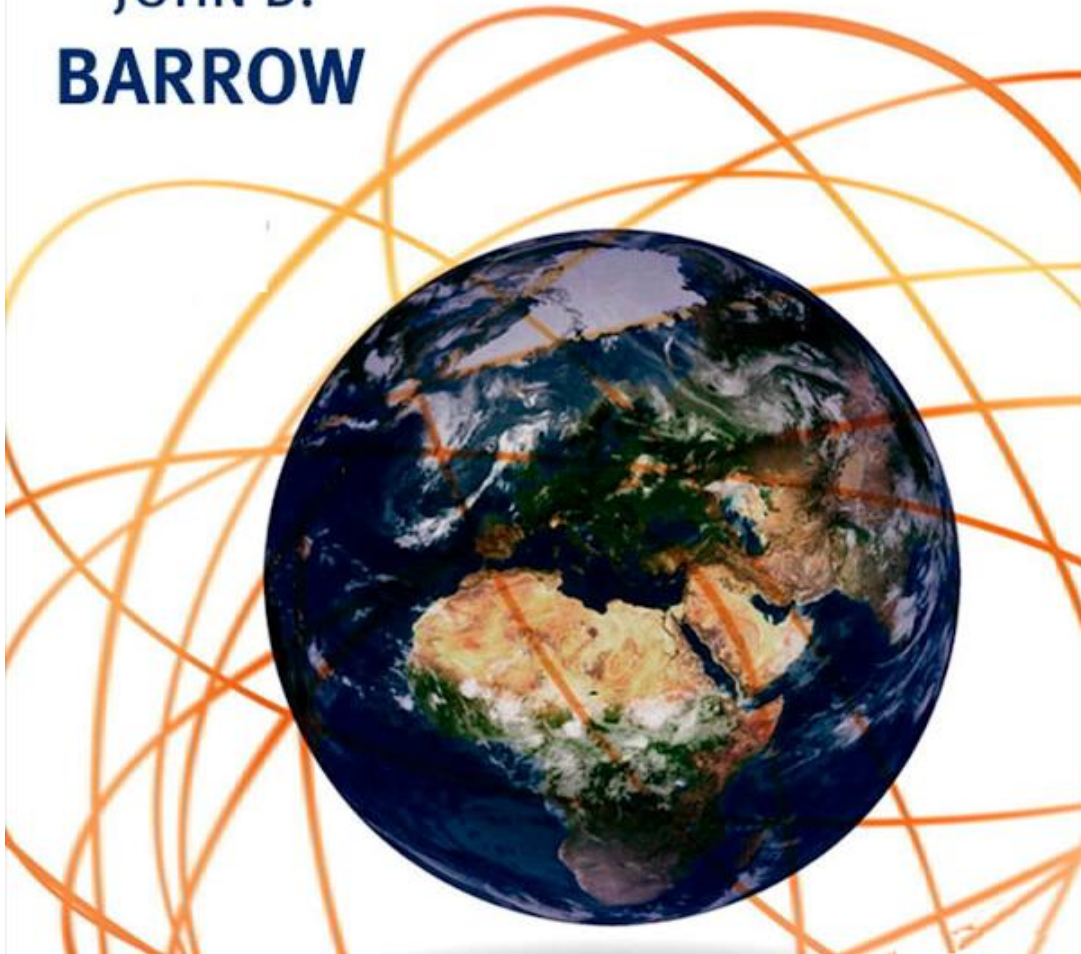


LAS CONSTANTES DE LA NATURALEZA

Los secretos más ocultos del Universo

**JOHN D.
BARROW**



Reseña

Los secretos más ocultos del Universo están codificados en unos valores numéricos, aparentemente eternos, a los que llamamos «constantes de la naturaleza».

John D. Barrow nos invita aquí a explorar esos principios y a someterlos a crítica: ¿son las constantes de la naturaleza realmente constantes? ¿Son las mismas en todas partes? ¿Podría haber evolucionado y persistido la vida si fueran ligeramente distintas?

Índice

[Prefacio](#)

1. [Antes del principio](#)
2. [Viaje hacia la realidad última](#)
3. [Patrones sobrehumanos](#)
4. [Más lejos, más profundo, más simple: la búsqueda de una Teoría de Todo](#)
5. [La sinfonía inacabada de Eddington](#)
6. [El misterio de los números muy grandes](#)
7. [La biología y las estrellas](#)
8. [El principio antrópico](#)
9. [Alterar las constantes y reescribir la historia](#)
10. [Nuevas dimensiones](#)
11. [Variaciones sobre un tema constante](#)
12. [Mirar al cielo](#)
13. [Otros mundos y grandes preguntas](#)

[Autor](#)

Para Carol

No es el poder de recordar, sino todo lo contrario, el poder de olvidar, la condición necesaria para nuestra existencia.

SHOLEM ASH

Prefacio

Hay cosas que no cambian nunca, y este libro trata de ellas. Hace tiempo, los sucesos que constituían historias eran las irregularidades de la experiencia: lo inesperado, lo catastrófico y lo ominoso. Poco a poco, los científicos llegaron a apreciar el misterio de la regularidad y predecibilidad del mundo. Pese a la concatenación de movimientos caóticamente impredecibles de átomos y moléculas, nuestra experiencia es la de un mundo que posee una profunda consistencia y continuidad. Nuestra búsqueda de la fuente de dicha consistencia atendía primero a las «leyes» de la Naturaleza que gobiernan cómo cambian las cosas. Pero poco a poco hemos identificado una colección de números misteriosos arraigados en la regularidad de la experiencia. Son las constantes de la Naturaleza. Dan al Universo su carácter distintivo y lo singularizan de otros que podríamos imaginar. Capturan de una vez nuestro máximo conocimiento y nuestra máxima ignorancia sobre el Universo. Pues, aunque las medimos con una precisión cada vez mayor y modelamos nuestros patrones

fundamentales de masa y tiempo alrededor de su invariancia, no podemos explicar sus valores. Nunca hemos explicado el valor numérico de ninguna de las constantes de la Naturaleza. Hemos descubierto otras nuevas, hemos relacionado las viejas y hemos entendido su papel crucial para hacer que las cosas sean como son, pero la razón de sus valores sigue siendo un secreto profundamente oculto. Para buscarla necesitaremos desentrañar la teoría más fundamental de las leyes de la Naturaleza: descubrir si las constantes que las definen están determinadas y conformadas por alguna consistencia lógica superior o si sigue habiendo un papel para el azar.

Nuestras primeras ojeadas revelan una situación muy peculiar. Mientras parece que ciertas constantes estuvieran fijadas, otras tienen espacio para ser distintas de las que son y algunas no parecen afectadas por ninguna otra cosa en el Universo. ¿Caen sus valores al azar? ¿Podrían ser realmente diferentes? ¿Cuán diferentes podrían ser si ha de poder existir vida en el Universo?

Ya en 1986, mi primer libro, The Anthropic Cosmological Principle, exploraba las diez maneras conocidas en que la vida en el Universo era sensible a los valores de las constantes de la Naturaleza. Universos con constantes ligeramente alteradas nacerían muertos, privados del potencial para desarrollar y sostener el tipo de complejidad organizada que llamamos vida. Desde entonces, los cosmólogos han encontrado cada vez más formas en que el Universo podría mostrar variaciones en sus constantes definitorias; cada vez más maneras en que la vida podría no haber llegado a existir en el

Universo. También han empezado a tomar en serio la posibilidad y realidad de otros universos en los que las constantes de la Naturaleza toman valores diferentes. ¿Inevitablemente nos encontramos en un mundo donde las cosas salieron bien? Pero ¿cuál era la probabilidad de que esto sucediera? Aquí consideraremos muchas de estas posibilidades, relacionándolas con la curiosa historia de nuestros intentos por entender los valores de nuestras constantes de la Naturaleza.

Recientemente, una gran historia sobre las constantes de la Naturaleza ha llamado la atención de la prensa y la investigación científica especializada. Plantea la pregunta más básica de todas: ¿son las constantes de la Naturaleza realmente constantes después de todo? Un grupo de investigadores ha ideado un nuevo método para examinar las constantes de la Naturaleza durante los últimos 11 000 millones de años de la historia del Universo. Considerando las pautas atómicas que son similares a códigos de barras en la luz que nos llega de cuásares lejanos, podemos mirar y ver cómo eran los átomos cuando la luz inició su viaje hace miles de millones de años. Así, ¿fueron siempre iguales las constantes de la Naturaleza? La respuesta, inesperada y escandalosa, plantea nuevas posibilidades para el Universo y las leyes que lo rigen. De ellas va a hablarle este libro.

Quisiera dar las gracias a Bernard Carr, Rob Crittenden, Paul Davies, Michael Drinkwater, Chris Churchill, Freeman Dyson, Vladimir Dzuba, Victor Flambaum, Yasunori Fujii, Gary Gibbons, J. Richard Gott, Jörg Hensgen, Janna Levin, João Magueijo, Carlos Martins,

David Mota, Michael Murphy, Jason Prochaska, Martin Rees, Håvard Sandvik, Wallace Sargent, Ilya Shlyakhter, Will Sulkin, Max Tegmark, Virginia Trimble, Neil Turok, John Webb y a Art Wolfe por sus discusiones y aportaciones de ideas, sus resultados y sus imágenes. También quisiera dar las gracias a Elizabeth, por superar la fase en que pensábamos que habría que cambiar el título por el de El río de la vida, y a nuestros tres hijos David, Roger y Louise, a quienes siempre preocupó que la paga semanal pudiera ser una constante de la Naturaleza.

Capítulo 1

Antes del principio

Lo que sucede primero no es necesariamente el principio.

HENNING MANKELL¹

§. Mismidad

No hay nada que Dios haya establecido como una causa constante de la Naturaleza, y que por lo tanto suceda todos los días; pero parecería un milagro, y provocaría nuestra admiración, si sólo sucediera una vez.

JOHN DONNE²

El cambio es un desafío. Vivimos en el período de mayor velocidad de movimiento de la historia humana. El mundo que nos rodea está impulsado por fuerzas que hacen nuestra vida cada vez más sensible a cambios pequeños y respuestas repentinas. El desarrollo de Internet y los tentáculos de la red mundial nos ponen inmediatamente en contacto con ordenadores y con sus propietarios

¹ H. Mankell, *Sidetracked*, Harvill Press, Londres, 2000, p. 270. [Hay traducción española: *La falsa pista*, Tusquets, Barcelona, 2001].

² John Donne, «Sermon, Easter Day 25th March, 1627», en *The Complete Poetry and Selected Prose of John Donne*, ed. C. M. Coffin, Modern Library, Nueva York, 1952, p. 536.

en cualquier parte del mundo. Los riesgos del progreso industrial desenfrenado han provocado daños ecológicos y cambios medioambientales que parecen estar sucediendo a más velocidad de lo que habían predicho incluso los profetas más agoreros del Juicio Final. Los niños parecen crecer antes. Los sistemas políticos cambian sus alineaciones por otras nuevas e inesperadas con más rapidez y más frecuencia que nunca antes. Incluso los seres humanos y la información que llevan incorporada se enfrentan a la intervención editorial que supone la ambiciosa cirugía de sustitución o la reprogramación de partes de nuestro código genético. Muchas formas de progreso se están acelerando y cada vez más fragmentos de nuestra experiencia se han entrelazado en el afán de explorar todo lo que sea posible.

En el mundo de la exploración científica, reconocer el impacto del cambio no es tan nuevo. Hacia finales del siglo XIX se había llegado a saber que hubo un tiempo en que la Tierra y nuestro sistema solar no existían; que la especie humana debía haber cambiado en apariencia y en el promedio de su capacidad mental a lo largo de enormes períodos de tiempo; y que en cierto sentido, amplio y general, el Universo debería estar degradándose, haciéndose un lugar menos hospitalario y ordenado. Durante el siglo XX hemos revestido de carne esta imagen esquelética de un Universo cambiante. El clima y la topografía de nuestro planeta varían continuamente, como las especies que viven en él. Y lo que es más espectacular, hemos descubierto que todo el Universo de estrellas y galaxias está en un estado de cambio dinámico, en el que grandes

cúmulos de galaxias se alejan unos de otros hacia un futuro que será diferente del presente. Hemos empezado a darnos cuenta de que vivimos en un tiempo prestado. Los sucesos astronómicos catastróficos son comunes; los mundos colisionan. El planeta Tierra ha sufrido en el pasado el impacto de cometas y asteroides. Un día se le acabará la suerte; el escudo que tan fortuitamente nos proporciona el enorme planeta Júpiter, que guarda los confines exteriores de nuestro sistema solar, no será capaz de salvarnos. Al final, incluso nuestro Sol morirá. Nuestra Vía Láctea será engullida por un enorme agujero negro central. La vida tal como la conocemos terminará. Los supervivientes tendrán que haber cambiado su forma, sus hogares y su Naturaleza en tal medida que nos costaría llamar «vida», según nuestros criterios actuales, a su existencia prolongada.

Hemos reconocido los secretos simples del caos y de la impredecibilidad que asedian tantas partes del mundo que nos rodea. Entendemos que nuestro clima es cambiante pero no podemos predecir los cambios. Hemos apreciado las similitudes entre complejidades como ésta y las que emergen de los sistemas de interacción humana —sociedades, economías, elecciones, ecosistemas— y del interior de la propia mente humana.

Todas estas sorprendentes complejidades tratan de convencernos de que el mundo es como una montaña rusa desbocada, rodando y dando bandazos; que todo lo que una vez se ha tenido por cierto podría ser derrocado algún día. Algunos incluso ven semejante

perspectiva como una razón para sospechar de la ciencia³, como si produjera un efecto corrosivo sobre los fundamentos de la Naturaleza humana y de la certeza, como si la construcción del Universo físico y el vasto esquema de sus leyes debiera haberse establecido pensando en nuestra fragilidad psicológica.

Pero hay un sentido en el que todo este cambio e impredecibilidad es una ilusión. No constituye toda la historia sobre la Naturaleza del Universo. Hay tanto un lado conservador como un lado progresista en la estructura profunda de la realidad. A pesar del cambio incesante y la dinámica del mundo visible, existen aspectos de la fábrica del Universo misteriosos en su inquebrantable *constancia*. Son estas misteriosas cosas invariables las que hacen de nuestro Universo el que es y lo distinguen de otros mundos que pudiéramos imaginar. Hay un hilo dorado que teje una continuidad a través de la Naturaleza. Nos lleva a esperar que ciertas cosas sean iguales en otros lugares del espacio además de la Tierra; que fueron y serán las mismas en otros tiempos además de hoy; que para algunos casos, ni la historia ni la geografía importan. De hecho, quizá sin un substrato semejante de realidades invariables no podría haber corrientes superficiales de cambio ni ninguna complejidad de mente y materia.

Estos ingredientes fundamentales de nuestro Universo son el objeto de este libro. Su entidad es uno de los últimos misterios de la

³ B. Appleyard, [*Understanding the Present: Science and the Soul of Modern Man*](#), Doubleday, Londres, 1992 y V. Havel, Philadelphia Liberty Medal Address, 4 de julio de 1994. . Havel parece equiparar ciencia con tecnología y por ello la hace responsable de todas las cosas indeseables que la tecnología hizo con las personas y el medio ambiente en los estados comunistas de la Europa del Este.

ciencia que ha desafiado a una serie de grandes físicos a dar con una explicación de por qué son como son. Nuestra búsqueda trata de descubrir cuáles son, aunque llevamos ya tiempo y solamente sabemos cómo llamarlos. Son las *constantes de la Naturaleza*. Esto es lo que explica el fenómeno de identidad en el Universo: por qué cada electrón parece ser el mismo que cualquier otro.

Las constantes de la Naturaleza codifican los secretos más profundos del Universo. Expresan a la vez nuestro máximo conocimiento y nuestra máxima ignorancia sobre el cosmos. Su existencia nos ha enseñado la verdad profunda de que en la Naturaleza abundan las regularidades invisibles. Pese a todo ello aunque hemos alcanzado cierta destreza en la medición de valores de estas magnitudes constantes, nuestra incapacidad para explicar o predecir sus valores demuestra cuánto tenemos que aprender aún sobre el funcionamiento interno del Universo.

¿Cuál es el estatus último de las constantes de la Naturaleza? ¿Son realmente constantes? ¿Son las mismas en todas partes? ¿Están todas ellas ligadas? ¿Podría haber evolucionado y persistido la vida si fueran ligeramente diferentes? Éstas son algunas de las cuestiones que tratará de resolver este libro. Recordaremos los descubrimientos de las primeras constantes de la Naturaleza y el impacto que tuvieron sobre los científicos y teólogos que buscaban la mente, el propósito y el diseño en la Naturaleza. Mostrará cuáles cree ahora la vanguardia de la ciencia que son las constantes de la Naturaleza, y la posibilidad de que una futura Teoría de Todo, si existe, revele algún día el verdadero secreto de las constantes de la

Naturaleza. Y lo más importante de todo, se preguntará si son realmente constantes.

Capítulo 2

Viaje hacia la realidad última

Franklin: ¿Ha pensado usted alguna vez, director, que sus patrones quizá podrían estar un poco anticuados?

Director: Por supuesto que están anticuados. Los patrones siempre están anticuados. Eso es lo que los hace patrones.

*ALAN BENNETT*⁴

§. Misión a Marte

La comisión de investigación del percance de la Mars Climate Orbiter ha determinado que la causa de la pérdida de la nave espacial Mars Climate Orbiter fue el fallo en la utilización de unidades métrica.

*Informe de la investigación del percance de la Mars Climate Orbiter de la NASA*⁵

⁴ Alan Bennett, *Forty Years On*, Faber, Londres, 1969.

⁵ Mars Climate Orbiter Mishap Investigation Board Phase I Report, 10 de noviembre de 1999, disponible on line en ftp://ftp.hq.nasa.gov/pub/pao/reports/1999ZMCO_report.pdf. La cita es de la página 6 del resumen ejecutivo.

Durante la última semana de septiembre de 1998, la NASA se estaba preparando para sacudir a las agencias de prensa con una gran historia. La Mars Climate Orbiter, diseñada para estudiar la atmósfera superior de Marte, estaba a punto de enviar datos importantes sobre la atmósfera y el clima marcianos. En lugar de ello, simplemente se estrelló contra la superficie marciana. En palabras de la NASA:

La nave espacial MCO, diseñada para estudiar el clima de Marte, fue lanzada por un cohete Delta el 11 de diciembre de 1998, desde la estación de Cabo Cañaveral en Florida. Tras un viaje a Marte de aproximadamente nueve meses y medio, la nave encendió su motor principal para entrar en órbita alrededor de Marte hacia las 2 a.m. PDT del 23 de septiembre de 1999. Cinco minutos después del previsto encendido de 16 minutos, la nave espacial se ocultó tras el planeta tal como se ve desde la Tierra. La recuperación de la señal, que nominalmente se esperaba alrededor de las 2:26 a.m. PDT, no se produjo. Los intentos de encontrar y establecer comunicación con la MCO continuaron hasta las 3 p.m. PDT del 24 de septiembre de 1999, momento en que fueron abandonados⁶.

La distancia entre la nave espacial y la superficie marciana era 96,6 kilómetros inferior de lo que pensaban los controladores de la misión, y 125 millones de dólares desaparecieron en el rojo polvo

⁶ Mars Climate Orbiter Mishap Investigation Board Phase I Report, Apéndice, p. 37.

marciano. La pérdida ya era suficientemente desastrosa, pero aún hubo que morder más polvo cuando se descubrió la causa. Lockheed-Martin, la compañía que controlaba el funcionamiento diario de la nave espacial, estaba enviando datos al control de la misión en unidades imperiales —millas, pies y libras de fuerza—, mientras que el equipo de navegación de la NASA estaba suponiendo, como el resto del mundo científico internacional, que recibían las instrucciones en unidades métricas. La diferencia entre millas y kilómetros fue suficiente para desviar la nave esas 60 millas el curso previsto y llevarla a una órbita suicida hacia la superficie marciana⁷.

La lección de esta catástrofe es clara. Las unidades importan. Nuestros predecesores nos han legado incontables unidades de medida de uso cotidiano que tendemos a utilizar en situaciones diferentes por razones de conveniencia. Compramos huevos por docenas, pujamos en las subastas en guineas, medimos las carreras de caballos en estadios, las profundidades oceánicas en brazas, el trigo en fanegas, el petróleo en barriles, las vidas en años y el peso de las piedras preciosas en quilates. Las explicaciones de todos los patrones de medida existentes en el pasado y en el presente llenan cientos de páginas. Todo esto era plenamente satisfactorio mientras el comercio era local y sencillo. Pero cuando se inició el comercio internacional en tiempos antiguos, se empezaron a encontrar otras maneras de contar. Las cantidades se medían de forma diferente de

⁷ El presidente del Comité de la Cámara de la Ciencia, F. James Sensenbrenner, Jr., emitió un comunicado de prensa de tres palabras después de oír la noticia: «Estoy sin habla».

un país a otro y se necesitaban factores de conversión, igual que hoy cambiamos la moneda cuando viajamos al extranjero. Esto cobró mayor importancia una vez que se inició la colaboración internacional en proyectos técnicos⁸. La ingeniería de precisión requiere una intercomparación de patrones exacta. Está muy bien decir a tus colaboradores en el otro lado del mundo que tienen que fabricar un componente de un avión que sea exactamente de un metro de longitud, pero ¿cómo sabes que su metro es el mismo que el tuyo?

§. Medida por medida: patrones locales

Ella no entiende los números romanos. Ella pensaba que luchábamos en la Undécima Guerra Mundial.
JOAN RIVERS⁹

En origen, los patrones de medida eran completamente locales y antropométricos. Las longitudes se derivaban de la longitud del brazo del rey o la palma de su mano. Las distancias reflejaban el recorrido de un día de viaje. El tiempo seguía las variaciones astronómicas de la Tierra y la Luna. Los pesos eran cantidades convenientes que podían llevarse en la mano o a la espalda. Muchas de estas medidas fueron sabiamente escogidas y aún siguen con

⁸ Un ejemplo interesante lo ofrece la creación de la red de ferrocarriles en Gran Bretaña. Exigía poner de acuerdo los patrones de tiempo de ciudades lejanas.

⁹ J. Rivers, *An Audience with Joan Rivers*, London Weekend Television broadcast (1984).

nosotros hoy a pesar de la ubicuidad oficial del sistema decimal. Ninguna es sacrosanta. Cada una está diseñada por conveniencia en circunstancias concretas. Muchas medidas de distancia se derivaban antropomórficamente de las dimensiones de la anatomía humana. El «pie» es la unidad más obvia dentro de esta categoría. Otras ya no resultan tan familiares. La «yarda» era la longitud de una cinta tendida desde la punta de la nariz de un hombre a la punta del dedo más lejano de su brazo cuando se extendía horizontalmente hacia un lado. El «codo» era la distancia del codo de un hombre a la punta del dedo más lejano de su mano estirada, y varía entre los 44 y los 64 cm (unas 17 y 25 pulgadas) en las diferentes culturas antiguas que lo utilizaban¹⁰. La unidad náutica de longitud, la «braza», era la mayor unidad de distancia definida a partir de la anatomía humana, y se definía como la máxima distancia entre las puntas de los dedos de un hombre con los brazos abiertos en cruz.

El movimiento de mercaderes y comerciantes por la región mediterránea en tiempos antiguos habría puesto de manifiesto las diferentes medidas de una misma distancia anatómica. Esto habría hecho difícil mantener cualquier conjunto único de unidades. Pero la tradición y los hábitos nacionales eran una poderosa fuerza que se resistía a la adopción de patrones extranjeros.

El problema más evidente con tales unidades es la existencia de hombres y mujeres de diferentes tamaños. ¿A quién se mide como patrón? El rey o la reina son el candidato obvio. Aun así, esto da

¹⁰ A. E. Berriman, *Historical metrology*, Dent, Londres, 1953.

lugar a una recalibración de unidades cada vez que el trono cambia de manos. Una notable respuesta al problema de la variación en las dimensiones humanas fue la que ideó David I de Escocia en 1150 para definir la pulgada escocesa. Ordenó que fuera el promedio de la anchura de la base del dedo pulgar de tres hombres: un hombre «mekill» (grande), un hombre de estatura «messurabel» (moderada) y un hombre «lytell» (pequeño).

El sistema métrico moderno, de centímetros, kilogramos y litros, y el sistema tradicional «Imperial» británico de pulgadas, libras y pintas son medidas igualmente buenas de longitudes, pesos y volúmenes mientras puedan determinarse con precisión. No obstante, esto no es lo mismo que decir que son igualmente convenientes. El sistema métrico refleja nuestro sistema de recuento, haciendo cada unidad diez veces mayor que la que le precede en tamaño. Imaginemos que tuviéramos un sistema de recuento con saltos desiguales. Así, en lugar de centenas, decenas y unidades, tendríamos un sistema de recuento como el que se utilizaba en Inglaterra para pesos no-técnicos (como los pesos del cuerpo humano o los *handicaps* en las carreras de caballos) con 16 onzas en una libra y 14 libras en una piedra¹¹.

La depuración de los patrones de medida empezó de forma decisiva en la época de la Revolución Francesa, a finales del siglo XVIII. La introducción de nuevos pesos y medidas conlleva una cierta convulsión en la sociedad y raramente es recibida con entusiasmo por el pueblo. Por ello la Revolución Francesa ofrecía una

¹¹ Piedra (*stone*) = unidad de peso equivalente a 6,348 kg. (*N. del t.*)

oportunidad para llevar a cabo una innovación semejante sin añadir nada significativo a la agitación general en todo lo demás¹². La tendencia dominante del pensamiento político de la época se alineaba con la idea de que los pesos y medidas deberían tener un patrón igualitario que no los convirtiera en propiedad de ninguna nación, ni le diese a ninguna, ventajas a la hora de comerciar con otras. Se creyó que la manera de hacerlo era definir la medida frente a un patrón acordado, a partir del cual se calibrarían todas las reglas y medidas secundarias. La Asamblea Nacional francesa promulgó esto en forma de ley el 26 de marzo de 1791, con el apoyo de Luis XVI y la clara declaración de principios presentada por Charles Maurice de Talleyrand:

En vista de que para poder introducir uniformidad en pesos y medidas es necesario que se establezca una unidad de masa natural e invariable, y que el único medio de extender esta uniformidad a otras naciones y exhortarles a acordar un sistema de medidas es escoger una unidad que no sea arbitraria y no contenga nada específico de ningún pueblo sobre el globo¹³.

