW), 2000. <http://animaldiversity.org/site/accounts/information/Malapterurus_electricus.html>.

6. «Natural History, 32.2, Pliny the Elder». Traducido por Latin Texts and Translations, Perseus Project. University of Chicago. <http://perseus.uchicago.edu/perseus-cgi/citequery3.pl?dbname=PerseusLatinTexts&getid=1&query=Plin.%20Nat.%2032.2>.

7. «Historical beginnings of the theories of Electricity and Magnetism», Michael Fowler. University of Virginia. <http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more_stuff/E&M_Hist.html>.

8. «DRN VI. Bailey. De Rerum Natura – The classic poem of epicurean philosophy» <http://newepicurean.com/lucretius/vi/vi-bailey/>.

9. «Enchiridion. On Faith, Hope, and Love», San Agustín de Hipona. Capítulo III, 9. Traducido y editado por Albert C. Outler, PhD. (1955). <http://www.tertullian.org/fathers/augustine_enchiridion_02_trans.htm>.

10. «Electricity: its history and proress», The Enclyclopedia Americana, a library of universal knowledge, vol. X, pp. 172ss, 1928. Versión digitalizada disponible en: <https://archive.org/stream/encyclopediaame21unkngoog#page/n211/mode/1up >.

11. *Electricity in the 17th and 18th centuries: a study of early modern physics*, J. L. Hellibron. Consultado a través de Google Books <books.google.com>.

12. *The Handy physics answer book*, Paul W. Zitzewitz. Consultado a través de Google Books <books.google.com>.

13. «Rays of positive electricity», Proceedings of the Royal Society A 89 1-20 (1913). Extraído de *The world of the atom, Vol. 1*, A. Boorse, Lloyd Motz. Basic Books (1966). <http://web.lemoyne.edu/~giunta/canal.html>.

14. «Fluorine, an obsession with a tragic past», Richard Toon. Education in Chemistry, p. 149, septiembre de 2011. <http://www.rsc.org/images/EiC_Sept2011_fluorine_tcm18-207109.pdf>.

15. «ADA statement commemorating the 60th anniversary of community water fluoridation», American Dental Association. 2005. <http://www.ada.org/~/media/ADA/Member%20Center/FIles/fluoridation_facts.ashx>.

16. «Impossible chemistry: forcing noble gases to work», Phillip Ball. New Scientist, 21/01/2012. <https://www.newscientist.com/article/mg21328481-700-impossible-chemistry-forcing-noble-gases-to-work/>.

17. «Helium compounds», Wikipedia <en.wikipedia.com>. <https://en.wikipedia.org/wiki/Helium_compounds>.

18. «What is the chemical composition of farts», Anne Marie Helmenstine, Ph.D. Chemistry About Education, actualizado por última vez el 07/08/2015. <http://chemistry.about.com/od/medicalhealth/f/What-Is-The-Chemical-Composition-Of-Farts.htm>.

19. «Periodic table of elements: LANL», Los Álamos National Laboratory. <http://periodic.lanl.gov/6.shtml>.

20. «Oldest known sponge pushes back date for key split in animal evolution», Michael Balter. ScienceMag, 09/03/2015. <http://www.sciencemag.org/news/2015/03/oldest-known-sponge-pushes-back-date-key-split-animal-evolution>.

21. «Hallan los fósiles más antiguos conocidos hasta ahora». Agencia SINC, 31/08/2016. <http://www.agenciasinc.es/Noticias/Hallan-los-fosiles-mas-antiguos-conocidos-hasta-ahora>.

22. «Earth's earliest atmospheres», Kevin Zahnle, Laura Schaefer, Bruce Fegley. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, octubre de 2010. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2944365/>.

23. «Primordial soup's on: scientists repeat evolution's most famous experiment» , Douglas Fox. *Scientific American*, 28/03/2007. <http://www.scientificamerican.com/article/primordial-soup-urey-miller-evolution-experiment-repeated/>.

24. «Origin of life: did a simple pump drive process?», Tia Ghose. LiveScience, 10/01/2013. <http://www.livescience.com/26173-hydrothermal-vent-life-origins.html>.