¹² Hubo un extraño intento de decimalizar el tiempo además de las unidades de masa y longitud. Un decreto oficial de 24 de noviembre de 1793 introducía el nuevo «calendario revolucionario» que dividía los meses en tres ciclos de diez días llamados *décadas*. Esto dejaba el año con cinco días especiales «de más» (seis en años bisiestos), a añadir tras el último mes del verano. El sistema era similar al utilizado por los antiguos egipcios y tenía la finalidad añadida de abolir la observancia religiosa de los tradicionales días santos de la semana. La innovación fracasó miserablemente y la semana de siete días fue instaurada por Napoleón en septiembre de 1805. Para una exposición más detallada ver J. D. Barrow, *The Artful Universe*, Oxford University Press, Londres, 1995, p. 159.

¹³ M. Gläser, *100 Jahre Kilogrammprototyp*, Braunschweig, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 1989.

Dos años más tarde se introdujo el «metro¹⁴» como patrón de longitud, definido como la diezmillonésima parte de un cuadrante de meridiano terrestre¹⁵. Aunque ésta es una forma plausible de identificar un patrón de longitud, es evidente que no resulta muy práctica a efectos de comparación cotidiana. Consecuentemente, en 1795 las unidades fueron referidas directamente a objetos hechos de forma especial. Al principio, como unidad de masa se tomó el gramo, definido como la masa de un centímetro cúbico de agua a cero grados centígrados. Más tarde fue sustituido por el kilogramo (mil gramos), definido como la masa de mil centímetros cúbicos de agua a cuatro grados centígrados. Finalmente, en 1799 se construyó una barra de metro prototipo¹⁶ junto con una masa kilogramo patrón, que fueron depositadas en los archivos de la nueva República Francesa. Incluso hoy, la masa kilogramo de referencia se conoce como el «Kilogramme des Archives».

Desgraciadamente, al principio las nuevas unidades métricas no tuvieron éxito y Napoleón reintrodujo los viejos patrones en los primeros años del siglo XIX. La situación política europea impedía una armonización internacional de patrones¹⁷. Hubo que esperar hasta el Año Nuevo de 1840 para que Luis Felipe hiciera las unidades métricas legalmente obligatorias en Francia. Mientras

¹⁴ Llamada así a partir del griego *métron* que significa una medida.

¹⁵ Originalmente, Talleyrand había propuesto una unidad natural de longitud basada en la longitud de un péndulo que oscilara con un período de un segundo a una latitud de 45 grados en la superficie de la Tierra.

¹⁶ Tenía una sección transversal rectangular de 25,3 mm × 4 mm y estaba hecho de platino; ver T. McGreevy, *The Basis of Measurement*, vol. I, Picton Publishing, Chippenham, 1995, pp. 148-149.

¹⁷ La Roy al Society de Londres no respondió a una invitación para reunirse con la Academia Francesa de Ciencias para acordar un sistema internacional.

tanto ya habían sido adoptadas de forma más universal en Holanda, Bélgica y Luxemburgo veinticuatro años antes, y por Grecia en 1832. Gran Bretaña sólo permitió un uso bastante restringido a partir de 1864, y Estados Unidos la siguió dos años más tarde. No hubo un progreso real hasta el 8 de agosto de 1870, cuando se creó y reunió por primera vez en París la Comisión Internacional del Metro, con el fin de coordinar los patrones y supervisar la construcción de nuevas masas y longitudes patrón¹⁸. Copias de los patrones, elegidas por sorteo, se distribuyeron a algunos de los estados miembros. El kilogramo era la masa de un cilindro especial, de 39 milímetros de altura y de diámetro, hecho de una aleación de platino e iridio¹⁹, protegido bajo tres campanas de cristal y guardado en una cámara de la Oficina Internacional de Patrones en Sèvres, cerca de París. Su definición es simple²⁰:

El kilogramo es la unidad de masa; es igual a la masa del prototipo internacional del kilogramo.

Las unidades imperiales británicas, como la yarda y la libra, se definieron de forma análoga y se guardaron prototipos patrón en el Laboratorio Nacional de Física, en Inglaterra, y en la Oficina Nacional de Patrones, en Washington DC.

¹⁸ Fue fabricado por Johnson, Matthey & Co. en Londres en 1879 junto con dos copias.

¹⁹ Por supuesto, está la cuestión de con qué precisión se conoce realmente la masa patrón. Se ha determinado que la masa del prototipo es igual a un kilogramo con una incertidumbre de medida de 0,135 miligramos. El patrón británico tiene una precisión de 0,053 miligramos y el americano de 0,0021 miligramos.

²⁰ M. Kochsieck y M. Gläser, eds. *Comprehensive Mass Metrology*, Wiley-VCH, Berlin, 2000, p. 64.

Esta tendencia hacia la estandarización vio el establecimiento de unidades científicas de medida.

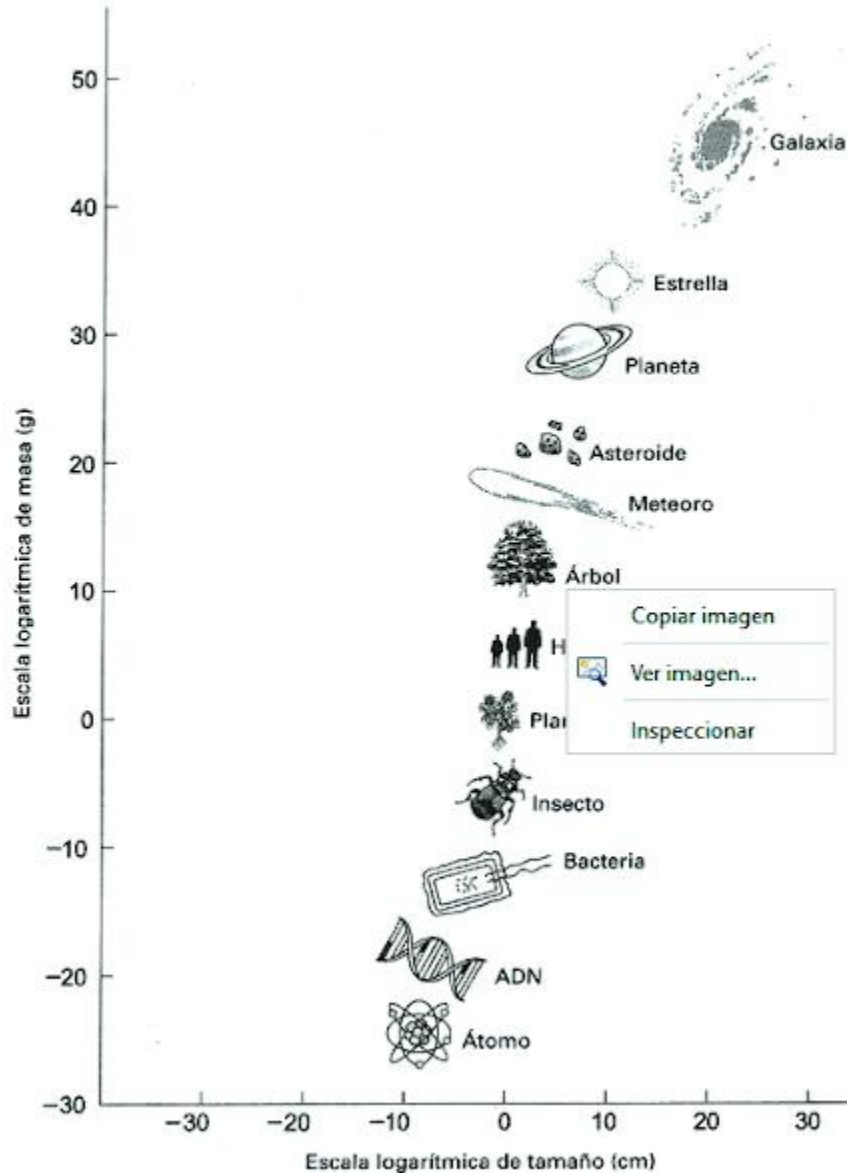


Figura 2.1. Registros de masa y tamaño de algunos elementos importantes del Universo. Nuestra elección de centímetros y gramos como unidades nos coloca próximos al centro de las cosas.

Como resultado medimos habitualmente las longitudes, masas y tiempos en múltiplos de metros, kilogramos y segundos. Cada unidad da una cantidad familiar fácil de imaginar: un metro de tela, un kilogramo de patatas. Esta conveniencia de tamaño testimonia inmediatamente su pedigrí antropocéntrico.

Pero su desventaja también se hace patente cuando empezamos a utilizar dichas unidades para describir cantidades que corresponden a una escala superior o inferior a la humana. Los átomos más pequeños son diez mil millones de veces más pequeños que un metro. El Sol tiene una masa de más de 10^{30} kilogramos. En la figura 2.1 se muestra el conjunto de tamaños y masas de objetos importantes en el Universo, con nosotros incluidos para gozar de perspectiva. Nos situamos entre las enormes distancias astronómicas y la escala subatómica de las partículas de materia más elementales.

A pesar de la introducción de patrones métricos universales por comisiones internacionales y ministros de los gobiernos, el trabajador ordinario tuvo poca noticia de los decretos sobre unidades, especialmente en Gran Bretaña, donde había una enorme multiplicidad de unidades especiales en cada rama de la industria y el comercio. A mediados del siglo XIX, la Revolución Industrial había creado diversas subculturas de ingenieros y cerveceros, contables y metalúrgicos, relojeros y marinos, todos los cuales necesitaban formas de medir los materiales que gestionaban y manipulaban. El resultado fue una explosión de unidades de medida. Cada tipo de material empezó a tener su propio patrón de intensidad y tolerancia,

cantidad y peso. Estas unidades no sólo eran antropocéntricas, sino que también resultaron profesión-céntricas. A los cerveceros les gustaba una elección de medida de volumen, a los ingenieros hidráulicos otra; los joyeros medían el peso de forma diferente de los marinos y de los arquitectos.

<p>Avoirdupois Weight. 16 Drams ... 437½ grains... 1 oz. 16 Ounces ... 7,000 " ... 1 lb. 14 Pounds ... " ... 1 stone 28 Pounds or 2 Stones 1 qr. of cwt. 4 Quarters or 8 Stones or 112 lbs. 1 cwt. 20 Hundred-weights or 2,240 lbs. 1 ton.</p> <hr/> <p>Long Measure. 12 Inches (in.) ... 1 ft. 3 Feet or 36 inches ... 1 yd. 5½ Yards 1 rod, perch or pole. 22 Yards or 4 poles 1 chain. 40 Poles or 10 Chains or 220 yds. 1 fur. 8 Furlongs or 80 Chains or 1,760 yds. 1 mile. 3 Miles ... 1 league (lea.) 7-92 inches ... 1 link. 100 links ... 22 yds. 1 chain. Fathom is 6 ft. or 2 yds.</p> <hr/> <p>Square Measure. 144 Sq. Inches (12×12) 1 sq. ft. 9 Sq. Ft. (3×3) 1 sq. yd. 30½ Sq. Yards (5½×5½) 1 sq. pole. 40 Poles or 1,210 sq. yds. 1 rood. 4 Roods or 4,840 sq. yds. 1 acre.</p>	<p>Square Measure—continued. 640 Acres or 6,400 sq. chs. 1 sq. mile. 10,000 Sq. Links, 484 sq. yds. 1 sq. chain. 10 Sq. Chains, 10,000 sq. links 1 acre.</p> <hr/> <p>Measure of Capacity. <i>For Liquids, Fruit and Grain.</i> 4 Gills ... 1 Pint pt. 2 Pints ... 1 Quart qt. 4 Quarts or 8 pts. 1 Gallon gal. 2 Gallons ... 1 Peck pk. 4 Pecks ... 1 Bushel bush. 8 Bushels ... 1 Quarter qr.</p> <hr/> <p>Miscellaneous. 2 Articles make 1 Brace or Couple. 12 Articles ... make 1 Dozen. 12 Dozen ... " 1 Gross. 20 Articles ... " 1 Score. 24 Sheets of Paper .. 1 Quire. 120 " " " 5 Quires. 20 Quires " " 1 Ream. 1 Gal. = .1604 cub. ft. = 277.27 cub. in. 1 Gal. water at 62° F., weighs 10 lbs. 1 Cub. ft. water = 62.3 lbs. or 6.23 gals. Knot, a nautical mile, 2,025 yds.</p>
---	---

Figura 2.2. Un conjunto típico de pesos y medidas diversos tomado de un libro inglés de autoayuda de mediados del siglo XX²¹.

²¹ *Things you ought to know!*, Stoney Evans & Co., Rawdon, p. 9 (sin fecha).

Cuando yo era niño, había un tipo de cuadernos de ejercicios rayados que se utilizaban para tomar notas en la escuela. Siempre tenían cubiertas rojas o azules y en la contraportada había una lista de todas las peculiares medidas imperiales de longitud, área, capacidad y peso (ver figura 2.2).

Para el ingeniero y el hombre de negocios práctico esto era conveniente, útil y sin duda muy provechoso. Pero para alguien que buscara una filosofía natural e integrada, hacía que el conocimiento humano pareciera fragmentado y caprichoso. Un visitante de otro planeta estaría desconcertado ante la necesidad de diferentes medidas de peso al comprar oro, manzanas o lacre.

§. El mantenimiento de patrones universales

*Érase un hombre torcido que
construyó una casa torcida.*

Canción infantil

En la segunda mitad del siglo XIX, ingenieros, industriales y científicos se veían abrumados por la profusión de unidades y medidas *ad hoc*. La Revolución Industrial había acelerado el desarrollo de todas las industrias imaginables. Manufacturar, fabricar, medir, diseñar, construir: estos eran los signos de la época y generaban más y más unidades.

Dentro de los salones de la ciencia, que existieran longitudes y masas patrón tampoco era enteramente satisfactorio para los puristas. Cada vez que las masas patrón fueran transportadas, su

masa sufriría un ligero cambio. Variaría levemente a medida que los átomos se evaporasen de sus superficies o se depositara en ellas el polvo atmosférico. No eran realmente constantes²². Tampoco eran universales. Supongamos que se hubiera recibido una señal de un ingeniero de otro planeta preguntándonos qué tamaño teníamos. De nada serviría enviar una respuesta en metros o kilogramos y luego responder a la inevitable réplica, «¿qué son esas cosas?», diciendo a nuestro corresponsal extraterrestre que eran objetos conservados en recipientes de cristal en París. Desgraciadamente la búsqueda de patrones universales creó ejemplos que no eran ni patrones ni universales.

Dentro de la ciencia, la fuerza impulsora para la racionalización venía del estudio de la electricidad y el magnetismo. Diferentes grupos de científicos utilizaban diferentes sistemas de unidades que guardaban relaciones distintas con las tradicionales unidades métricas para masa, longitud, tiempo y temperatura. La primera respuesta general a estos problemas vino de lord Rayleigh y James Clerk Maxwell. En su alocución presidencial ante la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia en 1870, Maxwell defendió la introducción de patrones que no estuvieran ligados a objetos especiales, como metros²³ o kilogramos patrón mantenidos en

²² En 1800 la industria no habría necesitado que las longitudes estuviesen determinadas con una precisión mayor que aproximadamente 0,25 milímetros; hacia 1900 el requisito se había endurecido hasta aproximadamente 0,01 milímetros; hacia 1950 hasta 0,25 micras; hacia 1970 hasta 12 nanómetros. Hoy, las nanotecnologías están manipulando la estructura de átomos individuales.

²³ Nótese que varios científicos del siglo XIX, por ejemplo lord Kelvin, utilizaban el término «sistema métrico» para describir cualquier sistema de pesos y medidas porque el griego *métron*

condiciones especiales, pues patrones como estos nunca pueden ser realmente constantes. La masa patrón en París ganará y perderá moléculas continuamente. Las medidas de tiempo que están definidas, como el día, por la rotación de la Tierra, o como el año, por su órbita alrededor del Sol, tampoco pueden ser constantes. A medida que se frena la rotación de la Tierra y cambia nuestra órbita alrededor del Sol, estos patrones también varían lentamente. Pueden definirse en términos extrahumanos, pero no son candidatos para los patrones definitivos. Maxwell había pasado bastante tiempo estudiando el comportamiento de las moléculas en gases y estaba muy impresionado por el hecho de que cada molécula de hidrógeno era igual que todas las demás. Esto era muy diferente de trabajar con objetos grandes y cotidianos que son diferentes unos de otros. Maxwell vio una oportunidad para utilizar la similitud de las moléculas en la definición de patrones de forma absoluta:

Pero, después de todo, las dimensiones de nuestra Tierra y su tiempo de rotación, aunque son muy permanentes con relación a nuestros medios comparativos actuales, no lo son por ninguna necesidad física. La Tierra podría contraerse por enfriamiento, o podría aumentar por una capa de meteoritos que cayera en ella, o su velocidad de revolución podría frenarse lentamente, y pese a todo continuaría siendo un planeta igual que antes.

significaba simplemente medida. Ellos utilizaban el término «sistema decimal» para lo que ahora llamaríamos el sistema métrico basado en el metro como unidad de longitud.

Pero una molécula de hidrógeno, por ejemplo, dejaría de serlo si su masa o su período de vibración se alterasen en lo más mínimo.

Por lo tanto, si deseamos obtener patrones de longitud, tiempo y masa que sean absolutamente permanentes, debemos buscarlos no en las dimensiones, el movimiento, o la masa de nuestro planeta, sino en la longitud de onda, el período de vibración y la masa absoluta de estas moléculas [es decir, átomos] imperecederas e inalterables y perfectamente similares²⁴.

Maxwell estaba especialmente interesado en las moléculas por muchas razones filosóficas. Reconocía la importancia de que existieran conjuntos de bloques constituyentes idénticos para todos los cuerpos materiales que vemos a nuestro alrededor. Si tomamos cualquier trozo de hierro puro, estará compuesto por una colección de moléculas de hierro idénticas. El hecho de que estas moléculas parezcan ser idénticas es una notable característica del mundo. Maxwell contrastaba esta invariancia con la variabilidad y evolución de las cosas vivas predicha por la teoría de la evolución por selección natural de Charles Darwin. Maxwell señalaba las moléculas de la Naturaleza como entidades que no estaban sujetas a selección, adaptación o mutación. Su reto consistía en encontrar una forma de explotar esta inmutabilidad y universalidad en la

²⁴ J. C. Maxwell, Presidential Address to the British Association for the Advancement of Science, 1870, citado en B. Petley, *The Fundamental Physical Constants and the Frontier of Measurement*, Adam Hilger, Bristol, 1985, p. 15. Es evidente que Maxwell utilizaba aquí «molécula» donde ahora utilizamos el término «átomo».

definición de nuestras unidades de medida. De esta manera seríamos capaces de evitar el sesgo introducido por los imperativos de la conveniencia humana y avanzar hacia las profundas invariancias de la realidad física.

En 1905 se utilizó por primera vez la luz roja emitida por átomos de cadmio calientes²⁵ como un patrón frente al que definir una unidad de longitud llamada Ångstrom (que se escribe 1\AA y es igual a 10^{-10} metros). Una longitud de onda de la luz del cadmio era igual a $6438,4696\text{\AA}$. Éste fue un paso clave porque por primera vez se definía un patrón de longitud en términos de una característica de la Naturaleza universalmente constante. La longitud de onda de la luz emitida por el cadmio²⁶ está determinada exclusivamente por las constantes de la Naturaleza. Si quisiéramos informar de nuestro tamaño a un físico extraterrestre, podríamos hacerlo diciendo que somos 28 000 millones de longitudes de onda de la luz roja del cadmio²⁷.

§. ¡Una idea brillante!

¿De dónde vino la materia?

¿Cuál es la diferencia?... El secreto del Universo es la apatía.

²⁵ Parece que la sugerencia de utilizar la longitud de onda de la luz de transiciones atómicas específicas para definir la longitud fue hecha por primera vez en 1827 por un científico francés, J. Babinet, pero el equipamiento necesario para realizarlo no estuvo disponible antes de su muerte en 1872.

²⁶ Más tarde la longitud de onda definitoria se cambió por la de la luz emitida en una transición entre dos niveles de energía en el átomo de krypton-86 para permitir una mayor precisión en la medida.

²⁷ El cadmio puede identificarse por el número de protones y neutrones que forman su núcleo.

La Tierra, el Sol, las rocas, todos son indiferentes, y esto es un tipo de fuerza pasiva. Quizá indiferencia y gravitación sean lo mismo.

ISAAC BASHEVIS SINGER²⁸

En 1874 un físico irlandés algo estrafalario llamado George Johnstone Stoney se encontró en la situación de tener que dar sentido al babel de las unidades prácticas. Había sido invitado a pronunciar una conferencia sobre unidades de medida en la reunión anual de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia en Belfast²⁹. Esta reunión anual sigue celebrándose hoy, aunque ahora se ocupa de mostrar los desarrollos de la ciencia al gran público, la prensa y los jóvenes.

Pero en la época de Stoney era la conferencia científica más importante del mundo, un lugar donde se exponían los grandes descubrimientos y la prensa informaba sobre los grandes debates entre científicos y comentaristas destacados.

²⁸ I. B. Singer, *A Crown of Feathers*, Farrar, Straus & Giroux, Nueva York, 1970, p. 47.

²⁹ G. Johnstone Stoney, *Philosophical Magazine* (series 5), II, 381 (1881). Este artículo recoge el material presentado en la reunión de la BAAS en Belfast en 1874. También está impreso en los *Scientific Proceedings of the Royal Dublin Society*, 3, 51 (1883). Se basa en el material presentado en una charla el 16 de febrero de 1881. La importancia de este trabajo fue resaltada en las primeras ediciones de la *Encyclopaedia Britannica* por Millikan, quien escribió la entrada sobre el «Electrón».

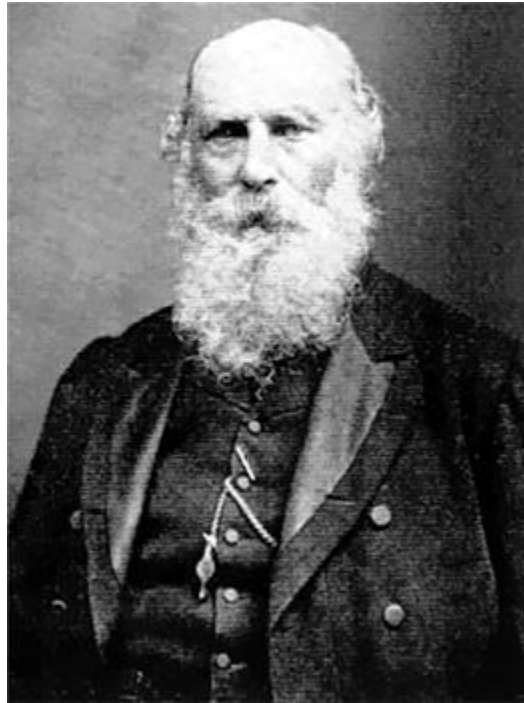


Figura 2.3. El físico irlandés George Johnstone Stoney (1826-1911)³⁰.

Hoy hay tantas conferencias científicas, talleres, reuniones, discusiones, comités y mesas redondas especializadas que ya no queda lugar para una reunión que cubra toda la ciencia a nivel técnico: sería insoportablemente grande, insoportablemente larga y casi ininteligible para la mayoría de los participantes durante la mayor parte del tiempo.

Stoney era un pensador excéntrico y original. Fue la primera persona que demostró la forma de deducir si otros planetas del sistema solar poseían o no una atmósfera gaseosa, como la Tierra, calculando si su gravedad superficial era suficientemente intensa

³⁰ *Notes and Records of the Royal Society*, vol. 29 (octubre de 1974), lámina 14. Reproducidos con el permiso de la Royal Society Library.

para mantener esa atmósfera. Pero su pasión real estaba reservada a su idea más preciada: el «electrón». Stoney había deducido que debía existir un componente básico de carga eléctrica. Estudiando los experimentos de Michael Faraday sobre electrólisis, Stoney había predicho³¹ incluso cuál debía ser su valor, una predicción posteriormente confirmada por J. J. Thomson, quien descubrió el electrón en Cambridge en 1897³² y anunció su descubrimiento a la Royal Institution el 30 de abril. A esta cuota básica de carga eléctrica, Stoney le dio finalmente el nombre de «electrón» y el símbolo E en 1891³³ (después de llamarlo primero³⁴ «electrino» en 1874) y nunca desaprovechó una oportunidad de exponer públicamente sus propiedades y beneficios potenciales para la ciencia³⁵.

Stoney era también un primo lejano, y más viejo, del famoso matemático, científico de la computación y criptógrafo Alan Turing,

³¹ Stoney escribió en agosto de 1874 en su artículo «On the Physical Units of Nature» que «la Naturaleza nos presenta, en el fenómeno de la electrólisis, una única cantidad definida de electricidad independiente de los cuerpos concretos sobre los que actúa. Para clasificarlo enunciaré la “ley de Faraday” en los siguientes términos, que, como mostraré, le darán precisión, a saber: *Por cada enlace químico que se rompe dentro de un electrolito hay una cierta cantidad de electricidad que atraviesa el electrolito y que es la misma en todos los casos.* A esta cantidad definida de electricidad la llamaré E_r . Si hacemos de esta cantidad nuestra unidad de electricidad, probablemente habremos dado un paso muy importante en nuestros estudios de los fenómenos moleculares».

³² D. L. Anderson, *The Discovery of the Electron*, Van Nostrand, Princeton NJ, 1964; I. B. Cohen, «Conservation and the concept of electric charge: an aspect of philosophy in relation to physics in the nineteenth century», en *Critical Problems in the History of Science*, ed. M. Clagett, University of Wisconsin Press, Madison, 1959.

³³ *Scientific Transactions of the Royal Dublin Society, IV, series II (1891)*.

³⁴ Stoney tenía la manía de utilizar el sufijo «-ino» en muchas descripciones de unidades. Por ejemplo, se refiere el metro como «longitudino, o unidad de longitud», al gramo como «masino, unidad de masa», al segundo como «tempino, o unidad de tiempo»; ver *Scientific Proceedings of the Royal Dublin Society*, 3, 51 (1883).

³⁵ El nombre «electrón» de Stoney fue adoptado con preferencia a la etiqueta «corpúsculo» que quería darle su descubridor, J. J. Thomson

cuya madre relataba recuerdos de infancia del estrafalario tío, a quien los niños llamaban «electrón Stoney³⁶». También era tío de George FitzGerald, ahora famoso por proponer la contracción de longitud de FitzGerald-Lorentz, un fenómeno que fue entendido finalmente en el contexto de la teoría de la relatividad especial de Einstein. Stoney era también un hombre práctico y trabajó durante dos años para el conde de Rosse construyendo instrumentos ópticos sensibles para su observatorio privado en Birr Castle, antes de convertirse en profesor de filosofía natural en el Queen's College Galway en 1850. Tras su retiro se trasladó a Hornsey, al norte de Londres, y continuó publicando un flujo continuo de artículos en la revista científica de la Royal Dublin Society. Es difícil encontrar una cuestión sobre la que no haya un artículo firmado por él, acerca de cualquier tema concebible: encontramos de todo, desde el viaje en el tiempo hasta cómo mantener verticales las bicicletas.

Stoney se dio cuenta de que el programa de la reunión en Belfast de la Asociación Británica estaba lleno de explicaciones de unidades y patrones diferentes: cómo medirlos, cómo definirlos mejor, cómo interrelacionarlos. Todo esto era muy útil para los iniciados pero algo tedioso para los demás. Stoney vio una oportunidad para simplificar esta vasta confusión de patrones humanos de medida de una manera tal que diese más peso a su hipótesis del electrón. Ya había sido miembro de un comité de la Asociación Británica³⁷ que

³⁶ S. Turing, *Alan Turing*, Heffers, Cambridge, 1959.

³⁷ Otros miembros eran Maxwell y William Thomson (más tarde lord Kelvin); ver J. G. O'Hara, «George Johnstone Stoney, F. R. S., and the concept of the electron», *Notes and Records of the Royal Society of London*, 29, 265 (1974). La predicción de Stoney de una carga eléctrica básica no parece haber atraído el grado de atención que merecía. Esto está claro por el hecho de que

había establecido convenciones para las unidades eléctricas en los años previos a esta conferencia, y por eso había sido requerido para aportar algunas ideas a los problemas de las unidades y los patrones.

Stoney se dio cuenta de que su concepto de la unidad de carga electrónica básica proporcionaba la pieza que faltaba en un pequeño rompecabezas. Supongamos que uno quisiera idear unidades de masa, longitud y tiempo que no estuvieran ligadas a patrones de conveniencia puramente humana, como la libra, la milla o la quincena. Entonces tendrían que derivarse de algún aspecto de la fábrica subyacente del Universo que no fuera antropocéntrico, que no dependiera de dónde estaba uno situado cuando lo medía o de cuándo se llevaba a cabo la medición. Esto descartaba los enfoques tradicionales de los patrones, que tomaban una masa estándar de un kilogramo o una longitud de un metro, los conservaban en un ambiente especialmente controlado en algún lugar y simplemente comparaban con ellos otras masas o longitudes de referencia. Estas masas y longitudes eran antropocéntricas en origen y, lo que es peor, son antropocéntricas en principio porque no hay manera de decir a los extraterrestres cuánta masa o longitud define nuestro patrón sin enviárselo.

en octubre de 1894 escribió una carta a los editores del *Philosophical Magazine*, una destacada revista científica de la época, quejándose de que Ebert, un autor que había publicado recientemente en la revista, había afirmado que «Von Helmholtz... fue el primero en demostrar que... debe haber... una cantidad mínima de electricidad... que como un átomo eléctrico ya no es divisible». Stoney llama la atención sobre su conferencia anterior y artículos de veinte años antes, ver *Philosophical Magazine* series 5, 38, 418 (1894) que puede verse en <http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History/Stoney-1894.html>.

Para escapar de los grilletes del sesgo antropocéntrico y ofrecer así algo que pudiera trascender los patrones humanos Stoney se dirigió a las constantes de la física. Newton había descubierto que la gravedad obedece a una ley aparentemente universal. La fuerza entre dos masas cuyos centros están separados por una distancia dada es proporcional a cada una de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre sus centros. La constante de proporcionalidad debería ser la misma en cualquier parte del Universo³⁸. Esta constante, G , da una medida de la intensidad de la gravedad. Lo más importante en esto es que se cree que es constante³⁹: en todas partes debería encontrarse el mismo valor si se mide correctamente. Además, tiene un valor extraño cuando se expresa en nuestras convenientes unidades antropocéntricas ($G = 6,67259 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$), porque dichas unidades estaban concebidas para otros fines antropocéntricos.

La segunda constante de la Naturaleza a la que acudió Stoney para sus patrones no antropocéntricos era la velocidad de la luz, c . De

³⁸ La teoría de la relatividad general de Einstein, que extiende la teoría de la gravedad de Newton para tratar situaciones en donde la gravedad es muy intensa y el movimiento puede tener lugar a la velocidad de la luz, conserva el estatus especial de G . La constante definitoria de la teoría es G/c^4 , que resalta su aspecto relativista.

³⁹ Hubo un período a comienzos de la década de 1960 en que los astrónomos se tomaron muy en serio la posibilidad de que G decreciera con el tiempo debido a que las predicciones de la teoría de la relatividad general de Einstein sobre los efectos de la gravedad del Sol parecían entrar en conflicto con la cantidad observada. Los físicos americanos Carl Brans y Robert Dicke desarrollaron una generalización de la teoría de Einstein en la que G podría variar en el espacio o en el tiempo. Esta teoría sigue siendo muy importante como herramienta para realizar predicciones sobre las consecuencias de variar G que pueden ser comprobadas frente a las observaciones. La motivación para el desarrollo de Brans y Dicke desapareció en menos de una década. La aparente discrepancia entre la teoría de Einstein y las observaciones resultó ser debida a inexactitudes en la determinación del diámetro del Sol a causa de la actividad turbulenta en su superficie. Cuando se tuvo esto en cuenta las predicciones teóricas concordaron de forma muy precisa con las observaciones.

nuevo, esta cantidad trasciende los patrones humanos. Tiene una importancia fundamental. De hecho, tiene una importancia aún más fundamental que lo que Stoney pudo haber sabido nunca. Einstein demostró que la velocidad de la luz en el vacío debería actuar como el límite último de velocidad en el Universo: ninguna información puede enviarse más rápidamente. También se había descubierto que el producto de la permisibilidad eléctrica y la permeabilidad magnética del vacío, que definían diferentes unidades de electricidad, era igual al cuadrado de la velocidad de la luz, lo que también revelaba su especial estatus universal con respecto a la electricidad. A estas dos cantidades constantes Stoney añadió su propia candidata para la tercera gran constante de la Naturaleza: su carga electrónica básica, que ahora denotamos con el símbolo e . Era la última pieza necesaria para completar el rompecabezas. Encajaba en la cuenta de la misma forma que G y c . Se presumía universal. Estaba asociada con un aspecto fundamental de la estructura de la Naturaleza. Y no se preocupaba de la conveniencia humana. Stoney anunció su trinidad de constantes de esta forma⁴⁰:

La Naturaleza nos presenta tres de estas unidades, y si las tomamos como nuestras unidades fundamentales en lugar de escogerlas arbitrariamente, tendremos nuestras expresiones cuantitativas en una relación más conveniente, y sin duda más íntima, con la Naturaleza que la que existe ahora.

Para tal fin debemos seleccionar fenómenos que se den en toda la Naturaleza y no estén asociados simplemente con cuerpos

⁴⁰ *Scientific Proceedings of the Royal Dublin Society*, 3, 53 (1883).

individuales. La primera de las cantidades de la Naturaleza de magnitud absoluta hacia la que yo llamaría la atención es esa notable velocidad con un valor absoluto, independiente de las unidades en las que se mide, que conecta todas las unidades electrostáticas sistemáticas con las unidades electromagnéticas de la misma serie. Llamaré a esta velocidad V_1 [es decir, nuestra c]. Si la tomáramos como nuestra unidad de velocidad introduciríamos de golpe una inmensa simplificación en nuestro tratamiento de todo el abanico de fenómenos eléctricos, y probablemente en nuestro estudio de la luz y el calor.

Una vez más la Naturaleza nos presenta un coeficiente de gravitación concreto, de un valor absoluto independiente de las unidades en las que se mide, y que parece extenderse a la materia ponderable de cualquier tipo a lo largo de todo el Universo material. Llamaré a este coeficiente G , (esto es, nuestra G). Si lo tomáramos como nuestra unidad de coeficientes de atracción, es presumible que con ello pudiéramos establecer la base para detectar dónde reside la conexión que sólo podemos sospechar entre esta maravillosa propiedad común a toda la materia ponderable y los demás fenómenos de la Naturaleza.

Y, finalmente, la Naturaleza nos presenta el fenómeno de la electrólisis, con una única cantidad de electricidad definida que es independiente de los cuerpos concretos sobre los que actúa... Llamaré a esta cantidad de electricidad definida E_1 [es decir, nuestra e]. Si hacemos de ésta nuestra unidad de cantidad de

electricidad, probablemente habremos dado un paso muy importante en nuestro estudio de los fenómenos moleculares.

Con ello tenemos muy buenas razones para suponer que en V_1 , G_1 y E_1 [es decir, c , G y e] tenemos tres de una serie de unidades sistemáticas que en un sentido eminente son las unidades de la Naturaleza y están en íntima relación con la actividad que se da en su poderoso laboratorio.

Hemos obtenido así... las tres grandes unidades fundamentales que nos ofrece la Naturaleza, sobre las que puede construirse toda una serie de unidades físicas que merecen el título de una genuina «serie natural de unidades físicas».

En su charla Stoney se refirió al electrón como el «electrino» y dio el primer cálculo de su valor esperado⁴¹. Demostró que el trío mágico de G , c y e podía combinarse de una manera, y sólo de una, de modo que a partir de ellas se creaban una unidad de masa, una unidad de longitud y una unidad de tiempo. Para la velocidad de la luz utilizó un promedio de las medidas existentes, $c = 3 \times 10^8$ metros por segundo; para la constante de gravitación de Newton utilizó el valor obtenido por John Herschel, $G = 0,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$, y para su unidad de carga del «electrino» utilizó $e = 10^{-20}$

⁴¹ Divide la cantidad de electricidad que se requiere para la electrólisis de 1 cc de hidrógeno por el número de átomos de hidrógeno en 1 cc, que está dado por el número de Avogadro. El artículo de Robert Millikan sobre el electrón en la *Encyclopedia Britannica* (1926-1936), escrito en 1926, acredita al artículo de Johnstone Stoney de 1881 como el primer cálculo de la carga esperada en un electrón.

amperios⁴². Estas son las inusuales nuevas unidades que él encontró, en términos de las constantes e , c y G , y en términos de gramos, metros y segundos:

$$M_J = (e^2/G)^{1/2} = 10^{-7} \text{ gramos}$$

$$L_J = (Ge^2/c^4)^{1/2} = 10^{-17} \text{ metros}$$

$$T_J = (Ge^2/c^6)^{1/2} = 3 \times 10^{-16} \text{ segundos}$$

Éstas son cantidades extraordinarias. Aunque una masa de 10^{-7} gramos no es demasiado espectacular —es similar a la de una mota de polvo—, las unidades de longitud y tiempo de Stoney eran muy diferentes de cualquiera que hubieran encontrado antes los científicos. Eran fantásticamente pequeñas, rozando lo inconcebible. No había (y sigue sin haberla) ninguna posibilidad de medir directamente tales longitudes y tiempos. En cierto modo, esto es lo que se podría haber esperado. Estas unidades no están construidas deliberadamente a partir de dimensiones humanas, por conveniencia humana o para utilidad humana. Están definidas por la propia fábrica de la realidad física que determina la Naturaleza de la luz, la electricidad y la gravedad. No se preocupan de nosotros. Stoney había triunfado de un modo brillante en su búsqueda de un sistema de unidades sobrehumanas. Pero, ¡ay!, éstas atrajeron poca

⁴² Nótese que este artículo fue escrito antes de que se introdujeran las modernas unidades CGS para magnitudes eléctricas; los amperios miden ahora la corriente eléctrica y no la carga (= igual corriente \times tiempo). El valor de Stoney para e corresponde a 10^{-11} unidades CGS.

atención. No había ningún uso práctico para sus unidades «naturales» y su importancia quedó oculta para todos, incluso para el propio Stoney, que estaba más interesado en promocionar su electrón hasta que éste finalmente fue descubierto en 1897. Las unidades naturales tenían que ser redescubiertas.

§. Las unidades naturales de Max Planck

La ciencia no puede resolver el misterio final de la Naturaleza. Y esto se debe a que, en el último análisis, nosotros mismos somos parte del misterio que estamos tratando de resolver.

MAX PLANCK⁴³

La idea de Stoney fue descubierta en una forma ligeramente diferente por el físico alemán Max Planck en 1899. Planck es uno de los físicos más importantes de todos los tiempos. Descubrió la Naturaleza cuántica de la energía que puso en marcha la revolución cuántica de nuestra comprensión del mundo, ofreció la primera descripción correcta de la radiación térmica (el denominado «espectro de Planck») y una de las constantes fundamentales de la Naturaleza lleva su nombre. Fue una figura capital en la física de su tiempo, ganó el Premio Nobel de Física en 1918 y murió en 1947, a

⁴³ K. Wilber, *Quantum Questions: Mystical Writings of the World's Great Physicists*, New Science Library, Boston, 1985, p. 153. [Hay traducción española: *Cuestiones cuánticas: escritos místicos de los físicos más famosos del mundo*, Kairós, Barcelona, 2005].

los 89 años. Hombre tranquilo y modesto, era profundamente religioso⁴⁴ y fue profundamente admirado por sus contemporáneos más jóvenes, como Einstein y Bohr.

La concepción que tenía Planck de la Naturaleza ponía mucho énfasis en su racionalidad intrínseca y en su independencia del pensamiento humano. Creía en una inteligencia detrás de las apariencias que fijaba la Naturaleza de la realidad. Nuestras concepciones más fundamentales de la Naturaleza tenían que ser conscientes de que era preciso identificar esa estructura profunda que estaba lejos de las necesidades de la utilidad y conveniencia humanas. En el último año de su vida un antiguo alumno le preguntó si creía que buscar la forma de unir todas las constantes de la Naturaleza mediante alguna teoría más profunda era atractivo. Respondió con entusiasmo, templado por el realismo sobre la dificultad del desafío:

Respecto a su pregunta sobre las conexiones entre las constantes universales, es sin duda una idea atractiva ligarlas tan estrechamente como sea posible reduciendo estas diversas constantes a una sola. Por mi parte, sin embargo, tengo dudas de que se logre con éxito. Pero puedo estar equivocado⁴⁵.

⁴⁴ Ver por ejemplo el artículo «The Mystery of our Being» y la entrevista con Planck en la colección editada por K. Wilber, *Quantum Questions: Mystical Writings of the World's Great Physicists*, New Science Library, Boston, 1985, capítulo 17. Están extraídos de su libro *Where is Science Going?*, Norton, Nueva York, 1932. Ver también M. Planck, «Religion and Natural Science», en *Scientific Autobiography and Other Papers*, Philosophical Library, Nueva York, 1949.

⁴⁵ Carta a I. Rosenthal-Schneider (30 de marzo de 1947), el original en alemán y la traducción en inglés en I. Rosenthal-Schneider, *Reality and Scientific Truth*, Wayne State Press, Detroit, 1980, pp. 56-57. Rosenthal-Schneider le había preguntado por la búsqueda general de vínculos entre constantes y los intentos concretos de Eddington en esta dirección.

A diferencia de Einstein, Planck no creía que se pudiera alcanzar realmente una teoría de la física globalizadora que explicara todas las constantes de la Naturaleza. Si se llegara a una teoría semejante, entonces la física dejaría de ser una ciencia inductiva. Otros, como Fierre Duhem y Percy Bridgman, consideraron la prometida separación planckiana entre la descripción científica y las convenciones humanas como algo inalcanzable en principio, viendo las constantes de la Naturaleza y las descripciones teóricas que ellas soportaban como artificios de una particular elección humana de representación para dar sentido a lo que se veía.

Planck recelaba de atribuir significado fundamental a cantidades que habían sido creadas como resultado del «accidente» de nuestra situación:

Todos los sistemas de unidades que se han utilizado hasta ahora, incluyendo el denominado sistema C. G. S. absoluto [centímetro, gramo y segundo, para medir longitud, masa y tiempo] deben su origen a la coincidencia de circunstancias accidentales, en tanto que la elección de las unidades que radican en la base de todo sistema no se ha hecho según puntos de vista generales cuya importancia habría que retener necesariamente en todos lugares y tiempos, sino que se refiere esencialmente a las necesidades concretas de nuestra civilización terrestre...

Así, las unidades de longitud y tiempo se derivaron de las dimensiones y movimientos actuales de nuestro planeta, y las

unidades de masa y temperatura de la densidad y los puntos de temperatura más significativos del agua, al ser ésta el líquido que juega el papel más importante en la superficie de la Tierra, a una presión que corresponde a las propiedades medias de la atmósfera que nos rodea. No sería menos arbitrario tomar como unidad de longitud, digamos, la longitud de onda invariable de la luz del sodio. Pues, de nuevo, la elección particular del sodio de entre muchos elementos químicos sólo podría justificarse, quizá, por su ocurrencia común en la Tierra, o por su línea doble, que está en nuestro campo de visión, pero no es en absoluto el único de este tipo. De aquí que sea perfectamente concebible que en alguna otra época, con otras condiciones externas, cada uno de los sistemas de unidades que se han adoptado hasta ahora pierda en parte, o por completo, su importancia natural originaria.

En su lugar, quería ver el establecimiento de unidades de longitud, masa, tiempo y temperatura que sean independientes de cuerpos o sustancias especiales, que necesariamente conserven su significado en todos los tiempos y en todos los ambientes, terrestres y humanos u otros cualesquiera⁴⁶.

⁴⁶ M. Planck, «Über irreversible Strahlungsvorgänge», S.-B. Preuss Akad. Wiss. 5, pp. 440-480 (1899). También publicado como *Ann. der Physik* I, 69 (1900). *Theorie der Wärmestrahlung*, Barth, Leipzig, 1906. Traducción inglesa de M. Masius, *The Theory of Heat Radiation*, Dover, Nueva York, 1959.

Mientras que Stoney había visto en la elección de unidades prácticas una manera de cortar el nudo gordiano de la subjetividad, Planck utilizaba sus unidades especiales para sustentar una base no antropomórfica para la física y «que, por consiguiente, podrían describirse como “unidades naturales”». La revelación progresiva de esta base era para él el sello de un adelanto real hacia una separación tan grande como fuera posible entre los fenómenos del mundo externo y los de la conciencia humana.

De acuerdo con su perspectiva universal, en 1899 Planck propuso⁴⁷ que se construyeran unidades naturales de masa, longitud y tiempo a partir de las constantes más fundamentales de la Naturaleza: la constante de gravitación G , la velocidad de la luz c y la constante de acción h , que ahora lleva el nombre de Planck⁴⁸. La constante de Planck determina la mínima unidad de cambio posible en que puede alterarse la energía (el «cuanto»). Además, la incorporación de la constante de Boltzmann k —que simplemente convierte unidades de energía en unidades de temperatura— le permitió también definir una temperatura natural⁴⁹. Las unidades de Planck son las únicas combinaciones de dichas constantes que pueden formarse con

⁴⁷ Estas cantidades están definidas en una discusión idéntica que aparece en sus artículos de 1899 y 1900 y fueron publicadas en una serie de conferencias pronunciadas en Berlín en 1906-1907. Más tarde aparecieron bajo el título de *Theorie der Wärmestrahlung*, donde se presenta de nuevo la misma discusión de las unidades naturales («Natürliche Masseinheiten»).

⁴⁸ Planck utilizaba símbolos diferentes para estas constantes: con f para nuestra G , b para nuestra h , y a para nuestra k . Nosotros hemos utilizado los símbolos modernos. Parece que el símbolo G para la constante gravitatoria fue introducido por A. König y F. Recharz, «Eine neue Methode zur Bestimmung der Gravitationskonstante», *Ann. Physik. Chem.* 24, pp. 664-668 (1885).

⁴⁹ La constante de Boltzmann no es realmente fundamental como G , h y c . Es simplemente un factor para convertir unidades de energía en unidades de temperatura.

dimensiones de masa, longitud, tiempo y temperatura. Sus valores no son muy diferentes de los de Stoney:

$$m_{\text{pl}} = (hc/G)^{1/2} = 5,56 \times 10^{-5} \text{ gramos}$$

$$l_{\text{pl}} = (Gh/c^3)^{1/2} = 4,13 \times 10^{-33} \text{ centímetros}$$

$$t_{\text{pl}} = (Gh/c^5)^{1/2} = 1,38 \times 10^{-43} \text{ segundos}$$

$$T_{\text{pl}} = k^{-1}(hc^5/G)^{1/2} = 3,5 \times 10^{32} \text{ Kelvin}$$

Una vez más, vemos un contraste entre la pequeña, pero no escandalosamente reducida unidad natural de masa y las unidades naturales fantásticamente extremas de tiempo, longitud y temperatura⁵⁰. Estas cantidades tenían una significación sobrehumana para Planck. Entraban en la base de la realidad física:

Estas cantidades conservarán su significado natural mientras la ley de gravitación y la de la propagación de la luz en el vacío y los dos principios de la termodinámica sigan siendo válidos; por lo tanto, siempre deben encontrarse iguales cuando sean medidas por las inteligencias más diversas con los métodos más diversos.

⁵⁰ La razón para la coexistencia de las unidades naturales de masa, longitud y tiempo de Stoney y Planck, con una pequeña diferencia en cada una de ellas, es que la combinación e^2/hc es una constante adimensional de la Naturaleza aproximadamente igual a $1/860$ utilizando los valores actualmente determinados de las constantes. Por consiguiente, si reemplazamos e^2 por hc en las unidades de masa, longitud y tiempo de Stoney, obtenemos las unidades de Planck salvo un factor numérico dado por la raíz cuadrada de 860. De la misma manera puede crearse una unidad natural de temperatura de Stoney.

En sus palabras finales alude a la idea de observadores en otro lugar del Universo que definen y entienden estas cantidades de la misma manera que nosotros⁵¹.

De entrada había algo muy sorprendente en las unidades de Planck, como lo había también en las de Stoney. Entrelazaban la gravedad con las constantes que gobiernan la electricidad y el magnetismo. La gravedad había sido siempre una rama de la física sin grandes incidentes. Al parecer, Newton había descubierto la ley de la gravedad y desde entonces se habían planteado muy pocas preguntas sobre ella. Ciertamente había pequeñas e incómodas discrepancias entre sus predicciones y la variación observada del planeta Mercurio en su órbita próxima al Sol. Algunos habían sugerido incluso hacer un cambio minúsculo en la ley de Newton para explicarla, pero la mayoría de los astrónomos esperaban que pequeños efectos de la forma no esférica del Sol o errores en las observaciones pudieran salir en apoyo de Newton. Parecía tratarse de una historia acabada.

Por el contrario, el progreso y debate acerca de las leyes de la electricidad y del magnetismo eran constantes. Al principio parecían leyes independientes para la electricidad estática (la que hace que el pelo se ponga de punta), la electricidad dinámica (la que hace que fluyan las corrientes) y el magnetismo. Pero poco a poco se

⁵¹ Fue más lejos para definir unidades en las que «ahora escogemos las unidades naturales de modo que en el nuevo sistema de medida cada una de las cuatro constantes precedentes toma el valor 1». Esto corresponde a medir todas las masas, longitudes, tiempos y temperaturas en unidades de Planck.

descubrió que las dos electricidades eran distintos aspectos de una fuerza eléctrica. Y luego Maxwell demostró que la electricidad y el magnetismo eran en realidad caras diferentes de la misma moneda: los imanes en movimiento podían hacer que fluyeran corrientes eléctricas y las corrientes eléctricas podían crear fuerzas magnéticas. Pero la gravedad nunca pareció intervenir en la electricidad y el magnetismo o en el comportamiento de átomos y moléculas. Como resultado vemos que existía una idea muy diferente a la de Planck y Stoney sobre las unidades naturales. El físico Paul Drude, que hizo contribuciones importantes al estudio de las ondas electromagnéticas, la óptica y los materiales, ocupaba la prestigiosa cátedra de física en Leipzig. En 1897 Drude propuso⁵² un sistema de unidades absolutas de masa, longitud y tiempo que estaban ligadas a las propiedades del éter, que entonces se creía que llenaba todo el espacio. Como patrones eligió la velocidad de la luz y la distancia media recorrida por las partículas del éter antes de interaccionar. Drude no podía ver entonces ninguna forma⁵³ en que la gravedad estuviese ligada a la electricidad y el magnetismo y por ello no siguió a Stoney y Planck concibiendo unidades naturales que contengan G . Incluso para Planck, la entrada de G en sus

⁵² P. Drude, «Über Femewirkungen», *Ann. der Physik* 62, pp. i-xlix (suplemento) (1898). Lo desarrolló más en su libro de texto sobre óptica publicado en 1900 y traducido por Mann y Millikan como *The Theory of Optics*, Longmans, Green, Nueva York, 1902; ver pp. ix, y 527.

⁵³ Algunos años más tarde Drude apoya una elección realmente igual a la de Planck. Él utiliza c , G y las dos constantes de radiación que definen la radiación del cuerpo negro. Éstas son reducibles a k , la constante de Boltzmann, y h , la constante de Planck; ver P. Drude, *The Theory of Optics*, Longmans, Green, Nueva York, 1902, p. 527, donde hace referencia a la discusión de Planck de 1899. Dice que «el sistema absoluto se obtiene entonces a partir de la hipótesis de que la constante de gravitación, la velocidad de la luz y las dos constantes... en la ley de radiación tienen el valor 1»

unidades naturales era un misterio. No ofreció ninguna explicación respecto al significado de las minúsculas unidades de longitud y tiempo de Planck. ¿Qué significaban? ¿Qué sucedería si se considerara el mundo en estas dimensiones? Pasaría bastante tiempo antes de que se plantearan estas preguntas⁵⁴ y mucho más antes de que fueran respondidas.