25. «Organic molecules on comets: Philae's first results from Churi prove surprising» , Science Daily. CNRS, 30/07/2015. <https://www.sciencedaily.com/releases/2015/07/150730172518.htm>.

26. «Periodic table of elements sorted by electrical conductivity», Environmental Chemistry, 22/02/2007. <http://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/electrical.html>.

27. «CPU gold content», Ozcopper. <http://www.ozcopper.com/computer-cpu-gold-yields/>.

28. «Microscopic view fo copper wire», Hyperphysics. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/ohmmic.html>.

29. «Wherefore gadolinium, magnetism of rare earths»,The IRM Quarterly, Vol. 10, n.º 3, otoño de 2000. <http://www.irm.umn.edu/quarterly/irmq10-3.pdf>.

30. *Quantum theory of magnetism*,Wolfgang Nolting, Anupuru Ramakanth. Springer Science & Business Media, pp. 85, 03/10/2009.

31. «Rods and cones», Hyperphysics. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/rodcone.html>.

32. «Scientists have developed a black so deep it makes 3D objects look flat», Tero Kuittinen. Yahoo! News, 15/07/2014. <https://ca.news.yahoo.com/scientists-developed-black-deep-makes-3d-objects-look-233004466.html>.

33. «Blacker than the original Vantablack!», Surrey NanoSystems. Youtube, 04/03/2016.

34. «Brilliant whiteness in ultrathin beetle scales», Pete Vukusic, Benny Hallam, Joe Noyes. *Science*, 19/01/2007. <http://science.sciencemag.org/content/315/5810/348.abstract>.

35. «How do mirrors reflect photons?», David Biello. *Scientific American*, 25/09/2006. <http://www.scientificamerican.com/article/how-do-mirrors-reflect-ph/>.

36. «Radio waves and the ionosphere», Ian Poole. The National Association of Amateur Radio, 1999. <http://www.arrl.org/files/file/Technology/pdf/119962.pdf>.

37. «How radiation affects cells», Radiation Effects Research Foundation (RERF), 2007. <http://www.rerf.jp/radefx/basickno_e/radcell.htm>.

38. «The radiation of heat from the human body. III. The human skin as a Black-body radiatior», James D. Hardy. *The Journal of Clinical Investigation*, 01/07/1934. <http://www.jci.org/articles/view/100609>.

39. «The nature of light», T. J. Keefe. Community College of Rhode Island, 2007. <https://web.archive.org/web/20120423123823/http://www.ccri.edu/physics/keefe/light.htm>.

40. «The great internet lightbulb book, Part I», Donald L. Klipstein Jr. 1996. <http://web.archive.org/web/20110604103439/http://freespace.virgin.net/tom.baldwin/bulbguide.html>.

41. «The color of life, Earth and extrasolar planets», Nancy Y. Kiang. Goddard Institute for Space Studies, NASA, abril de 2007. <http://www.giss.nasa.gov/research/briefs/kiang_01/>.

42. «Star classification (stellar classification)», Astrophysical.org, Istituto Scientia. <http://web.archive.org/web/20120203141836/http://www.astrophysical.org/starclassification.php>.

43. «MIT team achieves coldest temperature ever», MIT News. 11/09/2003. <http://news.mit.edu/2003/cooling>.

44. «LHC smashes highest man-made temperatura record», Ian O'Neill. Seeker, 21/08/2012. <http://www.seeker.com/lhc-smashes-highest-man-made-temperature-record-1765929082.html>.

45. «Hagedorn temperature», Wikipedia <en.wikipedia.org>. <https://en.wikipedia.org/wiki/Hagedorn_temperature>.

46. «Absolute Hot», Peter Tyson. PBS NOVA, 01/08/08. <http://www.pbs.org/wgbh/nova/physics/absolute-hot.html>.

47. «What are the highest and lowest temperatures on Earth?», NASA/Caltech. <http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/ask/63-What-are-the-highest-and-lowest-temperatures-on-Earth->.