§. Planck se hace real

La creciente distancia entre la imagen del mundo físico y el mundo de los sentidos no significa otra cosa que una aproximación progresiva al mundo real.

MAX PLANCK

⁵⁴ Según Focken, que escribe en 1953, Eddington afirmaba que la longitud de Planck debe ser la clave para alguna estructura esencial puesto que es mucho menor que los radios del protón y el electrón. Focken no da la referencia de la afirmación de Eddington pero probablemente se refiere a un informe sobre la relatividad general preparado para la Physical Society de Londres en 1918; ver A. S. Eddington, *Report on the Relativity Theory of Gravitation*, Physical Society of London, Fleetway Press, Londres, 1918. En la última página de dicho informe, que más tarde se desarrolló para convertirse en su texto sobre relatividad (A. S. Eddington, *The Mathematical Theory of Relativity*, Cambridge University Press, Cambridge, 1923) Eddington deriva la unidad natural de longitud de Planck y su informe contiene la notable frase: «Existen otras unidades naturales de longitud —los radios de las cargas eléctricas unidad positiva y negativa— pero éstas son de un orden de magnitud mucho mayor... ninguna teoría ha intentado llegar a una granulación tan fina. Pero es evidente que esta longitud debe ser la clave para una estructura esencial. Quizá no sea una esperanza inalcanzable el que algún día pueda llegarse a un conocimiento más claro de los procesos de la gravitación; y pueda esclarecerse la extrema generalidad e imparcialidad de la teoría de la relatividad». También Percy Bridgman señaló que el enorme valor de la temperatura de Planck, incluso para niveles astrofísicos, indicaba que podría estar asociada con algún nivel nuevo y fundamental de estructura cósmica; ver P. W. Bridgman, *Dimensional Analysis*, Yale University Press, New Haven, 1920.

Hemos visto que Max Planck apelaba a la existencia de constantes universales de la Naturaleza como prueba de una realidad física completamente diferente de las mentes humanas. Pero él quería ir mucho más lejos y utilizar la existencia de estas constantes inmutables como un argumento contra los filósofos positivistas que presentaban la ciencia como una construcción enteramente humana: puntos precisos organizados de una forma conveniente por una teoría que con el tiempo sería reemplazada por otra mejor. Planck reconocía que la escritura de las ecuaciones y la formulación de las teorías físicas era una actividad humana, pero eso no significa que sólo sea una actividad humana. Para él, las constantes de la Naturaleza habían surgido sin ser invitadas y, como mostraban claramente sus unidades naturales, no estaban escogidas exclusivamente por conveniencia humana. Escribe⁵⁵:

Estos... números, las denominadas «constantes universales» son en cierto sentido los ladrillos inmutables del edificio de la física teórica.

Así que ahora debemos seguir con la pregunta: ¿cuál es el significado real de estas constantes? ¿Son, en último análisis, invenciones de la mente inquisitiva del hombre, o poseen un significado real independiente de la inteligencia humana?

La primera de estas dos opiniones es defendida por los filósofos del positivismo, o al menos por sus partidarios más extremos. Su teoría es que la ciencia física no tiene otra base que las

⁵⁵ M. Planck, *Scientific Autobiography and Other Papers*, trad. F. Gaynor, Williams & Norgate, Londres, 1950, p. 170.

medidas sobre las que se erige su estructura, y que una proposición en física tiene sentido sólo en tanto que pueda ser sustentada por medidas.

Por consiguiente, hasta hace muy poco los positivistas de todo tipo han opuesto también la máxima resistencia a la introducción de hipótesis atómicas y con ello también a la aceptación de las antes mencionadas constantes universales. Esto es muy comprensible pues la existencia de estas constantes es una prueba palpable de la existencia en la Naturaleza de algo real e independiente de toda medida humana.

Por supuesto, incluso hoy un positivista consecuente podría calificar las constantes universales de meras invenciones que se han mostrado extrañamente útiles para hacer posible una descripción precisa y completa de los resultados más diversificados de las medidas. Pero sería difícil que cualquier físico real tomara en serio una afirmación semejante. Las constantes universales no fueron inventadas por razones de conveniencia práctica, sino que se nos han impuesto irresistiblemente debido al acuerdo entre los resultados de todas las medidas relevantes, y —esto es lo esencial— sabemos perfectamente por adelantado que todas las medidas futuras llevarán a estas mismas constantes.

Había muchas más opciones abiertas a los adversarios de Planck, por supuesto. Podría ser que las constantes que él escogió no fueran

verdaderamente constantes cuando se examinaran con una precisión mucho mayor. Podrían estar variando muy lentamente, quizá en sólo unas partes por millón durante la edad del Universo. O quizá sólo sean constantes en algún sentido estadístico o promedio. Puesto que estas posibilidades no pueden ser excluidas salvo por hipótesis o prejuicios, se necesita un estudio experimental detallado de las constantes y su constancia. Los físicos se han interesado en determinar los valores de las constantes de la Naturaleza con precisión cada vez mayor y en concebir formas de comprobar si eran realmente constantes. A algunos, esta búsqueda de la evaluación de las constantes de la Naturaleza les había parecido el objetivo último de la física. Pues, sorprendentemente, a finales del siglo XIX era creencia general que ya se habían hecho en física todos los descubrimientos interesantes y todo lo que quedaba era medir con precisión cada vez mayor: una empresa de pulido más que de descubrimiento o revolución. Llevando al extremo esta tendencia, Albert Michelson escribió en 1894 que se había extendido la opinión de que:

Los hechos y leyes fundamentales de la ciencia física más importantes ya han sido descubiertos, y están ahora tan firmemente establecidos que la posibilidad de que alguna vez sean reemplazados a consecuencia de nuevos descubrimientos es remota... Nuestros descubrimientos futuros deben buscarse en la sexta cifra decimal⁵⁶.

⁵⁶ A. Michelson, conferencia pública en la Universidad de Chicago, citada en *Physics Today* 21, 9 (1968) y *Lights Waves and their Uses*, University of Chicago Press, 1961

Incluso Planck había estado influido por estas ideas. Recordaba que cuando era estudiante en 1875 su tutor le aconsejó trabajar en biología porque todos los problemas importantes de la física estaban resueltos y la disciplina se estaba acercando rápidamente a su compleción. Irónicamente, Planck fue el líder en la creación de la nueva visión cuántica de la realidad que fue luego seguida por los asaltos de Einstein a nuestras ideas de espacio, tiempo y gravedad. Lejos de estar próxima a la compleción, la física apenas había empezado.

§. Sobre el tiempo

El viejo lo cree todo; el de mediana edad sospecha de todo; el joven lo sabe todo.

OSCAR WILDE⁵⁷

Una de las paradojas de nuestro estudio del Universo circundante es que a medida que las descripciones de su funcionamiento se hacen más precisas y acertadas, también se alejan cada vez más de toda la experiencia humana. Las predicciones más exactas que podemos hacer no se refieren al funcionamiento de los bancos o los caprichos de la elección del consumidor y las intenciones del votante; se refieren a las partículas elementales y a los sistemas

⁵⁷ O. Wilde, *Phrases and Philosophies for the Use of the Young*, 1894, publicado por primera vez en diciembre de 1894 en la revista estudiantil de Oxford *The Chameleon*; ver *The Portable Oscar Wilde*, eds. R. Aldington y S. Weintraub, Viking, Nueva York, 1976.

astronómicos de estrellas en rotación. Esto es exactamente lo contrario de lo que cabría esperar si nuestras descripciones del mundo estuvieran fuertemente sesgadas por aportes de la mente humana en vez de ser, en cierto sentido, actos de descubrimiento. No necesitan haber sido como son. Sólo tenemos que mirar nuestros intentos para entender las complejidades del comportamiento humano y pronto reconoceremos un fuerte elemento subjetivo. La fiabilidad de nuestras conclusiones falla en general cuando tratamos con situaciones muy alejadas de nuestra propia experiencia e individuos menos parecidos a nosotros.

Por el contrario, nuestro desenmarañamiento de la existencia de constantes de la Naturaleza tras las realidades descritas por leyes del cambio e invariancia nos ha permitido formular patrones que nos permiten juzgar si las cosas son grandes o pequeñas, jóvenes o viejas, pesadas o ligeras, calientes o frías, por referencia a un patrón absoluto. Cuando decimos que el Universo se ha estado expandiendo durante 13 000 millones de años, ¿significa eso que es *viejo*? Suena muy viejo frente al lapso fugaz de una vida humana, o cuando lo comparamos con el día o el año que se derivan de los movimientos de la Tierra. Pero, de nuevo, el Universo podría seguir expandiéndose durante billones de años, o quizá incluso para siempre. Con respecto a estos patrones es muy joven. Las unidades naturales nos dicen que en un sentido bien definido el Universo es ya muy viejo, de unas 10^{60} veces el tiempo de Planck. La vida en la Tierra no apareció hasta que el Universo tenía una edad de 10^{59} tiempos de Planck. Hicimos una entrada tardía.

Capítulo 3

Patrones sobrehumanos

El hermano Mycroft se acerca.

A. CONAN DOYLE⁵⁸

§. Einstein sobre las constantes

Lo que realmente me interesa es si Dios podría haber hecho el mundo de una forma diferente; es decir, si la necesidad de simplicidad lógica deja la más mínima libertad.

ALBERT EINSTEIN⁵⁹

Albert Einstein hizo más que cualquier otro científico por crear la imagen moderna de las leyes de la Naturaleza. Desempeñó un papel principal en la creación de la perspectiva correcta sobre el carácter atómico y cuántico del mundo material a pequeña escala, demostró cómo la velocidad de la luz introducía una relatividad en la visión del espacio de cada observador, y encontró por sí solo la teoría de la gravedad que sustituyó la imagen clásica creada por Isaac Newton 250 años antes. Siempre estuvo fascinado por el hecho de que algunas cosas deben parecer siempre iguales, independientemente de cómo se mueva el que las ve. El ejemplo principal que él

⁵⁸ A. Conan Doyle, «The Bruce-Partington Plans», *His Last Bow*, Oxford University Press, Oxford, 1993, p. 38; publicado por primera vez como una historia en *Strand Magazine* en 1907 y en un libro de John Murray, Londres, en 1917.

⁵⁹ S. W. Hawking y W. Israel, *Einstein: A Centenary Volume*, Cambridge University Press, 1987, p. 128.

presentaba era la velocidad de la luz desplazándose en un vacío. Independientemente de cuán rápidamente se esté moviendo con respecto a usted la fuente de un haz luminoso, una vez que emite su luz usted siempre medirá que esta luz tiene la misma velocidad con respecto a usted. Esto es completamente diferente de lo que sucede con cualquier movimiento cotidiano a poca velocidad con el que estamos familiarizados. Lancemos un misil a quinientos kilómetros por hora desde un tren que se está moviendo en la misma dirección a cien kilómetros por hora y encontraremos que el misil se mueve a seiscientos kilómetros por hora con relación al suelo. Pero disparemos un haz de luz desde un tren en movimiento a la velocidad de la luz (trescientos mil kilómetros por segundo) y encontraremos que se mueve a la velocidad de la luz con respecto al suelo. La velocidad de la luz es una constante especial de la Naturaleza. Es el banco de pruebas frente al que podemos juzgar si el movimiento es «rápido» o «lento» en un sentido absoluto. Esperamos que la velocidad de la luz desempeñe el mismo papel básico en todo el Universo. Es una velocidad límite cósmica: ninguna información puede ser transferida más rápido que la velocidad de la luz en el vacío⁶⁰.

⁶⁰ El «vacío» es importante. La luz se mueve más lentamente en un medio y es posible que una partícula se mueva en un medio a una velocidad mayor que la velocidad de la luz en dicho medio. Cuando esto sucede se emite una ráfaga de radiación (muy parecida a un boom sónico cuando se supera la velocidad del sonido) llamada radiación Cerenkov, por el físico ruso que descubrió este proceso. Es muy útil para detectar partículas de rayos cósmicos que se mueven a gran velocidad incidentes desde el espacio. El espacio es para cualquier fin práctico un vacío y, por ello, si se hace que las partículas incidentes, que se están moviendo a una velocidad muy próxima a la velocidad de la luz en el vacío, entren en un medio como el agua, estas partículas se encontrarán moviéndose a más velocidad que la velocidad de la luz en el medio y emitirán radiación Cerenkov, que es fácil de detectar.

Einstein tuvo muchas cosas interesantes que decir sobre las constantes de la Naturaleza en diferentes etapas de su vida. Fue su elucidación de la teoría de la relatividad la que dotó a la velocidad de la luz en el vacío del estatus especial como la máxima velocidad a la que podía transmitirse información en el Universo. Él reveló todo el alcance de lo que Planck y Stoney simplemente habían supuesto: que la velocidad de la luz era una de las constantes sobrehumanas fundamentales de la Naturaleza. En la segunda mitad de su vida, se enfrascó cada vez más en una búsqueda de la teoría final de la física. La llamó una «teoría de campo unificado», mientras que hoy se llamaría una «Teoría de Todo⁶¹». Por desgracia ahora los físicos creen que Einstein logró muy poco en ese período de intensa investigación, cuando buscaba incesantemente una teoría más grande y mejor que su teoría de la relatividad general: una teoría que incluyera a otras fuerzas de la Naturaleza distintas de la gravedad⁶². Creía que tal teoría existía y su unicidad y compleción no dejarían cabos sueltos matemáticos en el terreno. En consecuencia, tendría el mínimo número posible de constantes de la

⁶¹ Ver J. D. Barrow, *Theories of Everything*, Oxford University Press, Londres, 1991. [Hay traducción española: *Teorías del Todo*, Crítica, Barcelona, 1994].

⁶² La búsqueda por Einstein de la teoría del campo unificado equivalía sólo a indagar una forma de unir gravedad y electromagnetismo. No parecía tener interés en la fuerza débil de la radiactividad y la fuerza nuclear fuerte. Podría decirse que su programa para la unificación sólo estaba jugando con la mitad de las piezas del rompecabezas. En 1980 se lo mencioné al físico matemático Abraham Taub en Berkeley, porque Taub había trabajado estrechamente con John von Neumann en Princeton y también había tenido contacto allí con Einstein. Él me dijo que en cierta ocasión oyó cómo le planteaban a Einstein esta objeción, a lo que respondió que creía que en última instancia se mostraría que las fuerzas débil y fuerte eran simplemente aspectos de la fuerza electromagnética. Éste fue un sabio comentario puesto que creemos que las fuerzas electromagnética y débil están unificadas en la bien comprobada teoría de Weinberg-Salam, mientras que también existen teorías que añaden la fuerza fuerte pero aguardan un test observacional concluyente.

Naturaleza⁶³ que, por tanto, sólo podrían hallarse mediante experimentos.

Einstein no se sentía realmente feliz porque hubiera algunas constantes libres. Se daba cuenta de que la búsqueda de la teoría final era un proceso en el que daría con teorías cada vez mejores que sustituyeran a la anterior. Por el momento nuestras teorías son provisionales y por eso hay un número de constantes libres de la Naturaleza que aparecen en ellas y que simplemente tenemos que medir. Al final, esta situación cambiaría. Él esperaba que su teoría unificada determinaría los valores de constantes como c , G y e en términos de números puros que podrían ser calculados con tanta precisión como uno quisiera.

Einstein no escribió casi nada sobre estas ideas en sus artículos publicados y demás escritos científicos. Pero mantuvo una larga correspondencia con una vieja amiga estudiante, Ilse Rosenthal-Schneider (fotografiada en la figura 3.1), que estaba interesada en la filosofía de la ciencia y fue amiga íntima tanto de Planck como de Einstein en su juventud. Ella y su marido emigraron a Sídney para escapar de la Alemania nazi en 1938. Durante el período de 1945 a 1949, las cartas personales entre Einstein y Rosenthal-Schneider se centraron en la cuestión de las constantes de la Naturaleza. Einstein reflexiona cuidadosamente sobre sus explicaciones y ofrece

⁶³ A Einstein le gustaba evaluar teorías enteras por la «intensidad» de sus ecuaciones (ver por ejemplo la 5.^a edición de su libro *The Meaning of Relativity*, Methuen, Londres, 1955). [Hay traducción española: *El significado de la relatividad*, Planeta DeAgostini, Barcelona, 1985]. Se trata simplemente del número de elementos de información que pueden ser introducidos libre e independientemente en las ecuaciones, lo que los matemáticos llaman los «datos iniciales». Einstein extendió esta medida de la rigidez de una teoría también a las constantes de la Naturaleza que definen sus soluciones.

una declaración clara y plena de sus creencias y esperanzas en el futuro de la física.

Rosenthal-Schneider escribió por primera vez⁶⁴ a Einstein acerca de las constantes en 1945. ¿Cuáles son? ¿Qué nos están diciendo sobre la legitimidad de la Naturaleza? ¿Están relacionadas? Ella se sorprendió al recibir una contestación muy rápida que realmente empezaba a responder a sus preguntas. Había aprendido que las preguntas sobre la salud de Einstein, su situación general y otras cuestiones personales quedaban generalmente sin respuesta o eran ignoradas en sus réplicas. Pero éste era un tema sobre el que deseaba reflexionar. Envió su respuesta por correo desde Princeton el 11 de mayo de 1945:

Con la pregunta de las constantes universales has abordado una de las cuestiones más interesantes que se puedan plantear. Hay dos tipos de constantes: las aparentes y las reales. Las aparentes son simplemente el resultado de la introducción de unidades arbitrarias, pero son eliminables. Las reales [verdaderas] son números genuinos que Dios tuvo que elegir arbitrariamente, por así decirlo, cuando se dignó crear este mundo. Mi opinión ahora es —dicho en pocas palabras— que las constantes del segundo tipo no existen y que su existencia aparente se debe a que no hemos profundizado lo suficiente. Creo por lo tanto que tales números sólo pueden ser de un tipo básico, como por ejemplo π o e .

⁶⁴ Rosenthal-Schneider, *Reality and Scientific Truth: Discussions with Einstein, von Laue, and Planck*, Wayne State University Press, Detroit, 1980, p. 32.



Figura 3.1. Ilse Rosenthal-Schneider (1891-1990)⁶⁵.

Lo que dice Einstein es que existen algunas constantes aparentes que son debidas a nuestro hábito de medir las cosas en unidades particulares. La constante de Boltzmann es de este tipo. Es sólo un factor de conversión entre unidades de energía y temperatura, parecido a los factores de conversión entre las escalas de temperatura Fahrenheit y centígrada. Las verdaderas constantes tienen que ser números puros y no cantidades con «dimensiones», como una velocidad, una masa o una longitud. Las cantidades con dimensiones siempre cambian sus valores numéricos si cambiamos las unidades en las que se expresan. Ni siquiera la velocidad de la luz en el vacío puede ser una de las verdaderas constantes que Einstein está buscando. Una velocidad tiene unidades de longitud

⁶⁵ *Ibíd.*, frontispicio.

por unidad de tiempo, y por ello no podría expresarse como una combinación de los números «básicos», tales como π , que busca Einstein. Daría lo mismo 186.000 millas por segundo o 300.000 kilómetros por segundo. Estos dos números no pueden explicarse por una teoría final de la física. En su lugar, debemos encontrar otra constante de la Naturaleza que tenga las dimensiones de una velocidad. La razón entre esta cantidad y la velocidad de la luz será entonces un número puro, sin dimensiones. Existe ahora la posibilidad de que sea un número calculable en términos de cantidades como π o cualquier otro número matemático.

En su respuesta Rosenthal-Schneider⁶⁶ menciona las ideas de Planck, de quien fuera compañera de estudios, sobre las tres constantes especiales que utilizó éste para crear sus unidades «naturales»:

Sin embargo, aún me preocupa —y por eso es por lo que te molesto de nuevo con mis preguntas— cuáles son las constantes universales como Planck solía enumerarlas: constante gravitatoria, velocidad de la luz, cuanto de acción... que no dependen de condiciones externas como la presión, la temperatura... y que por consiguiente son gratamente diferentes de las constantes de los procesos irreversibles. Si todas éstas fuesen totalmente inexistentes, las consecuencias serían catastróficas.

Si yo entiendo a Planck correctamente, él consideraba tales constantes universales como «cantidades absolutas». Si ahora

⁶⁶ *Ibíd.*, p. 34.

llegaras a decir que todas ellas son inexistentes, ¿qué nos quedaría en las ciencias naturales? Es mucho más preocupante para un mortal ordinario de lo que puedas imaginar.

La corresponsal de Einstein está preocupada por las consecuencias de que no haya verdaderas constantes de la Naturaleza. Si todas son ilusorias, ¿qué base hay para la realidad física?; ¿qué hace que el Universo parezca igual de un día para otro? Ella malinterpreta la afirmación de Einstein de que no hay constantes libres de la Naturaleza, pensando que él quiere decir que no son constantes, cuando él sólo pretende afirmar que, a su entender, no son libres. Una teoría más profunda las determinaría finalmente. Sintiendo que ha confundido a su corresponsal, le responde con más detalle⁶⁷ el 13 de octubre de 1945 con un análisis completo de la situación. En primer lugar, señala que hay simplemente constantes como 2 , π o e (una constante numérica aproximadamente igual a 2,718) que aparecen en fórmulas físicas. En un capítulo posterior hablaremos más de ellas. Einstein advierte que tienden a aparecer en fórmulas físicas pero sus valores no son ni muy grandes ni muy pequeños⁶⁸: nunca son muy diferentes de 1. Podrían ser diez veces mayores o menores pero no millones de veces mayores o menores. Esto es algo que no puede explicar. Sólo parece un golpe de suerte para los físicos⁶⁹.

⁶⁷ *Ibíd.*, p. 38.

⁶⁸ Por ejemplo, si calculamos la circunferencia de un círculo de radio R encontramos que es igual a $2\pi R$. El factor 2π es uno de estos ubicuos números «básicos».

⁶⁹ Significa que pueden utilizar análisis dimensional de problemas físicos para conjeturar la forma exacta de las ecuaciones.

Veo por tu carta que no captaste mi sugerencia sobre las constantes universales de la física. Por lo tanto trataré de exponer las cosas con más claridad.

1. Números básicos. Son aquellos que, en el desarrollo lógico de las matemáticas, aparecen por una cierta necesidad como formaciones individuales únicas.

por ejemplo, $e = 1 + 1 + 1/2! + 1/3! + \dots$

Sucede lo mismo con π , que está íntimamente conectado con e .

En contraste con tales números básicos están los demás números que no se derivan de 1 por medio de una construcción.

Parecería estar en la Naturaleza de las cosas que tales números básicos no difieren del número 1 en cuanto al orden de magnitud, al menos en tanto que la consideración se limite a formaciones «simples» o, como pueda ser el caso, «naturales».

Esta proposición, sin embargo, no es fundamental y no es fácilmente definible.

Pero Einstein sabe que estos números básicos no son las constantes de la Naturaleza más interesantes. Einstein explica que las constantes habituales, como la velocidad de la luz, la constante de Planck o la constante de gravitación tienen dimensiones de potencias diferentes de masa, longitud y tiempo. A partir de ellas podemos crear combinaciones que constituirían números puros, pero podríamos necesitar introducir otras cantidades que lo hagan. Dice Einstein:

Sea ahora una teoría completa de la física en cuyas ecuaciones fundamentales aparezcan las constantes «universales» $c_1 \dots c_n$. Las cantidades pueden ser reducidas de algún modo a g, cm, sec. Es obvio que la elección de estas tres unidades es completamente convencional. Cada una de estas $c_1 \dots c_n$ tiene una dimensión en estas unidades. Ahora escogeremos condiciones de manera que c_1, c_2, c_3 tengan dimensiones tales que no sea posible construir a partir de ellas un producto adimensional $c_1^{\alpha_1}, c_2^{\beta_2}, c_3^{\gamma_3}$. Entonces uno puede multiplicar c_4, c_5 , etc., por factores contruidos a partir de potencias de c_1, c_2, c_3 de tal manera que estos nuevos símbolos c_4^, c_5^*, c_6^* son números puros. Éstas son las constantes universales genuinas del sistema teórico que no tienen nada que ver con unidades convencionales.*

Supongamos que sus c_1, c_2, c_3 son las c, h y G de Planck; entonces no hay manera de combinarlas en potencias de modo que se pueda obtener un número puro sin dimensiones⁷⁰. Para hacerlo necesitaríamos multiplicar por algunas otras constantes dimensionales de la Naturaleza. Por ejemplo, multiplicando G/hc por el cuadrado de alguna masa, pongamos por caso la masa de un protón, obtenemos el número puro Gm_{pr}^2/hc , llamémosle c_4^* , que es aproximadamente igual⁷¹ a 10^{-38} . El número «estrellado» que

⁷⁰ Si se escogen e, h y c , entonces la combinación adimensional es e^2/hc . Este hecho fue explotado por Hartree, quien creó un conjunto de unidades para las investigaciones en física atómica que utiliza e, h, c y la masa del electrón m_e .

⁷¹ Es igual a la razón de masas $(m_{\text{pr}}/m_{\text{pl}})^2 = (10^{-24} \text{ g}/10^{-5} \text{ g})^2 \approx 10^{-38}$ donde m_{pl} es la masa fundamental de Planck.

acabamos de crear se obtiene al medir en masas de Planck alguna constante de la Naturaleza con unidades de masa. Podríamos obtener otros dividiendo algún tiempo por el tiempo de Planck o alguna longitud por la longitud de Planck. Son estos números «estrellados» puros los que Einstein considera como los más fundamentales. Independientemente de qué unidades se utilicen para medirlos o expresarlos, siempre tienen el mismo valor. ¿De dónde proceden? ¿Qué los determina? ¿Por qué Gm_{pr}^2/hc es aproximadamente igual a 10^{-38} en lugar de a 10^3 o a 10^{-68} ? Einstein no lo sabe, pero cree con firmeza en que están determinados absolutamente⁷². No hay libertad para que sean diferentes:

*Mi esperanza ahora es que estas constantes c^*_4 etc., deben ser números básicos cuyos valores quedan establecidos por el fundamento lógico de la teoría entera.*

O podría decirse así: en una teoría razonable no hay números adimensionales cuyos valores sean determinables sólo empíricamente.

Por supuesto, no puedo demostrarlo. Pero soy incapaz de imaginar una teoría unificada y razonable que contenga de forma explícita un número que el capricho del Creador pudiera haber elegido de otro modo, con lo que la legitimidad del mundo resultante habría sido cualitativamente distinta.

O podría decirse así: una teoría que en sus ecuaciones fundamentales contenga explícitamente una constante no básica

⁷² Einstein señala que éste no es un procedimiento que se pueda llevar a cabo completamente en toda la física actual porque no conocemos todas las leyes y las fórmulas que la gobiernan.

tendría que estar construida de algún modo a partir de fragmentos y piezas que son lógicamente independientes unos de otros; pero confío en que este mundo no sea tal que se necesite una construcción tan fea para su comprensión teórica.

En otro lugar se cita a Einstein diciendo que lo que realmente le interesa es si «Dios tuvo alguna elección al hacer el mundo». Lo que quería decir con esta críptica afirmación queda claro con el pasaje de su carta a Rosenthal-Schneider. Quiere saber si las constantes adimensionales de la Naturaleza podrían haber tenido valores numéricos diferentes sin cambiar las leyes de la física o si hay solamente una elección posible para ellas. Yendo más lejos, podría preguntar si son posibles diferentes elecciones de sus valores para diferentes leyes de la Naturaleza. Aún no lo sabemos⁷³.

El esclarecedor intercambio de cartas con Rosenthal-Schneider sobre las constantes termina el 24 de marzo de 1950 con Einstein reiterando su visión «religiosa» de que Dios no tuvo ninguna elección cuando llegó a las constantes fundamentales y sus valores:

⁷³ En la época en que Einstein mantenía correspondencia sobre estas materias, las únicas ideas que existían sobre por qué las constantes tomaban los valores que tomaban eran las de Eddington, que no eran acogidas con mucho entusiasmo por otros físicos. Einstein comentaba la numerología de Eddington en una carta posterior, de 23 de abril de 1949, a Rosenthal-Schneider. Ella le había escrito preguntando si podía hacer citas de sus cartas en el artículo que le habían solicitado para el volumen dedicado a Einstein en la Biblioteca de Filósofos Vivos. Él responde: «Puedes hacer uso de mis comentarios en tu tratado; no obstante, hay que decir que éstos no son en absoluto afirmaciones categóricas, sino meras conjeturas basadas en la intuición. Eddington hizo muchas sugerencias ingeniosas, pero yo no las he seguido. Encuentro que tenía una regla curiosamente acrítica para sus propias ideas. No sentía la necesidad de que una construcción teórica fuera lógicamente muy simple si iba a tener cualquier oportunidad de ser cierta».

Las constantes adimensionales en las leyes de la Naturaleza, que desde el punto de vista puramente lógico pueden también tener diferentes valores, no deberían existir. Para mí, con mi «confianza en Dios», esto parece evidente, pero habrá pocos que sean de la misma opinión.

Cuando dejamos los pensamientos de Einstein sobre lo inevitable de las constantes de la Naturaleza es interesante señalar la opinión de otros grandes físicos que se han visto impulsados a especular sobre la importancia y accesibilidad de una comprensión final de sus valores. Tomemos a George Gamow, el excéntrico físico ruso que arriesgó su vida al escapar de la Unión Soviética para vivir y trabajar en América, donde se convirtió en uno de los fundadores de la cosmología moderna e incluso contribuyó a la comprensión inicial de la molécula de ADN y el código genético. Gamow, como todos sus contemporáneos, podía ver que había cuatro fuerzas distintas en la Naturaleza (gravedad, electromagnetismo, fuerzas débil y fuerte). La intensidad de cada una de ellas daría uno de los números puros de Einstein que definen el mundo. Gamow no se veía particularmente atraído por la cuestión de si podía haber sólo un cuarteto de valores posibles. Pero comprender plenamente esos valores —una capacidad de calcularlos o predecirlos de forma precisa— sería para él lo mismo que para un físico el ondear de la bandera a cuadros. Cuando llegara ese día se habría alcanzado una comprensión completa de las fuerzas de la Naturaleza. Gamow se siente un poco deprimido ante esta perspectiva, comparable a llegar al final de una

gran historia o sentarse en la cima de una montaña que uno se ha esforzado en escalar, pues:

Cuando finalmente se descubran todas las leyes que gobiernan los fenómenos físicos y todas las constantes empíricas que intervienen en dichas leyes sean finalmente expresadas a través de las cuatro constantes básicas independientes, podremos decir que la ciencia física ha llegado a su final, que no aguarda ninguna emoción para exploraciones posteriores, y que todo lo que queda para un físico es o bien un trabajo tedioso sobre detalles menores del estudio auto-educativo o la adoración de la magnificencia del sistema completo. En esa fase la ciencia física dejará la época de Colón y Magallanes y entrará en la época del National Geographic Magazine⁷⁴.

§. El significado más profundo de las unidades de Stoney-Planck: el nuevo mapamundi

Un anillo para gobernarlos, un anillo para descubrirlos.

Un anillo para llevarlos y unirlos en la oscuridad.

J. R. R. TOLKIEN⁷⁵

La interpretación de las unidades naturales de Stoney y Planck no era en absoluto obvia para los físicos. Aparte de ocasionales

⁷⁴ G. Gamow, «Any physics tomorrow?», *Physics Today*, enero de 1949.

⁷⁵ J. R. R. Tolkien, *El señor de los anillos*, Minotauro, Barcelona.

comentarios de pasada, sólo a finales de la década de 1960 el estudio renovado de la cosmología llevó a una plena comprensión de estos patrones extraños. Uno de los curiosos problemas de la física es que tiene dos teorías hermosamente efectivas —la mecánica cuántica y la relatividad general— pero gobiernan diferentes dominios de la Naturaleza.

La mecánica cuántica domina en el micromundo de los átomos y de las partículas elementales. Nos enseña que en la Naturaleza cualquier masa, por sólida o puntual que pueda parecer, tiene un aspecto ondulatorio. Esta onda no es como una onda de agua. Se parece más a una ola delictiva o una ola de histeria: es una onda de información. Nos indica la probabilidad de detectar una partícula. Si una onda electrónica pasa a través de un detector, será más probable descubrirla, igual que es más probable que usted sufra un robo si una ola delictiva incide en su vecindad. La longitud de onda cuántica de una partícula se hace menor cuanto mayor es la masa de la partícula. La ondulatoriedad cuántica domina las situaciones cuando la longitud de onda cuántica de sus participantes supera su tamaño físico. Los objetos cotidianos, como los automóviles y las bolas de cricket a gran velocidad, tienen masas tan grandes que sus longitudes de onda cuánticas son muchísimo más pequeñas que sus tamaños, de modo que podemos despreciar las influencias cuánticas cuando conducimos automóviles u observamos partidos de cricket.

Por el contrario, la relatividad general era siempre necesaria cuando se trataba con situaciones donde algo viaja a la velocidad de la luz,

o está muy cerca o donde la gravedad es muy intensa. Se utiliza para describir la expansión del Universo o el comportamiento en situaciones extremas, como la formación de agujeros negros. Sin embargo, la gravedad es muy débil comparada con las fuerzas que unen átomos y moléculas y demasiado débil para tener cualquier efecto sobre la estructura de átomos o partículas subatómicas.

Como resultado de estas propiedades, la teoría cuántica y la gravitación gobiernan reinos diferentes que tienen poca ocasión de hablar entre sí. Esto es una suerte. Nadie sabe cómo unir sin fisuras la dos teorías para formar una nueva versión, mayor y mejor, que pudiera tratar con los aspectos cuánticos de la gravedad. Ninguna candidata ha sido examinada. Pero ¿cómo podemos decir cuándo es esencial una teoría semejante? ¿Cuáles son los límites de la teoría cuántica y de la teoría de la relatividad general de Einstein? Afortunadamente, hay una respuesta simple y las unidades de Planck nos dicen cuál es.

Supongamos que tomamos toda la masa del Universo visible⁷⁶ y determinamos su longitud de onda cuántica. Podemos preguntarnos en qué momento esta longitud de onda cuántica del Universo visible superará su tamaño. La respuesta es: cuando el Universo sea más pequeño en tamaño que la longitud de Planck (10^{-33} centímetros), más joven que el tiempo de Planck (10^{-43} segundos) y supere la temperatura de Planck (10^{32} grados). Las unidades de Planck marcan la frontera de aplicación de nuestras teorías actuales. Para

⁷⁶ Cuando el Universo tiene edad T , el Universo visible tiene tamaño cT , donde c es la velocidad de la luz.

entender a qué se parece el mundo a una escala menor que la longitud de Planck tenemos que comprender plenamente cómo se entrelaza la incertidumbre cuántica con la gravedad. Para entender lo que podría haber sucedido cerca del suceso que estamos tentados a llamar el principio del Universo, o el principio del tiempo, tenemos que penetrar la barrera de Planck. Las constantes de la Naturaleza marcan las fronteras de nuestro conocimiento existente y nos muestran los primeros límites de nuestras teorías.

En los intentos recientes de crear una nueva teoría para describir la Naturaleza cuántica de la gravedad ha emergido un nuevo significado para las unidades naturales de Planck. Parece que el concepto al que llamamos «información» tiene un significado profundo en el Universo. Estamos habituados a vivir en lo que a veces se llama «la edad de la información». La información puede ser empaquetada en formas electrónicas, enviada rápidamente y recibida con más facilidad que nunca antes.

Nuestra evolución en el procesado rápido y barato de la información se suele mostrar en una forma que nos permite comprobar la predicción de Gordon Moore, el fundador de Intel, llamada ley de Moore (ver figura 3.2).

En 1965, Moore advirtió que el área de un transistor se dividía por dos aproximadamente cada 12 meses. En 1975 revisó su tiempo de reducción a la mitad hasta situarlo en 24 meses.

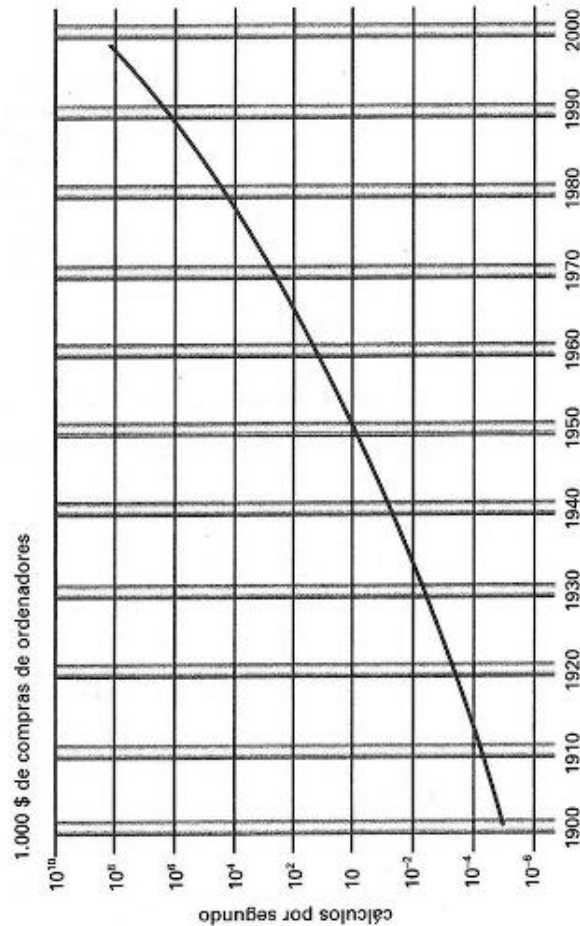


Figura 3.2. La ley de Moore muestra la evolución de la velocidad de procesamiento de los ordenadores frente al tiempo. Cada dos años se duplica el número de transistores que pueden empaquetarse en un área dada de un circuito integrado. Esta división bienal por dos del tamaño de los transistores significa que la velocidad de computación de cada transistor se duplica cada dos años por el mismo coste.

Ésta es «la ley de Moore»: cada 24 meses se obtiene una circuitería de ordenador aproximadamente doble, que corre a velocidad doble, por el mismo precio puesto que el coste del circuito integrado permanece aproximadamente constante.

Los límites últimos que podemos esperar para el almacenamiento y los ritmos de procesamiento de la información están impuestos por las constantes de la Naturaleza. En 1981, un físico israelí, Jakob Bekenstein, hizo una predicción inusual que estaba inspirada en su estudio de los agujeros negros. Calculó que hay una cantidad máxima de información que puede almacenarse dentro de cualquier volumen. Esto no debería sorprendernos. Lo que debería hacerlo es que el valor máximo está precisamente determinado por el área de la superficie que rodea al volumen, y no por el propio volumen. El número máximo de bits de información que puede almacenarse en un volumen viene dado precisamente por el cómputo de su área superficial en unidades de Planck. Supongamos que la región es esférica. Entonces su área superficial es precisamente proporcional al cuadrado de su radio, mientras que el área de Planck es proporcional a la longitud de Planck al cuadrado (10^{-66} cm²). Por lo tanto, el número total de bits en una esfera de R centímetros de radio está dado por $10^{-66} \times R^2$.

Esto es muchísimo mayor que cualquier capacidad de almacenamiento de información producida hasta ahora. Asimismo, hay un límite último sobre el ritmo de procesamiento de información que viene impuesto por las constantes de la Naturaleza.

Es también muy notable que seamos capaces de utilizar las unidades de Planck y Stoney para clasificar todo el abanico de

estructuras que vemos en el Universo, desde el mundo de las partículas elementales hasta las más grandes estructuras astronómicas.

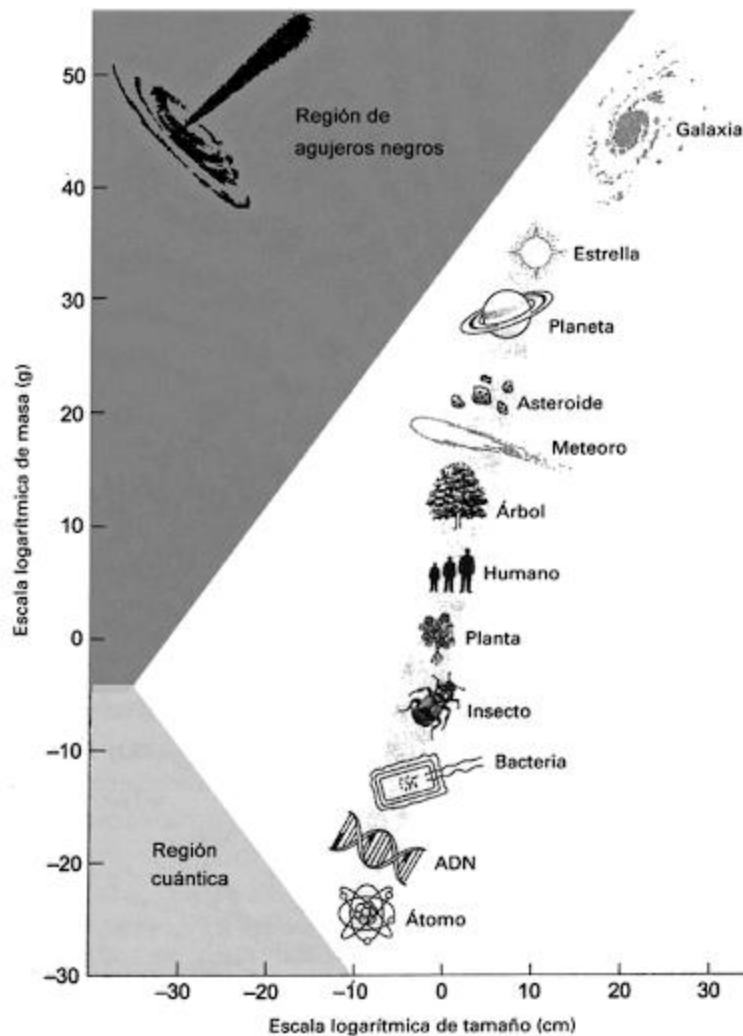


Figura 3.3. La pauta con que las estructuras observadas en el Universo llenan el plano tamaño-masa esta dictada por tres factores. La línea de densidad atómica constante, la que marca la región de agujero negro en que los objetos estarían dentro de agujeros negros y la que marca el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica que separa la región cuántica en que no pueden mantenerse

simultáneamente los conceptos habituales de tamaño y masa. La mayoría de las estructuras familiares del Universo están sobre o próximas a la línea de densidad atómica constante. En esta línea la masa de los objetos sólidos es proporcional a su volumen⁷⁷.

Este fenómeno se expone en la figura 3.3. Las estructuras mostradas en esta imagen son las entidades estables que existen en el Universo. Existen porque son malabarismos estables entre fuerzas competidoras de atracción y repulsión. Por ejemplo, en el caso de un planeta, como la Tierra, hay un equilibrio entre la fuerza atractiva de la gravedad y la repulsión atómica que aparece cuando los átomos se comprimen demasiado juntos. Todos estos equilibrios pueden expresarse aproximadamente en términos de dos números puros creados a partir de las constantes e , h , c , G y m_{pr}

$$\alpha = 2\pi e^2/hc \approx 1/137 \text{ y } \alpha_G = Gm_{pr}^2/hc \approx 10^{-38}$$

Hay tres cosas interesantes que decir sobre esta imagen. En primer lugar, notemos que la mayoría de los objetos están a lo largo de una línea recta que corre en diagonal hacia arriba de izquierda a derecha. Esta línea corresponde al camino de densidad constante, que es igual a lo que llamamos «densidad atómica». Todo lo que está hecho de átomos tiene una densidad muy próxima a la densidad de un único átomo dada por la masa de un átomo dividida por su

⁷⁷ Basado en el diagrama de B. J. Carr y M. I. Rees, «The anthropic principle and the structure of the physical world», *Nature* 278, 605 (1979).

volumen⁷⁸. En segundo lugar, en esta imagen hay algunas grandes regiones vacías. Si añadimos la línea que define dónde se sitúan los agujeros negros y sus regiones interiores, obtenemos la totalidad del triángulo superior izquierdo de la imagen. Nada de esta región puede verse. Su gravedad sería demasiado intensa para permitir que escape la luz. Del mismo modo, nada sería detectable en el triángulo del rincón inferior izquierdo. Esta «región cuántica» contiene objetos tan pequeños que el acto de observarlos les perturbaría y les llevaría a otra parte de la imagen. Esta es la región guardada por el principio de incertidumbre de Heisenberg. Nada dentro de ella es observable. Sin embargo, nos ofrece el tercer punto de interés. Nótese que la línea cuántica corta a la línea de agujeros negros. Aquí colisionan la gravedad y la realidad cuántica. Y cuál es este punto: tiene la masa de Planck y el tamaño de Planck. Las unidades de Planck son el fulcro en torno al cual giran las escalas de la realidad.

§. Ultramundaneidad

¿Por qué George Best dejó el partido Barcelona-Manchester United cinco minutos antes del final? Porque lo estaba grabando en el vídeo y no quería saber el resultado.

⁷⁸ Aproximadamente una masa de 10^{-24} g en cada volumen de $(10^{-8} \text{ cm})^3$. Ésta es aproximadamente la densidad del agua. 1 gramo por cm^3 , y la mayoría de los demás sólidos, líquidos y gases no se apartan mucho de ésta en densidad

*ANGUS DEAYTON*⁷⁹

La identificación de constantes adimensionales de la Naturaleza como α y α_G , junto con los números que desempeñan el mismo papel definitorio para las fuerzas débil y fuerte de la Naturaleza, nos anima a pensar por un momento en mundos diferentes del nuestro. Estos otros mundos pueden estar definidos por leyes de la Naturaleza iguales a las que gobiernan el Universo tal como lo conocemos, pero estarán caracterizadas por diferentes valores de constantes adimensionales. Estos cambios numéricos alterarán toda la fábrica de los mundos imaginarios. Los equilibrios entre sus fuerzas serán diferentes de los que se dan en nuestro mundo. Los átomos pueden tener propiedades diferentes. La gravedad puede tener un papel en el mundo a pequeña escala. La Naturaleza cuántica de la realidad puede intervenir en lugares insospechados. La legitimidad de este pequeño experimento mental está íntimamente ligada a las profundas preguntas de Einstein. Si las leyes de la Naturaleza permiten uno y sólo un conjunto de valores para las constantes de la Naturaleza, entonces la libertad que parecemos tener para considerar mundos en los que sean diferentes no es más que una consecuencia de nuestra relativa ignorancia. Pensamos que hay libertad para cambiar sus valores sin limitaciones solamente porque no entendemos en qué medida dichos valores son intrínsecos a las formas de las propias leyes. Por el contrario, si las constantes no están unívocamente determinadas

⁷⁹ Programa de televisión británico *They Think It's All Over* de diciembre de 1999.

por la única forma posible para las leyes de la Naturaleza, entonces pueden existir otros mundos donde tomen valores diferentes.

La última lección importante que aprendemos de la manera en que números puros como α definen el mundo es el verdadero significado de que los mundos sean diferentes. El número puro que llamamos constante de estructura fina, α , es una combinación de la carga del electrón, e , la velocidad de la luz, c , y la constante de Planck, h . Inicialmente podríamos estar tentados a pensar que un mundo en el que la velocidad de la luz fuera más lenta sería un mundo diferente. Pero sería un error. Si c , h y e cambian de modo que sus valores que tienen en unidades métricas (o cualesquiera otras) fueran diferentes cuando las buscamos en nuestras tablas de constantes físicas pero el valor de α permaneciera igual, este nuevo mundo sería *observacionalmente* indistinguible de nuestro mundo. Lo único que cuenta en la definición del mundo son los valores de las constantes adimensionales de la Naturaleza. Si se duplica el valor de todas las masas, no se puede llegar a saber porque todos los números puros definidos por las razones de cualquier par de masas son invariables.

§. El principio supercopernicano

Un físico es un matemático con sentido de la realidad.

NORMAN PACKARD⁸⁰

⁸⁰ Citado en T. A. Bass, *The Predictors*, Penguin, Londres, 2000, p. 172.

El nombre del gran astrónomo polaco Nicolás Copérnico está unido para siempre al paso que dejaba atrás la presunción de que la Tierra está en el centro de las cosas. En tiempos de Copérnico existía la hipótesis, sostenida durante miles de años, según la cual la Tierra ocupaba el centro del sistema solar que era el foco de atención. Copérnico construyó una imagen de los movimientos de los planetas alrededor del Sol en que la Tierra ya no estaba en el centro. Con el tiempo este modelo heliocéntrico se mostró como la mejor descripción de lo que veían los astrónomos, superando la potencia explicativa de la antigua imagen centrada en la Tierra de Ptolomeo y sus sucesores.

El impacto que tuvo sobre los siglos posteriores el salto de Copérnico, que se alejaba de los prejuicios antropocéntricos, se dejó sentir en todo el espectro de las investigaciones humanas. Empezamos a apreciar que nuestro lugar en el Universo no era ni mucho menos central. De hecho, en muchos aspectos parecía casi periférico.

El acercamiento a las constantes de la Naturaleza que no fueran explícitamente antropocéntricas, sino basadas en el descubrimiento y definición de atributos universales de la Naturaleza, puede sentirse como un segundo paso copernicano. Entonces se vio que la fábrica del Universo y la estructura central de sus leyes universales fluían de patrones e invariantes verdaderamente sobrehumanos y extraterrestres. El patrón fundamental de tiempo en la Naturaleza no guardaba ninguna relación simple con las edades de hombres y mujeres, no tenía ninguna conexión con los períodos de días, meses

y años que definían nuestros calendarios, y era demasiado corto para permitir cualquier posibilidad de medida directa.

Todavía quedaba un tercer paso por dar en esta ampliación de la perspectiva copernicana. Este consistía en poner de manifiesto que las *leyes* de la Naturaleza presentaban un aire copernicano. Esta es una cuestión mucho más sutil y se requirió una de las mayores intuiciones de Einstein para llevarla a cabo. En primer lugar, ¿qué significa?

Einstein argumentó que las leyes de la Naturaleza deberían aparecer iguales para todos los observadores en el Universo, con independencia de dónde estuvieran o cuál fuera su movimiento. De no ser así, entonces existirían observadores privilegiados a quienes las leyes de la Naturaleza parecerían más sencillas que a otros observadores. Una opinión semejante sería anticopernicana; daría a alguien (no necesariamente a nosotros en la Tierra) una posición especial en el Universo. De entrada uno podría pensar que tener constantes universales de la Naturaleza basadas en patrones físicos sobrehumanos bastaría para garantizar que las cosas parecieran iguales para todos. Sin embargo, queda lejos de ser suficiente. Un caso clásico es el de las famosas leyes del movimiento de Newton. Tomemos la primera ley como ejemplo. Nos dice que los cuerpos sobre los que no actúan fuerzas no se aceleran sino que permanecen en reposo o en movimiento a velocidad constante. Sin embargo, como Newton apreció muy claramente, esta famosa ley «universal» en realidad no es universal. Sólo será verdadera para una clase especial de observadores del Universo, los denominados

observadores «inerciales». Los observadores inerciales son aquellos que no se están acelerando ni rotan con relación a un telón de fondo cósmico imaginario del espacio que se define por las estrellas más lejanas⁸¹. Estos observadores violan por consiguiente el imperativo copernicano. Ven un Universo cuyas leyes son especialmente simples. Para entender por qué es así, imagine que usted está situado dentro de una nave espacial por cuyas ventanas puede observar las invariables estrellas lejanas. Supongamos ahora que se encienden los motores del cohete para hacer que la nave espacial gire. Si usted mira por las ventanas verá que las estrellas están rotando (en sentido contrario) en la extensión del espacio. Por consiguiente, estas estrellas darán la impresión de estar acelerándose⁸² incluso si sobre ellas no actúa ninguna fuerza. La ley de Newton no parecerá ser válida para este observador no-inercial en rotación. Trabajando un poco más, el observador en rotación puede descubrir la ley que gobierna lo que él ve desde su punto de vista en rotación, pero encuentra que es más complicada que la ley que ven los observadores inerciales. Esta situación antidemocrática, que permitía que algunos observadores vieran leyes de la Naturaleza más simples que otros, era escandalosa para Einstein y un signo

⁸¹ Esto es una idealización. Las estrellas más lejanas no están perfectamente en reposo con respecto a nosotros en este sentido, pero sus movimientos son imperceptiblemente pequeños. Uno de los logros de la teoría de la gravedad y el movimiento de Einstein, que superaba a la de Newton, era acabar con este fondo imaginario de «espacio absoluto». El propio Newton fue criticado por filósofos como el obispo Berkeley por introducir un concepto semejante. Newton era consciente de su debilidad pero reconocía su utilidad para expresar una teoría del movimiento que era extraordinariamente precisa en la descripción de los movimientos locales.