48. «Barometric pressures at extreme altitudes on Mt. Everest: physiological significance». J. B. West, S. Lahiri, K. H. Maret, R. M. Peters Jr., C. J. Pizzo. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, mayo de 1983. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/6863078>.

49. «The viscosity of liquid iron at the physical conditions of the Earth's core», Gilles A. de Wijs, et al. Keele University, Technical University of Vienna <http://www.homepages.ucl.ac.uk/~ucfbdxa/pubblicazioni/nat.pdf>, Engineering Toolbox <http://www.engineeringtoolbox.com/dynamic-absolute-kinematic-viscosity-d_412.html>.

50. «Respuestas (XLVI): ¿Cuál es el planeta más grande conocido?, Jordi Pereyra. Ciencia de Sofá, 21/01/2016. <http://cienciadesofa.com/2016/01/respuestas-cual-es-el-planeta-mas-grande-conocido.html>.

51. «William Gilbert founder of terrestrial magnetism», H. H. Ricker III. <http://www.gsjournal.net/old/science/ricker6.pdf>.

52. «The origins of Gilbert's scientific method», Edgar Zilsel. Vol II, n.º 1. enero de 1941. La inclinación magnética fue descubierta independientemente por Georg Hartmann en 1544 de manera menos exacta y fue el motivo de una carta en la que informaba de ello al duque de Prusia (que no pareció hacerle mucho caso). <http://web.archive.org/web/20140714194058/http://philoscience.unibe.ch/documents/MaterialHS11/PSWissRev/Zilsel1941.pdf>.

53. «Core (main) magnetic field», Planetary Geodynicamics Laboratory. NASA/GSFC. <http://denali.gsfc.nasa.gov/terr_mag/core.html>.

54. «Bangui magnetic Anomaly», Wikipedia <en.wikipedia.org>. <https://en.wikipedia.org/wiki/Bangui_magnetic_anomaly>.

55. «Kursk magnetic anomaly», Wikipedia <en.wikipedia.org>. <https://en.wikipedia.org/wiki/Kursk_Magnetic_Anomaly>.

56. «Composition and temperature of Earth's core constrained by ab initio calculations and seismic data», D. Alfe, M. J. Gillan, G. D. Price. *Earth and Planetary Science Letters*, 195, pp. 91-98 (2002). <http://www.homepages.ucl.ac.uk/~ucfbdxa/pubblicazioni/epsl2002.pdf>.

57. «CME Week: the difference between flares and CMEs», Holly Zell. NASA (nasa.gov), última actualización 31/07/2015. <http://www.nasa.gov/content/goddard/the-difference-between-flares-and-cmes>.

58. «What if the biggest solar storm on record happened today?», Richard A. Lovett. National Geographic, 04/03/2011. <http://news.nationalgeographic.com/news/2011/03/110302-solar-flares-sun-storms-earth-danger-carrington-event-science/>.

59. «The Aurora Borealis», Baltimore American and Commercial Advertiser. 03/09/1859, p. 2, columna 2. Accedido a través de Google News <news.google.com>. <https://news.google.com/newspapers?nid=tCoNjB6AT50C&dat=18590903&printsec=frontpage&hl=en>.

60. «Solar storm risk to the north american grid», Lloyd's/Atmospheric and Environmental Research (AER). <http://www.lloyds.com/~/media/lloyds/reports/emerging%20risk%20reports/solar%20storm%20risk%20to%20the%20north%20american%20electric%20grid.pdf>.

61. «Modern marine science: exploring the deep», Lisa Yount, pp. 74-75. Infobase Publishing, 01/01/2006. Accedido a través de Google Books <books.google.com>.

62. «Reversals: magnetic flip», British Geological Survey. <http://www.geomag.bgs.ac.uk/education/reversals.html#2>.

63. «How Mars lost its magnetic field and became a cold, dry world», Eric Berger. ArsTechnica, 11/05/2015. <http://arstechnica.com/science/2015/11/how-mars-lost-its-atmosphere-and-became-a-cold-dry-world/>.

64. «How the sun stole Mars' atmosphere», Alan Duffy. Cosmos Magazine, 16/11/2016. <https://cosmosmagazine.com/space/how-sun-stole-mars-atmosphere>.