⁸² El movimiento rotacional es siempre movimiento acelerado. Incluso si la velocidad de movimiento es constante, la dirección de movimiento debe cambiar continuamente para mantener el movimiento circular. Por lo tanto la velocidad está siempre cambiando. Esto es lo que se entiende por aceleración.

claro de que había algo imperfecto en la manera que eligió Newton para expresar sus leyes de la Naturaleza. Estas no podían ser leyes de la Naturaleza verdaderamente universales si sólo eran válidas para observadores especiales.

Einstein enunció lo que llamó principio de covariancia: que las leyes de la Naturaleza deberían expresarse en una forma que pareciera la misma para todos los observadores, independientemente de dónde estuvieran situados y de cómo se estuvieran moviendo. Cuando trató de desarrollar este principio, Einstein fue muy afortunado. Durante la última parte del siglo XIX, en Alemania e Italia matemáticos puros habían estado extraordinariamente ocupados en un estudio detallado de todas las geometrías posibles sobre superficies curvas. Al hacerlo habían desarrollado un lenguaje matemático que automáticamente tenía la propiedad de que toda ecuación poseía una forma que se conservaba cuando las coordenadas que la describían se cambiaban de cualquier manera. Este lenguaje se denominaba cálculo tensorial. Tales cambios de coordenadas equivalen a preguntar qué tipo de ecuación vería alguien que se moviera de una manera diferente. Uno de los más viejos amigos de Einstein era un matemático llamado Marcel Grossmann, que estaba bien informado sobre todos estos nuevos desarrollos matemáticos. Él mostró a Einstein esta nueva matemática de los tensores y poco a poco Einstein se dio cuenta de que era exactamente lo que necesitaba para dar una expresión precisa a su principio de covariancia. En cuanto expresara sus leyes

de la Naturaleza como ecuaciones tensoriales, poseerían automáticamente la misma forma para todos los observadores.

Este paso de Einstein completa un movimiento espectacular en la concepción física de la Naturaleza que ha sido completado en el siglo XX. Está marcado por una evolución que se aleja continuamente de cualquier visión privilegiada del mundo, sea una visión humana, basada en la Tierra, o una visión basada en patrones humanos. El paso se ha dado por etapas. Primero, en astronomía la revolución copernicana dio lugar a la visión de que nuestra posición en el Universo y el punto de observación que ocupamos en el espacio y el tiempo no es especialmente privilegiado. A continuación hemos visto la creación de unidades de medida y constantes de la Naturaleza que no son reflejos de dimensiones humanas o de los movimientos astronómicos locales de la Tierra y el Sol. El lugar de ello se funda sobre constantes universales de la Naturaleza que trascienden la dimensión humana. Por último, hemos visto cómo Einstein reconoció que las propias leyes de la Naturaleza deben formularse de un modo que asegure que cualquier observador en el Universo, no importa dónde esté y cómo se esté moviendo, debe encontrarlas válidas.

Estos pasos han despersonalizado la física y la astronomía en el sentido de que intentan clasificar y comprender los objetos en el Universo remitiéndose sólo a principios válidos para cualquier observador en cualquier parte. Si hemos identificado correctamente estas constantes y leyes, nos proporcionan la única base que conocemos sobre la que empezar un diálogo con inteligencias

extraterrestres diferentes de nosotros. Son la última experiencia compartida por cualquiera que habite en nuestro Universo.

Capítulo 4

Más lejos, más profundo, más simple: la búsqueda de una Teoría de Todo

Los físicos están formados para investigar un problema antes de llegar a una decisión. Los abogados, los publicistas y demás están formados para hacer exactamente lo contrario: buscar datos para confirmar una decisión que ya se ha tomado.

ROBERT CREASE⁸³

§. Números con los que se puede contar

Para mí una ecuación no tiene significado a menos que exprese un pensamiento de Dios.

SRINIVASA RAMANUJAN⁸⁴

Desde tiempos inmemoriales, se hizo cada vez más evidente para nuestros antepasados que en la Naturaleza se daban sucesos predecibles e impredecibles. Los aspectos impredecibles de las cosas eran peligrosos y temibles. Quizá eran castigos enviados por los dioses para mostrar su disgusto por el comportamiento humano.

⁸³ R. P. Crease, «Do physics and politics mix?», *Physics World*, febrero de 2001, p. 17.

⁸⁴ Citado en C. Pickover, *The Loom of God*, Plenum, Nueva York, 1997, p. 26.

También eran notables; como resultado, las crónicas antiguas tienen mucho que decir sobre plagas, desastres y pestilencias. De menos interés periodístico, pero en definitiva más importantes, eran las predecibilidades metronómicas de la Naturaleza. Advirtiéndolo y explotando los cambios periódicos del entorno, podían prepararse las cosechas, hacer acopio para el invierno y construir defensas contra las incursiones del viento y el agua. Estas regularidades de la Naturaleza se reflejaron en las regularidades que estructuraron las sociedades estables y generaron una creencia en la ley y el orden a escala cósmica. Finalmente, ayudadas por la fe monoteísta de muchas sociedades occidentales⁸⁵, estas creencias alimentaron la idea de que existían cosas llamadas «leyes de la Naturaleza» que son válidas en todos los tiempos y lugares. Estas leyes universales prescriben el modo en que se comportarán las cosas y no, como las leyes humanas, el modo en que deberían comportarse.

Hemos llegado a comprender que las leyes de cambio siempre pueden reemplazarse por el requisito de que algún otro aspecto de la Naturaleza no cambie: es lo que se llama un principio de conservación o una invariancia de la Naturaleza. Se cree que la energía es un ejemplo primordial. Puede ser intercambiada y reorganizada de formas diferentes pero, al final, cuando se hace la suma, la energía total debe ser siempre la misma.

Hacia la década de 1970 los físicos estaban tan impresionados por esta correspondencia entre leyes de la Naturaleza y pautas

⁸⁵ J. D. Barrow, *The Universe that Discovered Itself*, Oxford University Press, Londres 1990, discute el desarrollo del concepto de «leyes» de la Naturaleza con mayor detalle.

invariables que empezaron a explorar el catálogo de pautas invariables en busca de candidatos para las leyes de cambio asociadas. Su búsqueda fue extraordinariamente exitosa. Las cuatro fuerzas básicas de la Naturaleza —gravedad, electricidad y magnetismo, radiactividad e interacciones nucleares— eran descritas por teorías de este tipo. Cada una de estas cuatro fuerzas de la Naturaleza corresponde a una pauta independiente que se conserva cuando algo sucede en la Naturaleza: cuando un núcleo radiactivo se desintegra o un imán en movimiento en la dinamo de una bicicleta produce una corriente eléctrica.

Todo esto eran buenas noticias para los físicos. A mediados de la década de 1970 tenían teorías separadas de la gravedad, el electromagnetismo, la fuerza débil (de la que deriva la radiactividad) y la fuerza fuerte (de la que derivan las fuerzas nucleares) que estaban de acuerdo con los sucesos observados. La conservación de una pauta invariable en cada caso requería que existiese la respectiva fuerza de la Naturaleza y determinaba en detalle cómo y sobre qué debería actuar.

Pero aún no estaban contentos. ¿Por qué debería el mundo estar gobernado por *cuatro* pautas invariables diferentes? Incluso si entre sus opiniones religiosas se incluye la noción de un sagrado cuadrivio, debería sentirse más instintivamente impulsado a considerar *una* pauta y una única ley unificada de la Naturaleza como la perspectiva más estética, lógica y físicamente atractiva. Cualquier sugerencia de que el Universo pudiera ser una mezcla de leyes diferentes que no guardan ninguna relación es dar una patada

a un mundo que se considera una chapuza. Por supuesto, esto no es una prueba de que el Universo sea realmente una única pieza de legislación en armonía ni de que sea una colección de principios en conflicto ocasional⁸⁶. De hecho, como los Estados Unidos descubrieron acerca de su Constitución tras la elección presidencial de 2000, uno podría creer lo primero pero darse cuenta de que la realidad está más cerca de lo segundo. Sin embargo, hasta que haya una prueba real a favor de lo contrario, los científicos suponen prudentemente que, sea cual sea el responsable de las pautas que llamamos «leyes de la Naturaleza», es mucho más inteligente que nosotros y no habrá pasado por alto las claras y bellas pautas que nos resultan evidentes. Tampoco esta humilde creencia es meramente un ejercicio de piadosa abnegación. Se basa en la experiencia anterior. Una y otra vez hemos encontrado que las leyes de la Naturaleza son más inteligentes, más abstractas y menos arbitrarias de lo que habíamos imaginado previamente.

Esta creencia en la simplicidad y unidad últimas que hay tras las reglas que constriñen el Universo nos lleva a esperar que exista una única pauta invariable detrás de las apariencias. Bajo condiciones diferentes esta única pauta cristalizará en pautas superficialmente distintas que se manifiestan como las cuatro fuerzas independientes que gobiernan el mundo circundante. Poco a poco se ha llegado a clarificar el funcionamiento probable de esta pauta.

⁸⁶ No esperamos que todo resultado posible de las leyes de la Naturaleza exista en realidad. Así, el mundo real es un subconjunto de todos los mundos posibles. Es una cuestión interesante respecto a cuál es la objeción a un mundo en el que hay inconsistencias lógicas en los resultados de las leyes pero que no se manifiestan en ningún resultado real.

Hemos aprendido que las fuerzas de la Naturaleza no son tan diferentes como parece a primera vista. Parecen tener intensidades muy diferentes y actuar sobre partículas elementales diferentes. Pero esto es una ilusión creada por nuestra necesidad de habitar un lugar en el Universo donde la temperatura es más bien baja; suficientemente baja para que existan átomos y moléculas. Conforme la temperatura aumenta y las partículas elementales de materia colisionan entre sí a energías cada vez más altas, las fuerzas separadas que gobiernan nuestro mundo quiescente a baja temperatura se hacen cada vez más parecidas. Las fuerzas fuertes se debilitan y las fuerzas débiles se fortalecen. Aparecen nuevas partículas a medida que se alcanzan temperaturas más elevadas y consiguen producir interacciones entre las familias separadas de partículas que, a bajas temperaturas, parecen estar aisladas entre sí. Poco a poco, a medida que alcanzamos esas inimaginables condiciones de la temperatura «última» que Max Planck encontró definida por las cuatro constantes de la Naturaleza, G , k , c y h , esperamos que las diferencias se vayan borrando completamente y que las fuerzas de la Naturaleza presenten al fin un único frente unido.

§. Cubismo cósmico

Puede decirse que hay dos clases de personas en el mundo: las que constantemente dividen a las

*personas del mundo en dos clases
y las que no lo hacen.*

ROBERT BENCHLEY⁸⁷

El físico soviético George Gamow creó un memorable héroe de ficción en una serie de libros que narraban las hazañas de C. G. H. Tompkins, un empleado de banca con un indomable interés por la ciencia moderna⁸⁸ (ver figura 4.1).

El artificio de Gamow para explicar los aspectos novedosos de la física cuántica y la relatividad fue crear un mundo de ficción donde los efectos estaban enormemente amplificadas. Esto se hace, en efecto, cambiando los valores de las constantes de la Naturaleza. Si la velocidad de la luz fuera de trescientos kilómetros por hora en lugar de trescientos mil kilómetros por segundo⁸⁹, entonces los peculiares efectos del movimiento sobre el ritmo del paso del tiempo y la medida de la distancia se convertirían en características de la experiencia cotidiana. Usted no podría conducir un automóvil sin ser plenamente consciente de ello.

⁸⁷ Citado en J. A. Paulos, *I Think, Therefore I Laugh*, Columbia University Press, Nueva York, 1985, p. 35.

⁸⁸ Ver, por ejemplo, la moderna reimpresión G. Gamow, *Mr. Tompkins in Paperback*, Cambridge University Press, Cambridge, 1949. [Hay traducción española: *Breviario del Sr. Tompkins*, Fondo de Cultura Económica de España, Madrid, 1993]. Una versión actualizada y ampliada de algunas experiencias educativas de Mr. Tompkins puede encontrarse bajo la dirección editorial de Russell Stannard.

⁸⁹ La velocidad de la luz fue brillantemente deducida por primera vez por el astrónomo danés Olaf Roemer en 1676. Advirtió que los intervalos de tiempo que transcurrían entre los eclipses de una de las lunas de Júpiter se alargaban cuando la Tierra se estaba alejando de Júpiter pero se acortaban cuando se aproximaba a él. Encontró una diferencia de tiempo promedio de 996 segundos entre eclipses a partir de muchas observaciones hechas en el curso de un año. Roemer atribuyó esta diferencia de tiempo al hecho de que la luz tenía una velocidad finita. Así pues, razonó, la luz debe necesitar 996 segundos para atravesar una distancia igual al diámetro de la órbita de la Tierra. Esta distancia era conocida de forma precisa, ya entonces, y le permitió obtener una muy buena estimación de la velocidad de la luz.



Figura 4.1. El indomable C. G. H. Tompkins, el héroe epónimo de la fantasía científica de George Gamow, Mr. Tompkins en el país de las maravillas⁹⁰.

Asimismo, si la constante de Planck fuera mucho mayor, entonces los aspectos ondulatorios cuánticos de la materia serían continuamente evidentes. Cuando Tompkins golpea una bola de billar con su taco, descubre que ésta sigue muchos caminos simultáneamente, en lugar del único camino definido en el que todos ellos se combinan en un mundo como el nuestro, donde los efectos cuánticos son muy pequeños⁹¹.

⁹⁰ Gamow, *Mr. Tompkins in Paperback*, p. I.

⁹¹ Hay que permitirle aquí a Gamow una licencia artística. Como explicamos en el capítulo anterior, variar simplemente las constantes dimensionales de la Naturaleza, como la velocidad

Las iniciales C. G. H. de Tompkins testimonian la importancia capital de las constantes de la Naturaleza que caracterizan la gravedad (G), la realidad cuántica (h) y la luz (c). Podemos utilizarlas para esbozar una imagen sencilla de las correspondencias entre diferentes leyes de la Naturaleza. Sólo tenemos que apreciar un simple principio. Cuando G se hace igual a cero estamos desconectando la fuerza de la gravedad e ignorándola; cuando h se hace igual a cero estamos ignorando la Naturaleza cuántica del Universo por la cual las energías sólo pueden tomar valores concretos, como peldaños de una escalera. El tamaño de los peldaños está determinado por h : si h fuera cero no habría saltos y la energía de un átomo podría cambiar en cualquier valor, por pequeño que fuera⁹². En tercer lugar, cuando c se hace igual a infinito (o, lo que es lo mismo, $1/c = 0$), las señales luminosas se mueven con velocidad infinita. Esta era la imagen del mundo en la época de Newton, con la gravedad actuando instantáneamente entre la Tierra y el Sol.

En el primer nivel de generalidad tenemos:

MN: mecánica de Newton ($G = h = 1/c = 0$).

En el segundo nivel tenemos:

GN: teoría de la gravedad de Newton ($h = 1/c = 0, G \neq 0$)

de la luz, no lleva a ninguna diferencia observacional en el comportamiento del mundo si también varían otras constantes de modo que todas las constantes adimensionales sigan siendo las mismas.

⁹² El valor no-nulo de h es importante para la estabilidad de la materia. Si la energía de un átomo pudiera cambiar en una cantidad arbitrariamente pequeña, todos los átomos se harían pronto muy diferentes. Los impactos de otros átomos y de la radiación cambiarían continuamente sus niveles energéticos. La constante h es suficientemente grande para que los átomos necesiten una enorme «patada» antes de que puedan ser desplazados al siguiente nivel permitido.

RE: teoría de la relatividad especial de Einstein, que excluye la gravedad ($h = G = 0$; $1/c \neq 0$)

MC: mecánica cuántica ($G = 1/c = 0$; $h \neq 0$)

En el tercer nivel tenemos:

RG: teoría de la relatividad general de Einstein, que añade la gravedad a la relatividad especial ($h = 0$; $G \neq 0$; y $1/c \neq 0$)

MCR: mecánica cuántica relativista ($G = 0$, $h \neq 0$, $1/c \neq 0$)

GNC: gravedad newtoniana cuántica, ($1/c = 0$, $h \neq 0$, $G \neq 0$)

Y finalmente, una «Teoría de Todo» unificada aún por descubrir.

TOE: gravedad cuántica relativista ($1/c \neq 0$, $h \neq 0$, $G \neq 0$)

Este diagrama ilustra también cómo las teorías mayores y más nuevas contienen a sus predecesoras como casos límite que pueden recuperarse tomando un límite apropiado: $1/c \rightarrow 0$, $h \rightarrow 0$, o $G \rightarrow 0$.

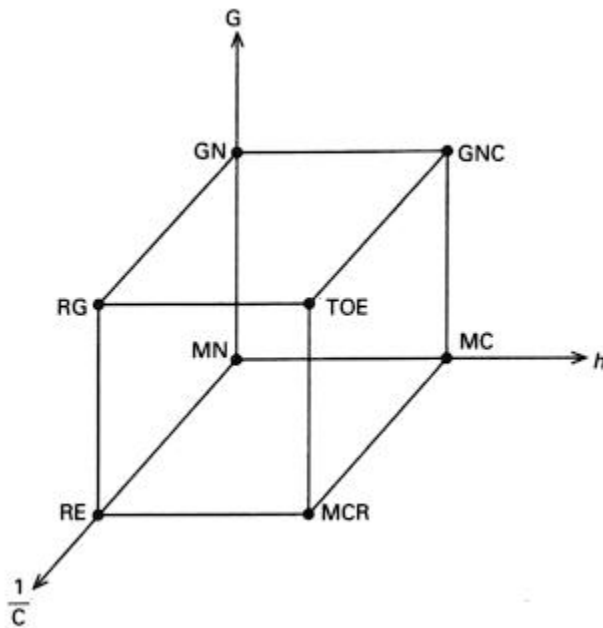


Figura 4.2. Cómo controlan la estructura de las teorías físicas las constantes G , c y h . Cuando $G = 0$, la gravedad no actúa; cuando $h =$

0, no hay cuantización de la energía en la Naturaleza; cuando c es igual a infinito o $1/c = 0$, no hay velocidad máxima para la transmisión de información y la relatividad está omitida.

Representando simplemente valores representativos no nulos o valores nulos de G , h o $1/c$ podemos identificar las localizaciones de teorías de la física cada vez más generales.

Ahora podemos formar una imagen tridimensional de las posibilidades dibujando un cubo⁹³ cuyos ejes midan el tamaño de h , G y $1/c$ mostrado en la figura 4.2.

Nuestro cubo tiene ocho vértices y cada uno representa una teoría física diferente. La más sencilla está en el origen de la gráfica donde no se incluye la gravedad ($G = 0$), no se incluye cuantización ($h = 0$) y se ignora la relatividad ($1/c = 0$): ésta es la mecánica newtoniana (MN). Moviéndonos hacia arriba en el eje $1/c$ mientras mantenemos $h = G = 0$, encontramos la teoría de la relatividad especial (RE). Moviéndonos horizontalmente a lo largo del eje h y manteniendo $1/c = G = 0$, generalizamos la mecánica de Newton en la mecánica cuántica (MC). Si añadimos la gravedad y nos movemos a lo largo del eje G , llegamos a la teoría de la gravedad de Newton (GN). Moviéndonos hacia arriba, manteniendo $h = 0$, llegamos a la teoría de la relatividad general de Einstein (RG), que también puede ser alcanzada sumando la gravedad a la relatividad especial.

⁹³ Según L. B. Okun, esta representación de las constantes fue introducida por primera vez por el físico ruso Matvei Bronstein a principios de la década de 1930. Por desgracia, Bronstein fue asesinado por Stalin en 1938 cuando sólo tenía 32 años. Existe una biografía (en ruso) escrita por G. E. Gorelik y V. Ya. Frenkel, *Matvei Petrovich Bronstein*, Nauka, Moscú, 1990.

Análogamente, si nos desplazamos hacia arriba desde la mecánica cuántica incorporando un valor finito de $1/c$, llegamos a la teoría cuántica de campos (TCC). Moviéndonos a lo largo del suelo, de modo que se mantiene $1/c = 0$, llegamos a la versión cuántica de la gravedad newtoniana (GNC). Finalmente, el último vértice no visitado del cubo es una teoría relativista, gravitatoria y cuántica (TOE). Es una generalización de todas las demás teorías. Aún está por descubrir. Hasta ahora los físicos han identificado varias de las denominadas «teorías de cuerdas», que son casos límite de una teoría mayor y más profunda, bautizada como teoría M (de misterio). Pero la forma de esta teoría más profunda, de la cual las teorías de cuerdas conocidas son sombras arrojadas en direcciones diferentes, es por ahora una incógnita.

La imagen que acabamos de crear revela una verdad profunda sobre la forma en que se progresa en la ciencia. El progreso científico maduro no consiste en una sucesión de revoluciones que destruyen las viejas teorías para hacer lugar a las nuevas. Si eso fuera cierto, entonces de nuestras teorías actuales solamente podríamos estar seguros acerca de su incorrección. Con el paso del tiempo, todas ellas se mostrará que son falsas. Sin embargo, la historia no se puede terminar aquí. Aquellas teorías han sido construidas sobre millones de predicciones correctas. ¿Cómo podemos tenerlo en cuenta y en qué medida?

Las teorías de Newton sobre el movimiento y la gravedad, con sus trescientos años de edad proporcionan reglas maravillosamente precisas para entender y predecir la forma en que se mueven las

cosas a velocidades mucho menores que la de la luz cuando la gravedad es muy débil. En los quince primeros años del siglo XX, Einstein dio con una teoría más profunda que podía tratar el movimiento rápido y la gravedad intensa cuando la teoría de Newton fallaba. Pero, y esto es crucial, la teoría más amplia y más profunda de Einstein se convierte en la de Newton cuando los movimientos son lentos y la gravedad es débil.

Pasó lo mismo con las teorías cuánticas revolucionarias que se descubrieron en el primer cuarto del siglo XX. Ofrecían una descripción más completa que la de Newton del funcionamiento del mundo cuando sondeamos el dominio de lo muy pequeño. Sus predicciones sobre el micromundo no-newtoniano son tremendamente precisas. Pero una vez más, cuando trabajan con objetos grandes se hacen cada vez más parecidas a la descripción newtoniana del movimiento. Así es como el núcleo de verdad dentro de una teoría pasada puede permanecer como una parte restrictiva de una teoría nueva y mejor. No parece que vaya a haber más revoluciones científicas.

Si consideramos de nuevo nuestro cubo de teorías, podemos ver las interrelaciones entre teorías viejas y nuevas. Consideremos nuestro caso, en el que la mecánica cuántica se convierte en la mecánica newtoniana cuando h se aproxima a cero. Este límite corresponde a una situación en la que los aspectos ondulatorios cuánticos de las partículas se hacen despreciables. Por esto podemos confiar plenamente en que las tricentenarias teorías de Newton del movimiento y de la gravedad se enseñarán y se utilizarán dentro de

mil años con tanta eficacia como hoy. Cualquiera que resulte ser la Teoría de Todo final, tendrá una forma restrictiva que describa el movimiento a velocidades mucho menores que la de la luz en campos gravitatorios débiles y donde los aspectos ondulatorios cuánticos de la masa sean despreciables.

Esta forma será la que encontró Newton.

§. Nuevas constantes implican nuevo trabajo

Einstein: Sabe usted, Henri, en un tiempo estudié matemáticas, pero las dejé por la física.

Poincaré: Oh, ¿de verdad Albert? ¿Y por qué?

Einstein: Porque aunque podía distinguir los enunciados verdaderos de los falsos, no podía distinguir qué hechos eran los importantes.

Poincaré: Eso es muy interesante, Albert, porque originalmente yo estudié física, pero la dejé por las matemáticas.

Einstein: ¿De verdad? ¿Por qué?

Poincaré: Porque no podía distinguir cuáles de los hechos importantes eran verdaderos.

*Conversación entre Albert Einstein
y Henri Poincaré*⁹⁴

Hemos empezado a ver algunas de las formas en que el descubrimiento de nuevas constantes de la Naturaleza puede ayudarnos a organizar nuestra comprensión del mundo. Son como faros mediante los que podemos orientarnos. Los avances reales en nuestra comprensión del mundo físico parecen implicar siempre una de estas cosas:

(I) Revelación: el descubrimiento de una nueva constante fundamental de la Naturaleza;

(II) Elevación: mejora del estatus de una constante conocida;

(III) Reducción: el descubrimiento de que el valor de una constante de la Naturaleza está determinado por los valores numéricos de otras;

(IV) Elucidación: el descubrimiento de que un fenómeno observado está gobernado por una nueva combinación de constantes;

(V) Variación: el descubrimiento de que una cantidad que se creía que era una constante de la Naturaleza no es realmente constante;

o

⁹⁴ David Singmaster informó de ello en M. Stueben y D. Sandford, *Twenty Years before the Blackboard*, Math. Assoc. of America, Washington DC, 1998, p. 95.

(VI) Enumeración: el cálculo del valor de una constante de la Naturaleza a partir de primeros principios, lo que muestra que su valor está explicado.

Como ejemplo de *revelación*, recordemos cómo la introducción de la teoría cuántica por Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg y otros nos presentó la nueva constante fundamental, h , que lleva el nombre de Planck. Dio un valor numérico finito a algo que anteriormente se suponía que era cero: el mínimo cambio de energía que puede observarse en la Naturaleza.

Otro ejemplo más reciente lo sugiere el desarrollo de una candidata para el título de «Teoría de Todo», llamada teoría de supercuerdas, en la que los ingredientes fundamentales del mundo no son partículas puntuales de masa, sino lazos o cuerdas de energía que poseen una tensión, como las gomas elásticas. Esta tensión de la cuerda es la constante definitoria básica de la teoría. Casi todas las demás propiedades del mundo se siguen de ella (aunque todavía están por calcular en la mayoría de los casos). Esta tensión de la cuerda puede revelarse tan fundamental como las unidades de Planck de masa y energía.