65. «Where did water flow on Mars?», Witold Fraczek. Esri Benchamarks. <http://www.esri.com/news/arcuser/0408/mars.html>.

66. «Earth's inner core is melting... And freezing», University of Leeds. Phys.org, 18/05/2001. <http://phys.org/news/2011-05-earth-core.html>.

67. «HD 209458 b», Wikipedia <en.wikipedia.org>.

68. «Evaporation rates of hot Jupiters and formation of chthonian planets», G. Hébrard, A. Lecavelier des Etangs, A. Vidal-Madjar, J.-M. Désert, Extrasolar Planets: today and tomorrow (2004). <http://articles.adsabs.harvard.edu//full/2004ASPC..321..203H/0000204.000.html >.

69. *Timaeus*, Platón. Traducido por Benjamin Jowett. <http://classics.mit.edu/Plato/timaeus.html>.

Tercera parte. Las fuerzas nucleares

1. «On the invisible rays emitted by phosphorescent bodies», Henri Becquerel. Comptes Rendus 122, 501 (1896). Traducido del francés por Carmen Giunta. <http://web.lemoyne.edu/~giunta/becquerel.html>.

2. «Rutherford`s discovery of alpha and beta radiation», Chemteam. <http://www.chemteam.info/Radioactivity/Disc-of-Alpha&Beta.html>.

3. «Marie Curie and the science of radioactivity», American Institute of Physics. Accedido el 08/10/2016. <https://www.aip.org/history/exhibits/curie/resbr2.htm>.

4. «The discovery of quarks», Michael Riordan, Stanford University/ SLAC, abril de 1992. <http://www-spires.slac.stanford.edu/cgi-wrap/getdoc/slac-pub-5724.pdf>.

5. «How big is a quark?», Jon Butterworth. *The Guardian Science Life and Physics*, 07/04/2016. <https://www.theguardian.com/science/life-and-physics/2016/apr/07/how-big-is-a-quark>.

6. «Spectrum of the radium emanation», E. Rutherford, T. Royds. Nature 78, pp. 220-21, 09/07/1908. <http://www.nature.com/nature/journal/v78/n2019/abs/078220c0.html>.

7. «The Radio-elements and the Periodic Law», Frederick Soddy. *Chemical News*, 107, pp. 97-99, 1913. <https://web.lemoyne.edu/giunta/soddycn.html>.

8. «Radioactive half-life», R. Nave. Hyperphysics. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nuclear/halfli2.html>.

9. *Nature's building blocks: an A-Z guide to the Elements*, John Emsley. Oxford University Press, pp. 423. (2001). Accedido a través de Google Books <books.google.com>.

10. «Uranium 2014: resources, production and demand», OECD Nuclear Energy Agency, International Atomic Energy Agency, pp. 27 (2014). <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2014/7209-uranium-2014.pdf>.

11. «Radium», Periodic Table of Elements. Los Alamos National Laboratory. <http://periodic.lanl.gov/88.shtml>.

12. «The 85th element of the Periodic Table», Pomona College, Chemistry Department.
<http://www.chemistry.pomona.edu/chemistry/periodic_table/Elements/Astatine/astatine.htm>.

13. «Radio-carbon tree dating calibration», Beta Analytic Radiocarbon Dating. Actualizado por última vez el 05/05/2016. <http://www.radiocarbon.com/tree-ring-calibration.htm>.

14. «Radiocarbon dating web», Tom Highman. University of Waikato, 1999. <http://www.c14dating.com/corr.html>.

15. «Confirmed: oldest fragment of early Earth is 4.4 billion years old», Becky Oskin. Livescience, 23/02/2014. <http://www.livescience.com/43584-earth-oldest-rock-jack-hills-zircon.html>.

16. «Isaac Newton's lost alchemy récipe rediscovered», Michael Greshko. National Geographic, 04/04/2016. <http://news.nationalgeographic.com/2016/04/160404-isaac-newton-alchemy-mercury-recipe-chemistry-science/>.