En cuanto al ejemplo de *elevación*, vemos cómo el desarrollo de Einstein de la teoría de la relatividad especial dio un nuevo estatus universal a la velocidad de la luz en el vacío, c . Einstein demostró que proporciona el vínculo entre los conceptos de masa (m) y energía (E) a través de su famosa fórmula $E = mc^2$. Einstein no descubrió que la luz se movía con velocidad finita. Eso había sido

observado mucho antes y ya en el siglo XIX se habían hecho mediciones precisas de la velocidad de la luz. Pero la nueva teoría del movimiento de Einstein cambió para siempre el estatus de la velocidad de la luz en el vacío. Se convirtió en la velocidad límite final. Ninguna información puede difundirse con mayor rapidez. Y, lo que es aún más fundamental, era la velocidad que todos los observadores, independientemente de su propio movimiento, deberían encontrar siempre igual. Era única entre todas las velocidades.

El descubrimiento de una *reducción* es algo que normalmente llega con posterioridad a la *revelación* o la *elevación*. Tenemos que conocer ya algunas constantes candidatas; luego tenemos que desarrollar una explicación más amplia que una sus dominios de aplicación. A menudo se encontrará que las constantes que definen cada una de las áreas que tienen que solaparse están ligadas. Esto es lo que suele suceder cada vez que los físicos consiguen crear una teoría que «unifica» dos fuerzas de la Naturaleza antes distintas. En 1967, Glashow, Weinberg y Salam propusieron una teoría que unía el electromagnetismo y la fuerza débil de la radiactividad. Esta teoría fue sometida a prueba con éxito mediante observación por primera vez en 1983 y relaciona las constantes de la Naturaleza que clasifican las intensidades de las fuerzas del electromagnetismo y la radiactividad. Los vínculos sirven para reducir el número de constantes independientes que se contemplaba.

El descubrimiento de una *elucidación* es ligeramente diferente del de una *reducción*, pero igualmente revelador. Ocurre cuando una teoría

predice que una cantidad observada —una temperatura o una masa, por ejemplo— viene dada por una nueva combinación de constantes. La combinación nos dice algo sobre la interrelación de partes diferentes de la ciencia.

Un buen ejemplo lo proporciona la predicción de Stephen Hawking, en 1974, de que los agujeros negros no son completamente negros. Desde el punto de vista termodinámico son cuerpos negros: radiadores perfectos de radiación térmica. Antes se creía que los agujeros negros eran simplemente monstruos de las galletas cósmicas, que se tragaban todo lo que caía en sus garras gravitatorias. Una vez que uno se precipitaba al interior de una superficie conocida como el horizonte de sucesos, no había vuelta al mundo exterior.

Hawking acertó al descubrir lo que sucedería si se incluyesen procesos cuánticos en la historia. Sorprendentemente, entonces resultaba que los agujeros negros no eran completamente negros. El cambio intenso de la gravedad cerca del horizonte de sucesos podía convertir la energía gravitatoria del agujero negro en partículas irradiables desde el mismo, llevándose poco a poco la masa del agujero hasta que desaparecía en una explosión final⁹⁵. Lo inusual de este proceso de evaporación es que se predice su obediencia a las simples leyes cotidianas de la termodinámica aplicables a todos los cuerpos calientes conocidos en equilibrio. Así pues, los agujeros

⁹⁵ No es posible por el momento predecir lo que debería quedar tras la explosión final. Se han hecho muchas sugerencias diferentes, que van desde nada en absoluto, a un agujero en el espacio y el tiempo, un agujero de gusano hacia un nuevo Universo, o simplemente una masa estable finita.

negros resultan ser objetos a la vez gravitatorios, relativistas, mecanocuánticos y termodinámicos. La fórmula que da la temperatura de la radiación que un cuerpo negro de masa M irradia al espacio por medio del proceso de evaporación de Hawking incluye las constantes G , h y c . Pero también incluye la constante termodinámica de Boltzmann, k , que liga energía y temperatura. Ésta es una elucidación espectacular de la estructura interconectada de piezas superficialmente dispares de la Naturaleza. El descubrimiento de una *variación* es completamente diferente de los cuatro desarrollos previos. Significa que se descubre una cantidad que creíamos constante es una impostora disfrazada de constante verdadera. Varía en el espacio o en el tiempo. En general, un paso semejante requerirá que la variación sea muy pequeña, o no se hubiera creído inicialmente que la cantidad era constante. Sin duda, ninguna de las constantes fundamentales de la Naturaleza ha sufrido hasta ahora esta degradación de su estatus cósmico. Sin embargo, como veremos más adelante, algunas están bajo sospecha a medida que su constancia ha sido sondeada con niveles de precisión cada vez mayores.

La principal sospechosa de variaciones minúsculas ha sido siempre la constante gravitatoria, G . La gravedad es con mucho la fuerza más débil de la Naturaleza y la menos estrechamente sondeada por el experimento. Si se buscan los valores conocidos de las constantes principales en la contraportada de un libro de texto de física se descubrirá que G está especificada con muchas menos cifras decimales que c , h o e . A mediados de la década de 1960 se pensó

durante un tiempo que la teoría de la relatividad general de Einstein discrepaba de las observaciones del movimiento del planeta Mercurio alrededor del Sol. Lo primero que se hizo para reconciliarlas fue ampliar la teoría de Einstein permitiendo que G cambiase con el tiempo. Finalmente se descubrió que la causa del problema eran unas observaciones incorrectas; pero, como un genio, una vez que la G variable salió de la lámpara ya no se la pudo encerrar de nuevo.

Aunque G ha soportado asaltos a su constancia durante mucho tiempo, los ataques más recientes y detallados han sido lanzados contra la constancia de α , la constante de estructura fina. Están tan de actualidad que los consideraremos con más detalle en el capítulo 12. La constante de estructura fina liga la velocidad de la luz, la constante de Planck y la carga del electrón. Si varía, entonces podemos elegir a cuál de ellas atribuimos la variación en el tiempo.

Estas cinco piedras de toque del progreso giran alrededor de las constantes de la Naturaleza y muestran el papel central que desempeñan las constantes en nuestra valoración del progreso. Hay un sexto desarrollo en nuestra lista. Le llamamos *enumeración*, Este es el santo grial de la física fundamental y por ello se entiende el cálculo numérico de una de las constantes de la Naturaleza. Nunca se ha llevado a cabo. Hasta ahora, la única forma de conocer sus valores es midiéndolas⁹⁶. Esto parece insatisfactorio. Permite que las constantes que aparecen en nuestras teorías tengan un enorme

⁹⁶ No sabemos, por ejemplo, si la constante de estructura fina es un número racional o irracional.

abanico de valores posibles sin invalidar la teoría. Ésta no es la situación que imaginaba Einstein en sus afirmaciones del último capítulo. Él pensaba que la teoría verdadera sólo debería permitir una elección para las constantes que la definen: los valores que observamos. Algunas personas comparten hoy su opinión, pero se ha hecho cada vez más evidente que no todas las constantes que definen el mundo tienen que estar unívocamente encorsetadas de esta manera. Es probable que algunas estén determinadas de una forma más liberal por la aleatoriedad cuántica.

Muchas personas confían en que una teoría completa nos permitiría calcular los valores numéricos de algunas constantes, como c , h y G , con tanta aproximación como quisiéramos. Ésta sería también una forma maravillosa de poner a prueba una teoría «completa» semejante, pero por el momento no es más que un sueño. Ninguna de las constantes que consideramos verdaderamente fundamentales ha sido calculada de esta manera a partir de una de las teorías en las que aparece. Pese a todo, un cálculo semejante quizá no esté demasiado lejos. Hace tan sólo unos pocos años los físicos estaban en un punto muerto con varias teorías de cuerdas posibles para escoger y todas parecían Teorías de Todo igualmente viables. Era bastante extraño. ¿Por qué nuestro Universo utilizaba sólo una de ellas? Entonces Ed Witten, de la Universidad de Princeton, hizo un descubrimiento capital. Demostró que todas estas teorías de cuerdas superficialmente diferentes no lo eran en absoluto. Simplemente eran diferentes situaciones restrictivas de una única teoría mayor y más profunda que aún tenemos que encontrar. Es

como si estuviéramos iluminando un objeto extraño desde muchos ángulos diferentes y proyectando diferentes sombras en la pared. A partir de un número suficiente de dichas sombras sería posible reconstruir el objeto iluminado. Esta teoría profunda es la teoría M presentada antes en este capítulo. Oculta en sus defensas matemáticas hay una explicación para los valores numéricos de las constantes de la Naturaleza. Hasta ahora nadie ha sido capaz de penetrar en ellas y extraer la información. Sabemos un poco sobre la estructura de la teoría M, pero las matemáticas necesarias para elucidarla son formidables. Los físicos están acostumbrados a poder tomar las matemáticas que los matemáticos ya han desarrollado y utilizarlas como una herramienta para modelar las teorías físicas. Por primera vez desde Newton se han encontrado pautas en la Naturaleza que requieren el desarrollo de nuevas matemáticas para ir más allá en nuestra comprensión de las mismas. Witten cree que hemos sido afortunados al tropezar con la teoría M con unos cincuenta años de adelanto. Otros podrían advertirnos de que lo más peligroso en ciencia es la idea que llega antes de su tiempo.

Pese a la carencia de una teoría fundamental con la que hacer un cálculo de las constantes no se han ahorrado los esfuerzos numerológicos para explicarlas. Esta es una actividad con una historia, una antropología y una sociología propias. Sus frutos son bastante inusuales, y en ocasiones fantásticos, como vamos a ver.

§. Numerología

Here lies John Bun,

*Who was killed by a gun,
His name was not Bun, but Wood,
But Wood would not rhyme with
gun, but Bun would⁹⁷.*

EPITAFIO⁹⁸

Números de la suerte, números de la mala suerte, números especiales... Montones de personas creen que pueden contar con ellos. Se trata de un residuo moderno de una superstición antigua. Si nos remontamos aproximadamente a 550 a. C., encontramos a Pitágoras y sus discípulos griegos en su temprano estudio de las matemáticas por sí mismas. Estaban interesados en cualquier cosa del Universo a la que pudieran atribuirse números. Era una forma de unir estas partes distintas del mundo, poner los movimientos planetarios en una escala musical y convertir cantidades en formas geométricas. A diferencia de nosotros, no creían que los números son sólo atributos de las cosas. Pensaban que todo era número. Los números tenían significados intrínsecos. No eran sólo relaciones entre cosas. De estas creencias religiosas se seguía una búsqueda para explorar los números de las cosas en todas las formas posibles, persiguiendo vínculos coincidentes entre números de distintas áreas de la vida. Algunos números tenían propiedades positivas, otros eran malos. Algunos debían mantenerse en secreto, de otros se podía hablar abiertamente.

⁹⁷ «Aquí yace John Bum / que murió por un disparo de pistola. / Su nombre no era Bum sino Wood / pero Wood no rimaría con pistola / y Bum sí lo haría». Evidentemente la rima se pierde en castellano. (*N. del t.*)

⁹⁸ D. M. Wilson, *Awful Ends: The British Museum of Epitaphs*, British Museum Publications, Londres, 1992, p. 87.

Para ver cómo Pitágoras se vio arrastrado hacia esta fuerte creencia en la numerología deberíamos considerar algunos de los juegos de números que le gustaban.

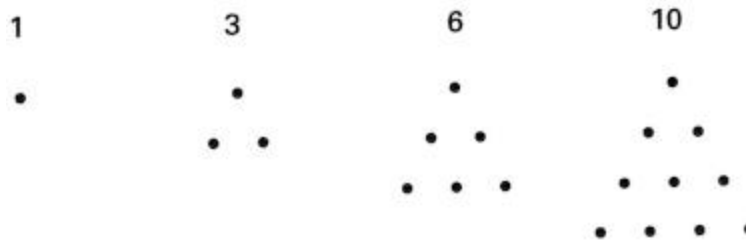


Figura 4.3. Los números triangulares se crean formando filas sucesivas de puntos de modo que cada fila tenga un punto más que la fila anterior⁹⁹.

Uno de sus favoritos era la secuencia de números triangulares. Aquí podemos ver cómo una sencilla pauta de números puede emerger de forma muy natural disponiendo canicas u otros tantos en el suelo. Si colocamos filas sucesivas de un punto, dos puntos, tres puntos, etc. unas debajo de otras construimos una progresión de números de forma «triangular» (ver figura 4.3).

Sumemos una fila tras otra para formar la progresión de números triangulares:

$$\begin{aligned}
 &1 \\
 &1 + 2 = 3 \\
 &1 + 2 + 3 = 6 \\
 &1 + 2 + 3 + 4 = 10
 \end{aligned}$$

⁹⁹ C. Butler, *Number Symbolism*, Routledge & Kegan Paul, Londres, 1970.

y así sucesivamente¹⁰⁰.

Esto era particularmente esclarecedor para los pitagóricos porque los griegos indicaban los números con las letras de su alfabeto y esto oscurecía las pautas en la secuencia de números que son evidentes de inmediato para nosotros. Las representaciones pictóricas que hizo Pitágoras de los triángulos de números eran fascinantes. De hecho, hoy conservamos un recuerdo de ello cuando nos referimos a los números como «figuras»¹⁰¹. Una «figura» tiene aún el doble significado de una imagen y un número. De esto se seguía una imagen de 1 como un punto, 2 como una línea que une dos puntos y 3 como un triángulo, la primera figura plana que encierra un área. El número 4 simbolizaba entonces la primera figura sólida, una pirámide compuesta de cuatro superficies triangulares con cuatro vértices.

De la misma forma era posible hablar de números «cuadrados», 4, 9, 16, 25... que pueden construirse mediante puntos dispuestos en conjuntos cuadrados. Por otra parte, advirtieron que podían construirse sumando sucesivos números impares, por ejemplo¹⁰²,

¹⁰⁰ El n ésimo número triangular es igual a $n(n + 1)/2$.

¹⁰¹ El término inglés *figure* tiene también el significado de cifra o dígito. (*N. del t.*)

¹⁰² En general, n^2 es igual a la suma de los n primeros números impares, partiendo de 1.

$$4 = 1 + 3$$

$$9 = 1 + 3 + 5$$

$$16 = 1 + 3 + 5 + 7$$

$$25 = 1 + 3 + 5 + 7 + 9$$

$$36 = 1 + 3 + 5 + 7 + 9 + 11$$

y así sucesivamente.

Estos ejemplos dan cuenta de cómo Pitágoras se fue acercando hasta dar su primer salto imaginativo y considerar los números como cosas: objetos geométricos. A continuación hizo un descubrimiento aún más impresionante. Advirtió que la afinación de los instrumentos musicales griegos dependía de simples razones numéricas, 1:2, 3:2, 4:3 y 8:9. Éstos eran los únicos intervalos musicales que los griegos consideraban consonantes y atractivos al oído. El impacto de este hallazgo sobre el pensamiento pitagórico fue de gran alcance. Pensó que había descubierto que los cambios en las percepciones sensoriales humanas dependían de las matemáticas. Además, la aparición de números similares en la descripción de los intervalos musicales y en el movimiento de los planetas convenció a los pitagóricos de que estos fenómenos superficialmente diferentes estaban íntimamente relacionados.

La numerología parte de la creencia de que existe algo intrínsecamente significativo en los propios números; que la sieteadad es una cualidad compartida que vincula todas las cosas que tienen una cualidad séptuple, ya sean siete novias y siete hermanos o los siete días de la semana. A partir de aquí basta un

pequeño paso para que algunos números, como el 13, se consideren desgraciados, u otros, como el 7, se consideren propicios. Los pitagóricos dotaron a ciertos números con atributos especiales, como bondad o justicia. Llegaron a ser símbolos en más de un sentido. He aquí un comentario típico:

Porque suponían, como una propiedad definitoria de justicia, recompensa o igualdad, y creían que esto existía en los números, por eso decían que la justicia era el primer número cuadrado pues en todo, el primer ejemplo de las cosas que tienen la misma fórmula gozaba, en su opinión, del máximo derecho al nombre. Algunos decían que este número era 4, al ser el primer cuadrado, divisible en partes iguales y en todo iguales, pues es dos veces 2. Otros, sin embargo, decían que era 9, el primer cuadrado de un número impar, a saber, 3 multiplicado por sí mismo.

Decían, por otra parte, que la suerte era el 7, porque en la Naturaleza los momentos de satisfacción con respecto al nacimiento y la madurez se dan por septenas. Tomemos como ejemplo al hombre. Puede nacer al cabo de 7 meses, saca sus dientes después de otros 7, alcanza la pubertad al final de su segundo período de 7 años, y le sale barba en el tercero¹⁰³.

Algunos números eran especialmente reverenciados debido a sus propiedades especiales. Los números «perfectos» eran así llamados

¹⁰³ Alejandro de Afrodisias (un comentarista de Aristóteles) en su *Metafísica*, 38, 10 citado por W. Guthrie, *History of Greek Philosophy*, vol. 1, Cambridge University Press, Cambridge, 1962, pp. 303-304. [Hay traducción española: *Historia de la filosofía griega*, Gredos, Madrid, 1999].

porque tienen la notable propiedad de que son iguales a la suma de todos los números que los dividen exactamente, aparte de sí mismos. El primer número perfecto es $6 = 1 + 2 + 3$, el segundo es $28 = 14 + 7 + 4 + 2 + 1$. Los dos siguientes son 496 y 8128, que también eran conocidos por los antiguos griegos. Incluso hoy sólo se conocen¹⁰⁴ unos 33 y nadie sabe si son infinitos, como sucede con los números primos¹⁰⁵.

Pitágoras estaba también muy impresionado por una sucesión de números que llamaba «amigos». Dos números se denominan «amigos» si la suma de los divisores del primer número es igual al segundo número, y viceversa. En cierto sentido se estimaba que tienen los mismos «padres» y la divinidad parecería más favorable a las cosas que estaban numeradas por pares de estos amistosos números. Por ejemplo 220 y 284 son números amigos¹⁰⁶. Podemos dividir 220 por 1, 2, 4, 5, 10, 11, 20, 22, 44, 55 y 110. Sumémoslos y obtenemos 284. Podemos dividir 284 por 1, 2, 4, 71 y 142. Sumémoslos y obtenemos 220. Los primeros eruditos judíos estaban muy orgullosos de utilizar la numerología para validar los

¹⁰⁴ Todos los números perfectos pueden expresarse como $2^N(2^{N+1} - 1)$ para valores especiales de N . El gran matemático suizo Leonhard Euler demostró que todos los números perfectos pares tienen esta forma si $2^N - 1$ es un número primo. Nadie sabe si existen números perfectos pares.

¹⁰⁵ Los números primos, como 7 y 23, no tienen divisores distintos de sí mismo y 1. Euclides demostró que existen infinidad de ellos con un argumento muy bello. Supongamos que hay sólo un número finito de ellos. Multipliquémoslos todos y sumemos 1. Entonces este número no es divisible por ninguno de nuestra supuesta lista finita de primos porque siempre queda un 1 de resto. Por lo tanto, o bien este número es primo o bien es divisible por un número primo que es mayor que el último en nuestra lista original. En cualquier caso, esto contradice la hipótesis original de que la lista de números primos era finita. De ahí que el número de números primos no pueda ser finito.

¹⁰⁶ Se han encontrado más de un millar de números amigos. Los siguientes más grandes son 1184 y 1210, 2620 y 2924, 5020 y 5564, 6232 y 6368, 10 744 y 10 856.

textos de sus escrituras o para extraer algún significado oculto adicional de las cantidades que contenían¹⁰⁷. Esto evolucionó hasta las formas más extremas de la cábala con su reverencia por las ocurrencias séptuples. He aquí un fragmento de medicina alternativa numerológica para curar la malaria:

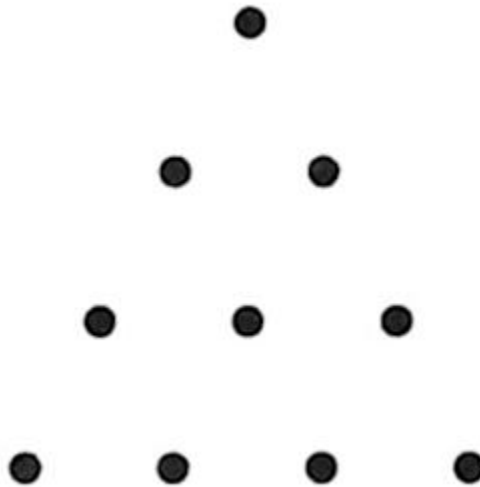


Figura 4.4. La tetraktys sagrada, representación triangular del número 10 como $1 + 2 + 3 + 4$.

Tómense siete dátiles de siete palmeras, siete astillas de siete vigas, siete clavos de siete puentes, siete cenizas de siete hornos, siete paladas de tierra de siete fosas, siete trozos de brea de siete barcos, siete puñados de comino y siete pelos de la

¹⁰⁷ En Génesis 32, versículo 14, aparece el número amigo 220 cuando Jacob hace un regalo de 220 cabras a Esaú. Esto implica una relación que se sellaría mediante el regalo recíproco de 284 objetos.

*barba de un perro viejo, y átense al cuello de la camiseta con una cuerda blanca retorcida*¹⁰⁸.

Los números pitagóricos más «sagrados» eran los cuatro primeros, 1, 2, 3 y 4, que formaban el número triangular 10 (ver figura 4.4).

La representación triangular del número 10 era el símbolo de la *tetraktys* sagrada por la que los iniciados en la orden pitagórica tenían que prestar su juramento de secreto y obediencia. Como parte de los requisitos de entrada, hacían voto de secreto durante tres años; por eso, en el Renacimiento el número de días que hay en tres años ($3 \times 365 = 1095$) se consideraba el número del silencio. La *tetraktys* era nada menos que la llave maestra para abrir nuestra comprensión del conjunto de la vida y la experiencia. He aquí la exposición de un comentarista del siglo I sobre los diez grupos de cuatro objetos que se creía que simbolizaba¹⁰⁹:

Números: 1, 2, 3, 4.

Magnitudes: punto, línea, superficie, sólido.

Cuerpos simples: fuego, aire, agua, tierra.

Figuras de cuerpos simples: pirámide, octaedro, icosaedro, cubo.

Seres vivos: semilla, crecimiento en longitud, en anchura, en grosor.

Sociedades: hombre, pueblo, ciudad, nación.

¹⁰⁸ De Trachtenberg, *Jewish Magic and Superstition*, citado por C. Pickover, *The Loom of God*, Plenum, Nueva York, 1997, p. 80.

¹⁰⁹ Teón de Esmirna, «On The Tetraktys and the Dead» citado por C. Butler, *Number Symbolism*, Routledge & Kegan Paul, Londres, 1970, p. 9.

Facultades: razón, conocimiento, opinión, sensación.

Estaciones del año: primavera, verano, otoño, invierno.

Edades: infancia, juventud, madurez, vejez.

Partes del ser humano: el cuerpo y las tres partes del alma.

Estas curiosas ideas fueron extraordinariamente persistentes. En toda época, en todo lugar, hubo escritores y pensadores fascinados por el significado de los números. Trataban las ecuaciones y las fórmulas como si fueran códigos secretos que encriptaban el verdadero significado del Universo. Esta idea no se ha extinguido hoy. Aunque utilizamos las matemáticas para establecer relaciones entre cosas, sigue habiendo legiones de investigadores aficionados que buscan una «fórmula» especial que nos transmita algo sobre la Naturaleza última del mundo físico. Y qué mejor cosa podría comunicarnos esta fórmula que aquellos números que se encuentran en el corazón de la realidad física: los valores de las constantes de la Naturaleza. La numerología ha dirigido su atención hacia las constantes físicas de la Naturaleza en un intento por explicar sus valores mediante una concatenación de π s, raíces cuadradas y números comunes.

Estos esfuerzos se alimentan de coincidencias. Algunas de las más impresionantes no tienen ningún significado perceptible. Por ejemplo¹¹⁰, en una ocasión se señaló que

¹¹⁰ H. Weber, *Lehrbuch der Algebra*, vol. 3, Chelsea, Nueva York, 1908, sección 125. Este ejemplo lo cita I. J. Good en un informe técnico inédito del Dept. Statistics, Virginia Polytechnic Inst., *Physical Numerology*, 30 de diciembre de 1988, p. 1.

$$\exp\{\pi(\sqrt{67})/3\} \approx \text{número de pies en una milla}$$

con una aproximación de ¡1 parte en 300 millones! Y qué decir de la afirmación de que el número $\exp\{\pi(\sqrt{163})\}$ es un entero, hecha por primera vez por Charles Hermite en 1859. Se sabe que está extraordinariamente cerca, pues es

$$262\,537\,412\,640\,768\,743,999999999999925\dots$$

Esto formaba parte de una inocentada de Martin Gardner que afirmó que era un entero y que el matemático indio Ramanujan lo había predicho¹¹¹. En consecuencia ha llegado a conocerse como «constante de Ramanujan».

Pero hay un montón de números terrible y aún más permutaciones posibles entre ellos. Las coincidencias parecen más sorprendentes porque no pensamos en cuántas «no coincidencias» poco impresionantes encontramos entre ellos. Cuando las analizamos desde un punto de vista estadístico resulta que coincidencias como ésta no son inusuales. Recordemos cuando Uri Geller solía aparecer en televisión y anunciaba que iba a parar los relojes de nuestra casa. Habría millones de espectadores y cabe esperar que un

¹¹¹ Esto formaba parte de una inocentada en la columna de Martin Gardner de la edición de abril de 1975 de *Scientific American* p. 127. (La broma se reveló en el número de julio de 1975, p. 112). Puede demostrarse que existen números racionales iguales a un número irracional elevado a una potencia irracional, pero por lo que yo sé no se conoce ningún ejemplo explícito. La demostración es un bello ejemplo de demostración no-constructiva. Consideremos el número $x = \sqrt{2}$ elevado a la potencia de $\sqrt{2}$. Este número es o racional o irracional. Si es racional hemos demostrado lo que estamos buscando, de modo que supongamos que es irracional. Elevémoslo otra vez a la potencia de $\sqrt{2}$ y tenemos que $x^{\sqrt{2}} = (\sqrt{2})^{\sqrt{2} \times \sqrt{2}} = (\sqrt{2})^2 = 2$, que es racional e igual a un irracional elevado a una potencia irracional, ¡por hipótesis!

montón de relojes de cuerda se pararan mientras él hablaba. Aquellos hogares en donde un reloj se para quedan terriblemente impresionados. Los demás sólo piensan que quizá no hayan estado suficientemente afinados en el plano psíquico. Después de todo, conseguía detener un montón de relojes de otros.