17. «Old Jewish book outlines how to turn copper into gold», Jewish News. 27/09/2015. <http://jewishnews.com/2015/09/27/old-jewish-book-outlines-how-to-turn-copper-into-gold#return-note-15456-9>.

18. «Fact or fiction? Lead can be turned into gold», John Matson. *Scientific American*, 21/01/2014. <http://www.scientificamerican.com/article/fact-or-fiction-lead-can-be-turned-into-gold/>.

19. «Americium smoke detectors», Eric Eason. Stanford University, 2011. <http://large.stanford.edu/courses/2011/ph241/eason1/>.

20. «Synthesis of the isotopes of elements 118 and 116in the 249Cf and 245Cm +48Ca fusion reactions», Yu. Ts. Oganessian, et al. Physical Review C 74, 044602, 09/10/2006.
<http://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.74.044602>.

21. «Superheavy element 114 confirmed: a stepping stone to the island of stability», Phys.org, 24/09/2009. <http://phys.org/news/2009-09-superheavy-element-stone-island-stability.html>.

22. «The chemistry of superheavy elements», Mattias Schädel, Dawn Shaughnessy. *Springer Science & Business Media*, pp. 223, 30/11/2013. Accedido a través de Google Books <books.google.com>.

23. «Chemical symbols of elements 110 and beyond», Darryl Francis. <http://digitalcommons.butler.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=5080&context=wordways>.

24. «Isotopes of astatine», Wikipedia <en.wikipedia.org>.

25. «Livermorium», Wikipedia <en.wikipedia.org>.

26. «Radioisotope Thermoelectric Generators», Rashid Alimov. Bellona, abril de 2005. <http://bellona.org/news/nuclear-issues/radioactive-waste-and-spent-nuclear-fuel/2005-04-radioisotope-thermoelectric-generators-2>.

27. «Alaska fire threatens Air Force nukes», World Information Service on Energy (WISE). 16/10/1992. <https://www.wiseinternational.org/node/701>.

28. «Plutonium powered pacemaker (1974)», Oak Ridge Associated Universities. Actualizado por última vez el 05/10/2011. <https://www.orau.org/ptp/collection/Miscellaneous/pacemaker.htm>.

29. «Nuclear pacemakers», David Prutchi (2005). <http://www.prutchi.com/pdf/implantable/nuclear_pacemakers.pdf>.

30. «Radioactive decay fuels Earth's inner fires», Charles Q. Choi. Livescience, 18/07/2011. <http://www.livescience.com/15084-radioactive-decay-increases-earths-heat.html>.

31. «Fission fragments», R. Nave. Hyperphysics. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/fisfrag.html>.

32. «Neutron Moderator», Wikipedia <en.wikipedia.com>. <https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_moderator>.

33. «Nuclear engineering handbook», Kenneth D. Kok. CRC Press, p. 27, 09/06/2009. Accedido a través de Google Books <books.google.com>.

34. «Uranium», Periodic Table (periodictable.com). <http://periodictable.com/Elements/092/index.html#sample3>.

35. «Radithor», Oak Ridge Associated Universities. Actualizado por última vez el 17/02/2009. <http://www.orau.org/ptp/collection/quackcures/radith.htm>.

36. «Undark and the Radium Girls», Alan Bellows. Damn Interesting, 28/12/2006. <https://www.damninteresting.com/undark-and-the-radium-girls/>.

37. «Radon and cancer», National Cancer Institute (NCI). Última revisión, 06/12/2011. <https://www.cancer.gov/about-cancer/causes-prevention/risk/substances/radon/radon-fact-sheet>.

38. «Background radiation & other sources of exposure», Miami University. <http://www.units.miamioh.edu/ehso/radiationtraining/backgroundradiation/index.htm>.

39. «Background radiation, background dose examples», Wikipedia <en.wikipedia.org>. <https://en.wikipedia.org/wiki/Background_radiation#Background_dose_rate_examples>.

40. «Radioactive iodine (radioiodine) therapy for thyroid cancer», American Cancer Society. Última revisión 15/04/2016. <http://www.cancer.org/cancer/thyroidcancer/detailedguide/thyroid-cancer-treating-radioactive-iodine>.

41. «About monoclonal antibodies», Cancer Research UK. <http://www.cancerresearchuk.org/about-cancer/cancers-in-general/treatment/biological/types/about-monoclonal-antibodies>.

42. «Pressure at the center of the sun», Glenn Elert. Hypertextbook. <http://hypertextbook.com/facts/1997/MarinaTreybick.shtml>.

43. «Will the sun ever burn out?», Space.com Staff. Space.com, 29/02/2012. <http://www.space.com/14732-sun-burns-star-death.html>.

Cuarta parte. Hacia una Teoría del Todo

1. «On the possible relation of gravity to elecricity», Michael Faraday. Phylosophical Transactions, vol. 141, pp. 1-6, 1851.

2. «5 trillion tons of ice lost since 2002», Phil Plait. Bad Astronomy, 03/09/2015. <http://www.slate.com/blogs/bad_astronomy/2015/09/03/ice_loss_greenland_and_antarctica_lost_5_trillion_tons_since_1992.html>.

3. «Einstein's quest for a unified theory», APS NEWS. American Physical Society. <https://www.aps.org/publications/apsnews/200512/history.cfm>.

4. «Note on the nature of cosmic-ray particles», Seth H. Neddermeyer, Carl D. Anderson. Physical Review, vol. 51, pp. 884-86, 15/05/1937. <http://authors.library.caltech.edu/8618/1/NEDpr37.pdf>.

5. «A short review about some exotic systems containing electrons, muons and tauons». Mohsen Emami-Razavi. Journal of Theoretical and Applied Physics, vol. 9, issue 1, pp. 1-6, marzo de 2015. <http://link.springer.com/article/10.1007/s40094-014-0154-4>.

6. «Neutrino cross section», R. Nave. Hyperphysics. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/particles/neutrino3.html>.

7. «High-energy physics», W. B. von Schlippe. Universidad Estatal de San Petersburgo, Facultad de Física. <http://www.phys.spbu.ru/content/File/Library/studentlectures/schlippe/cm07-12.pdf>.

8. «Carlo Rubbia and the discovery of the W and the Z», Gary Taubes. Physics World, enero de 2003. <https://coraifeartaigh.files.wordpress.com/2008/04/w-and-z-rubbia.pdf>.

9. «Can gravitons be detected?», Tony Rothman, Stephen Boughn. Princeton Unviersity, 04/02/2005. <https://arxiv.org/pdf/gr-qc/0601043v3.pdf>.

10. «A brief history of superstrings», John H. Schwarz. Caltech. <http://www.theory.caltech.edu/people/jhs/strings/str131.html>.

11. «Loop quantum gravity», Lee Smollin. Edge, 23/02/2003. <https://www.edge.org/conversation/lee_smolin-loop-quantum-gravity-lee-smolin>.

12. «Quantum Gravity and the Standard Model», Sundance O. BilsonThomson et al. Cornell University Library, revisado por última vez el 01/04/2007. <https://arxiv.org/pdf/hep-th/0603022v2.pdf>.

13. «The Higgs mechanism», Kien Nguyen. Universidad de Múnich, julio de 2009. <https://www.theorie.physik.uni-muenchen.de/lsfrey/teaching/archiv/sose_09/rng/higgs_mechanism.pdf>.

Las 4 fuerzas que rigen el universo
Jordi Pereyra

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 reproducir algún fragmento de esta obra.
Puede contactar con CEDRO a través de la web www.conlicencia.com o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47.

© del diseño de la portada, Planeta Arte & Diseño
© de la ilustración de la portada, Nattle – Shutterstock
© de las ilustraciones del interior, Álvaro Fernández Pereda

© Jordi Pereyra, 2017

© de todas las ediciones en castellano,
Espasa Libros, S. L. U., 2017
Paidós es un sello editorial de Espasa Libros, S. L. U.
Av. Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona (España)
www.planetadelibros.com

Primera edición en libro electrónico (epub): marzo de 2017

ISBN: 978-84-493-3327-9 (epub)

Conversión a libro electrónico: Newcomlab, S. L. L.
www.newcomlab.com