Mi coincidencia numérica favorita es una que me contó mi amigo Stephen Medcalf como ejemplo que desafiaría cualquier intento de calcular la probabilidad matemática de que ésta aparezca por azar. Creo que fue advertido por un escolar de Eton hace unos setenta años. En primer lugar, una pequeña historia que no estoy en disposición de juzgar. Existe la tradición, o leyenda, de que William Shakespeare tomó parte en las traducciones inglesas de algunos salmos de la versión del rey Jacobo autorizada de la Biblia inglesa¹¹². Se sugirió que se podía descubrir su mano en el Salmo 46, escrito en el año en que Shakespeare cumplía 46 años. Pues, como advirtió el escolar, la 46.^a palabra contando desde el principio de este salmo¹¹³ es *shake*. Y la 46.^a palabra contando desde el final es *spear*. ¿Coincidencia o firma oculta?

¹¹² La versión autorizada fue el resultado de la Hampton Court Conference de 1604, que fue convocada por Jacobo I para unir a las diversas fracciones de la Iglesia Alta y Baja. La «versión autorizada» resultante (aunque no estaba realmente «autorizada» de ninguna forma oficial) apareció en 1611. Se basaba fundamentalmente en los textos traducidos de William Tyndale con material de John Wyclif. William Shakespeare vivió de 1564 a 1616.

¹¹³ La primera y última estrofas del salmo 46 se leen (con la 46.^a palabra desde el principio y el final ¡en mayúsculas!):

God is our refuge and strength, / A very present help in trouble. / Therefore will not we fear, though the earth be removed, / And though the mountains be carried into the midst of the sea; / Though the waters thereof roar and be troubled, / Though the mountains SHAKE with the swelling thereof /... / He breaketh the bow, and cutteth the SPEAR in sunder; / He bumeth the chariot in the fire. / «Be still, and know that I am God: / I will be exalted among the heathen, I will be exalted in the earth». / The Lord of hosts is with us; / The God of Jacob is our refuge.

En la literatura científica pueden encontrarse todo tipo de coincidencias numéricas que involucran a los valores de las constantes de la Naturaleza, y muchas más en las bandejas de entrada del correo de los físicos, adonde han llegado desde corresponsales bien intencionados. He aquí algunas de las fórmulas propuestas (ninguna tomada en serio) para la constante de estructura fina. Compárense con el mejor valor experimental:

experimental: $1/\alpha = 137,035989561\dots$

En primer lugar, ha habido intentos de «demostrar» que $1/\alpha$ es igual a las siguientes expresiones que utilizan una extensión especulativa de física conocida:

Lewis y Adams¹¹⁴ $1/\alpha = 8\pi(8\pi^5/15)^{1/3} = 137,348$

Eddington¹¹⁵ $1/\alpha = (16^2 - 16)/2 + 16 + 1 = 137$

Wyler¹¹⁶ $1/\alpha = (8\pi^4/9)(2^45!/\pi^5)^{1/4} = 137,036082$

Aspden y Eagles¹¹⁷ $1/\alpha = 108\pi(8/1843)^{1/6} = 137,035915$

Por supuesto, si la teoría M da al fin con una determinación del valor de $1/\alpha$ podría parecerse perfectamente a una de estas fórmulas especulativas. Sin embargo, ofrecería un amplio y constante edificio teórico del que se seguiría la predicción. También

¹¹⁴ G. N. Lewis y E. Q. Adams, *Phys. Rev.*, 3, 92 (1914).

¹¹⁵ A. S. Eddington, *Proc. Roy. Soc.*, A 122, 358 (1930). Nótese que Eddington creía en esa época que $1/\alpha$ era un número entero. En la época esto era una posibilidad dadas las incertidumbres experimentales en su medida.

¹¹⁶ A. M. Wyler, *C. Rendus, Acad. Sci.*, París, B 269, 743 (1969) y B 271, 186 (1971).

¹¹⁷ H. Aspden y D. M. Eagles, *Phys. Lett.*, A 41, 423 (1972).

tendría que hacer algunas predicciones de cosas que todavía no hemos medido; por ejemplo, las siguientes cifras decimales de $1/\alpha$, que los futuros experimentadores podrían buscar y comprobar.

Todos estos ejercicios de gimnasia numérica se acercan de un modo impresionante al valor experimental (estuvieron incluso más cerca en el pasado, cuando se propusieron por primera vez) pero el premio para el ingenio persistente le corresponde a Gary Adamson¹¹⁸, cuya muestra de 137-logía se muestra en la figura 4.5.

The image shows a dense collection of handwritten mathematical equations, all of which approximate the value 1.37. The equations use various mathematical constants and operations, including powers, roots, and logarithms. Some examples include:

- $1.37 \approx \frac{19^2}{\phi^2} = 132 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\phi} = 1.618 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\pi} = 0.318 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{e} = 0.368 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{5}} = 0.447 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{10}} = 0.316 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{15}} = 0.258 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{20}} = 0.224 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{30}} = 0.183 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{40}} = 0.158 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{50}} = 0.141 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{60}} = 0.129 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{70}} = 0.120 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{80}} = 0.112 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{90}} = 0.105 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{100}} = 0.100 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{110}} = 0.095 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{120}} = 0.091 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{130}} = 0.087 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{140}} = 0.084 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{150}} = 0.082 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{160}} = 0.080 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{170}} = 0.078 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{180}} = 0.076 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{190}} = 0.075 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{200}} = 0.074 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{210}} = 0.073 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{220}} = 0.072 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{230}} = 0.071 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{240}} = 0.070 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{250}} = 0.069 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{260}} = 0.068 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{270}} = 0.067 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{280}} = 0.066 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{290}} = 0.065 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{300}} = 0.064 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{310}} = 0.063 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{320}} = 0.062 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{330}} = 0.061 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{340}} = 0.060 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{350}} = 0.059 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{360}} = 0.058 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{370}} = 0.057 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{380}} = 0.056 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{390}} = 0.055 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{400}} = 0.054 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{410}} = 0.053 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{420}} = 0.052 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{430}} = 0.051 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{440}} = 0.050 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{450}} = 0.049 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{460}} = 0.048 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{470}} = 0.047 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{480}} = 0.046 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{490}} = 0.045 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{500}} = 0.044 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{510}} = 0.043 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{520}} = 0.042 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{530}} = 0.041 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{540}} = 0.040 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{550}} = 0.039 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{560}} = 0.038 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{570}} = 0.037 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{580}} = 0.036 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{590}} = 0.035 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{600}} = 0.034 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{610}} = 0.033 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{620}} = 0.032 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{630}} = 0.031 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{640}} = 0.030 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{650}} = 0.029 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{660}} = 0.028 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{670}} = 0.027 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{680}} = 0.026 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{690}} = 0.025 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{700}} = 0.024 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{710}} = 0.023 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{720}} = 0.022 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{730}} = 0.021 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{740}} = 0.020 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{750}} = 0.019 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{760}} = 0.018 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{770}} = 0.017 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{780}} = 0.016 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{790}} = 0.015 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{800}} = 0.014 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{810}} = 0.013 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{820}} = 0.012 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{830}} = 0.011 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{840}} = 0.010 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{850}} = 0.009 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{860}} = 0.008 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{870}} = 0.007 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{880}} = 0.006 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{890}} = 0.005 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{900}} = 0.004 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{910}} = 0.003 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{920}} = 0.002 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{930}} = 0.001 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{940}} = 0.000 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{950}} = 0.000 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{960}} = 0.000 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{970}} = 0.000 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{980}} = 0.000 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{990}} = 0.000 \dots$
- $1.37 \approx \frac{1}{\sqrt{1000}} = 0.000 \dots$

¹¹⁸ C. Pickover, *Computers and the Imagination*, St. Martin's Press, Nueva York, 1991, p. 270.

Figura 4.5. Algunos vuelos de imaginación numerológica que implican al número 137, recogidos por Gary Adamson. $\varphi = 1,61803\dots$ es el número áureo.

Estos ejemplos tienen al menos la virtud de surgir de algún intento de formular una teoría de electromagnetismo y partículas. Pero hay también numerólogos «puros» que buscan cualquier combinación de potencias de números pequeños y constantes matemáticas importantes, como 71, que se aproxime al requerido 137,035989561... He aquí algunos ejemplos de este tipo:

$$\text{Robertson}^{119} \quad 1/\alpha = 2^{-19/4} 3^{10/3} 5^{17/4} \pi^{-2} = 137,03594$$

$$\text{Burger}^{120} \quad 1/\alpha = (137^2 + \pi^2)^{1/2} = 137,0360157$$

Ni siquiera el gran físico teórico Werner Heisenberg pudo resistirse a la irónica sospecha de que¹²¹

En cuanto al valor numérico supongo que $1/\alpha = 2^4 3^3 / \pi$, pero por supuesto es en broma.

Ya tenemos más numerología de la que necesitamos. Al cabo de un rato empieza a resultar adictiva. Es fácil ver por qué ha despertado una fascinación tan universalmente duradera. Nuestro propósito al mostrar algunos ejemplos tiene un objetivo serio. Una de las

¹¹⁹ B. Robertson, *Phys. Rev. Lett.*, 27, 1545 (1971).

¹²⁰ T. J. Burger, *Nature* 271, 402 (1978).

¹²¹ W. Heisenberg, carta a Paul Dirac, 27 de marzo de 1935, citado en H. Kragh, *Dirac: A Scientific Biography*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990, p. 209.

fórmulas que hemos mostrado lleva el nombre de Arthur Eddington, uno de los más grandes astrofísicos del siglo XX. En el próximo capítulo consideraremos a Eddington con más detalle. Es una notable combinación de lo profundo y lo fantástico. Más que cualquier figura moderna, él es el responsable de poner en marcha los inacabables intentos de explicar las constantes de la Naturaleza por proezas de numerología pura. Él también advirtió un aspecto nuevo y espectacular de las constantes de la Naturaleza.

Capítulo 5

La sinfonía inacabada de Eddington

He tenido una visión muy extraña, he tenido un sueño; supera el ingenio del hombre decir qué sueño era: el hombre no es más que un asno cuando tiene que exponer este sueño. Se llamará el sueño del Fondo, porque no tiene fondo.

A. S. EDDINGTON¹²²

**§. Contando hasta 15 747 724 136 275 002 577 605 653 961
181 555 468 044 717 914 527 116 709 366 231 425 076 185
631 031 296**

El conservadurismo recela del pensamiento, porque el pensamiento en general lleva a conclusiones erróneas, a menos que uno piense muy, muy intensamente.

ROGER SCRUTON¹²³

¹²² A. S. Eddington, *The Expanding Universe*, Cambridge University Press, Cambridge, 1933, p. 126.

¹²³ R. Scruton, *The Intelligent Person's Guide to Philosophy*, citado en *Times Higher Educational Supplement*, 4 de mayo de 2001, p. 19.

«Cualquier coincidencia es siempre digna de atención», nos dijo miss Marple; después de todo, «puedes descartarla más tarde si es *sólo* una coincidencia». Uno de los aspectos más sorprendentes en el estudio del Universo astronómico durante el siglo XX ha sido el papel desempeñado por la coincidencia: que existiera, que fuera despreciada y que fuera reconocida. Cuando los físicos empezaron a apreciar el papel de las constantes en el dominio cuántico y a explotar la nueva teoría de la gravedad de Einstein para describir el Universo en conjunto, las circunstancias eran las adecuadas para que alguien tratara de casarlas.

Entra ahora en escena Arthur Stanley Eddington: un extraordinario científico que había sido el primero en descubrir cómo se alimentaban estrellas a partir de reacciones nucleares. También hizo importantes contribuciones a nuestra comprensión de la galaxia, escribió la primera exposición sistemática de la teoría de la relatividad general de Einstein y fue responsable de una de las pruebas experimentales decisivas de la teoría de Einstein. Dirigió una de las dos expediciones destinadas a medir la minúscula curvatura de la luz por la gravedad el Sol, sólo medible durante un eclipse total de Sol. La teoría de Einstein predecía que el campo gravitatorio del Sol debería desviar la luz estelar que venía hacia la Tierra en aproximadamente 1,75 segundos de arco cuando pasaba cerca de la superficie solar. Tomando una fotografía de un campo de estrellas distantes cuando el disco solar estaba cubierto por la sombra de la Tierra, y de nuevo cuando el Sol estaba en el extremo opuesto del cielo, podía detectarse cualquier minúsculo

desplazamiento de la posición aparente de las estrellas y poner a prueba la predicción de la curvatura de la luz. El equipo de Eddington hizo una exitosa medida en la isla Príncipe a pesar de las malas condiciones meteorológicas. Al confirmar la predicción de Einstein, presentó al físico alemán ante la opinión pública como el mayor científico de la era. En la figura 5.1 se les ve juntos con ocasión de la visita de Einstein a Cambridge, conversando en el jardín de Eddington, en los observatorios de la universidad.



Figura 5.1. Albert Einstein y Arthur Eddington juntos en el jardín de este último en 1930, fotografiados por su hermana¹²⁴.

Eddington hizo una visita a Caltech, Pasadena, en 1924 y encontró que sus explicaciones de la relatividad, junto con su confirmación

¹²⁴ A. V. Douglas, *The Life of Arthur Stanley Eddington*, Nelson, Londres, 1956, lámina II.

experimental de las predicciones de la curvatura de la luz, habían unido su nombre al de Einstein. Siendo una persona extraordinariamente modesta y reservada, quedó encantado al descubrir que los astrónomos no sólo habían organizado una cena para celebrar su visita, sino que además uno de los físicos con que jugaba al golf había escrito una maravillosa parodia de *La morsa y el carpintero* para celebrar su común estima de la relatividad, el golf y Lewis Carroll, quien no podría haberlo hecho mejor.

The Einstein and the Eddington

The Einstein and the Eddington
Were counting up their score
The Einstein's card showed ninety-eight
And Eddington's was more,
And both lay bunkered in the trap
And both stood up and swore.
I hate to see, the Einstein said
Such quantities of sand;
Just why they placed a bunker here
I cannot understand,
If one could smooth this landscape out
I think it would be grand.
The time has come, said Eddington,
To talk of many things;
Of cubes and clocks and meter-sticks,
And why a pendulum swings,
And how far space is out of plumb,

And whether time has wings.
And space it has dimensions four,
Instead of only three.
The square on the hypotenuse
Ain't what it used to be.
It grieves me sore, the things you've done
To plane geometry.
You hold that time is badly warped,
That even light is bent;
I think I get the idea there,
If this is what you meant:
The mail the postman brings today,
Tomorrow will sent.
The shortest line, Einstein replied,
Is not the one that's straight;
It curves around upon itself,
Much like a figure of eight,
And if you go too rapidly
You will arrive too late.
But Easter day is Christmas time
And far away is near,
And two and two is more than four
And over here is near.
You may be right, said Eddington,

It seems a trifle queer¹²⁵.

W. H. WILLIAMS

Eddington tenía una personalidad compleja¹²⁶ con gustos sencillos. Era un cuáquero riguroso y un pacifista. No combatir en la primera guerra mundial le llevó a ser elegido director de la expedición para observar el eclipse en la isla Príncipe. Conforme avanzaba su carrera, se acercó cada vez más al gran público con una serie de libros de divulgación científica impresionantemente lúcidos que exponían la visión científica del mundo en desarrollo junto con su propia filosofía de la ciencia. Sus escritos sobre el principio y el fin del mundo sirvieron de inspiración a muchos escritores que buscaban introducir ideas científicas en sus argumentos, mientras que teólogos y filósofos eran desafiados e informados sobre la

¹²⁵ *El Einstein y el Eddington* / El Einstein y el Eddington / estaban contando su puntuación / la tarjeta de Einstein mostraba noventa y ocho / pero la de Eddington era más alta, / y ambos cayeron en el búnker / y ambos estaban de pie y juraban. // Odio ver, dijo el Einstein / tanta cantidad de arena; / no puedo entender / por qué pusieron aquí un búnker, / pienso que sería grande / si uno pudiera allanar este paisaje. // Ha llegado el momento, dijo Eddington, / de hablar de muchas cosas; / de cubos y relojes y varas de medir, / y de por qué un péndulo oscila, / y si el espacio está hecho a plomo, / y si el tiempo tiene alas. // Y el espacio tiene cuatro dimensiones, / en lugar de sólo tres. / El cuadrado de la hipotenusa / no es lo que solía ser. / Me apena y me duele, las cosas que usted ha hecho / para aplanar la geometría. // Usted sostiene que el tiempo está curvado, / que incluso la luz se curva; / creo que yo capto la idea, / si esto es lo que usted quiere decir; / el correo que trae hoy el cartero, / será enviado mañana. // La línea más corta, respondió Einstein, / no es la recta; / se curva sobre sí misma, / muy parecida a un ocho, / y si usted va demasiado rápido / llegará demasiado tarde. // Pero el día de Pascua es tiempo de Navidad / y lo alejado está próximo, / y dos y dos son más que cuatro / y aquí es cerca, / quizá usted tenga razón, dijo Eddington, / parece un poco raro.

¹²⁶ A. V. Douglas, *The Life of Arthur Stanley Eddington*, Nelson, Londres, 1956; H. C. Plummer, *Arthur Stanley Eddington 1882-1944*, *Obituary Notices of Fellows of the Royal Society*, V, 1945-1948, pp. 113-125; C. W. Kilmister, *Men of Physics: Sir Arthur Eddington*, Pergamon, Oxford, 1966; E. T. Whittaker, *Arthur Stanley Eddington*, *Dictionary of National Biography*, 1941-1950, pp. 230-233; W. H. McCrea, «Recollections of Sir Arthur Eddington», *Contemporary Physics* 23, 531-540 (1982).

inevitabilidad de la inminente «muerte térmica» del Universo. La historia de Peter Wimsey en *Have His Carcase*¹²⁷ de Dorothy Sayers hace un uso divertido de la segunda ley de la termodinámica y del continuo incremento de desorden que exige para asegurar a un testigo confundido que tal evidencia es acorde con la forma termodinámica del mundo. El papel de la «segunda ley» en la evolución del Universo era un tema importante en los escritos de divulgación de Eddington en esa época. He aquí la invención de Sayers. Una testigo está preocupada porque su testimonio es tan confuso que nadie la creerá...

—*Pero usted me cree, ¿no es verdad?*

—*Nosotros le creemos, señorita Kohn —dijo Wimsey solemnemente— con tanta devoción como creemos en la segunda ley de la termodinámica.*

—*¿Qué quiere decir?* —dijo el señor Simons con desconfianza.

—*La segunda ley de la termodinámica —explicó Wimsey amablemente—, que mantiene al Universo en su curso, y sin la cual iría hacia atrás como una película pasada al revés.*

—*¿Lo haría?* —exclamó la señorita Kohn, más bien complacida.

—*Los altares pueden tambalearse —respondió Wimsey.— El señor Thomas puede abandonar su traje de etiqueta y el señor Snowden renunciar al libre cambio, pero la segunda ley de la termodinámica perdurará mientras su memoria se mantenga en*

¹²⁷ D. L. Sayers, *Have His Carcase*, Victor Gollancz, Londres, 1932. Este título es un juego de palabras *cockney* con *habeas corpus*, la ley del Parlamento que requiere que el acusado sea presentado con las pruebas en su contra ante un juez. La cita es de la p. 206 de la impresión de 1948.

este mundo degradado, por el que Hamlet entendía su cabeza pero que yo, con un espacio intelectual más amplio, aplico al planeta que tenemos el éxtasis de habitar. El inspector Umpelty parece escandalizado, pero le aseguro que no conozco ninguna forma más impresionante de afirmar mi creencia en su absoluta integridad. —Sonrió—. Lo que me gusta de su testimonio, señorita Kohn, es que añade el toque final de completa e impenetrable oscuridad al problema que el inspector y yo nos hemos propuesto resolver. Lo reduce a la completa quintaesencia del absurdo incomprensible. Por consiguiente, por la segunda ley de la termodinámica, que establece que a cada hora y a cada momento avanzamos hacia un estado de mayor aleatoriedad, recibimos una garantía positiva de que nos encontramos feliz y seguramente en la dirección correcta.

Aunque Eddington era un hombre tímido con pocas dotes para hablar en público, sabía escribir de forma muy bella, y sus metáforas y analogías aún las usan una y otra vez astrónomos que buscan explicaciones gráficas a ideas complicadas. Nunca se casó y vivió en el Observatorio en Cambridge, donde su hermana cuidaba de él y su anciana madre. Sus intereses eran conservadores pero no totalmente predecibles; le gustaban las historias de detectives y el fútbol, y disfrutaba uniéndose a la multitud de trabajadores londinenses en Highbury para ver al Arsenal, el equipo más

destacado de su tiempo¹²⁸. Como golfista y jugador de tenis era mediano, pero sus expediciones ciclistas eran más serias. Su récord ciclista estaba codificado en un simple «número de Eddington», E, que era el número de días en los que había recorrido en bicicleta más de E millas. Conforme E empieza a crecer, se necesita un esfuerzo muy considerable para aumentarlo siquiera en 1. En el momento de su muerte, el número E de Eddington había crecido hasta 87.

Eddington ocupaba la cátedra plumiana de filosofía experimental en la Universidad de Cambridge. Este título antiguo correspondía por tradición al astrónomo más veterano de la universidad. Durante parte del tiempo que ocupó este puesto Eddington coincidió con Paul Dirac, el catedrático lucasiano de matemáticas y el Nobel de Física más joven. Dirac fue uno de los grandes físicos del siglo XX, que predijo la existencia de la antimateria, desarrolló la presentación más transparente de la mecánica cuántica, descubrió cómo se comportaba el electrón y muchas otras cosas. Su trabajo fue del tipo matemático más fundamental y lo realizó enteramente en solitario. No tenía colaboradores, sólo estudiantes de investigación nominales, y ningún equipo de investigación.

Fue dentro de este clima local de búsqueda de nuevas leyes de la Naturaleza y del comportamiento de sus partículas más elementales donde Eddington inició un programa de trabajo que obtuvo todo un

¹²⁸ Su sucesor, R. O. Redman, escribió que «a Eddington le gustaban las multitudes. Durante un tiempo, cada sábado en la temporada futbolística, se iba, no al Rugger que normalmente era lo que hacían los profesores de Cambridge, sino a ver un partido de fútbol, con su gran masa de hinchas de la clase obrera», citado en A. V. Douglas, *Arthur Stanley Eddington*, Nelson, Londres, 1956, p. 122.

espectro de respuestas por parte de sus pares: desde la rendida admiración hasta un abierto ridículo. Él la llamaba su «teoría fundamental» y era una búsqueda de la teoría física más básica posible con la que se pudiera explicar los valores numéricos de las constantes de la Naturaleza.

Eddington creía que mediante el puro pensamiento era posible llegar a una completa descripción del mundo físico. En su día, esta idea fue aún más ambiciosa que hoy. He aquí una breve muestra de su credo:

Mi conclusión es que no sólo las leyes de la Naturaleza, sino también las constantes de la Naturaleza pueden deducirse a partir de consideraciones epistemológicas, de modo que podemos tener un conocimiento a priori de ellas¹²⁹.

Este es el manifiesto radical del teórico. Eddington creía que mediante el pensamiento puro sería posible deducir todas las leyes y constantes de la Naturaleza y predecir la existencia en el Universo de cosas como estrellas y galaxias. La imagen que más le gustaba era la de un astrónomo que en un planeta cubierto de nubes por encima de ellas deducía la existencia de las estrellas invisibles. Por supuesto, experimentos y observaciones hacían la tarea mucho más fácil, pero Eddington creía que eso era *todo* lo que hacían. Sin ellos su objetivo sería más difícil de alcanzar pero no inalcanzable.

¹²⁹ A. S. Eddington, *The Philosophy of Physical Science*, Cambridge University Press, Cambridge, 1939, p. 58. [Hay traducción española: *La filosofía de la ciencia física*, Editorial Sudamericana, Buenos Aires, 1944].

El programa de Eddington nunca se completó. Su libro estaba inacabado¹³⁰ en el momento de su muerte en 1944, pero en los años precedentes había publicado varios artículos y dedicado secciones de sus libros de divulgación a anunciar grandes avances en su programa para entender los valores de las constantes de la Naturaleza. Centró su atención en un pequeño número de constantes de la Naturaleza, elevando su perfil y desafiando a los científicos a explicarlas, antes de embarcarse en una compleja cadena de extraños razonamientos matemáticos destinados a explicar exactamente sus valores.

§. Fundamentalismo

En tiempos antiguos dos aviadores se procuraron alas. Dédalo voló con seguridad en el aire por encima del mar, y tras tomar tierra fue debidamente honrado. El joven Icaro se elevó hacia el Sol hasta que la cera que unía sus alas se fundió, y su vuelo terminó en fracaso. Al sopesar sus logros

¹³⁰ Tras la prematura muerte de Eddington en noviembre de 1944, el manuscrito fue publicado póstumamente como *Fundamental Theory* por la Cambridge University Press en 1946 bajo la edición del amigo y antiguo mentor de Eddington, E. T. Whittaker. El título fue escogido por Whittaker mismo. Posteriormente, N. B. Slater intentó aclarar la metodología del trabajo de Eddington en *Development and Meaning of Eddington's Fundamental Theory*, Cambridge University Press, Cambridge, 1957, que fue revisado en su totalidad por A. Taub, *Mathematical Reviews* II, 144 (1950). C. Kilmister y B. O. J. Tupper, *Eddington's Statistical Theory*, Clarendon Press, Oxford, 1962.

quizá haya algo que decir en favor de Icaro. Las autoridades clásicas nos cuentan que sólo estaba «haciendo una locura», pero a mí me gusta pensar en él como el hombre que sacó a la luz un defecto de construcción en las máquinas voladoras de su tiempo.

*ARTHUR EDDINGTON*¹³¹

Eddington inició su investigación para explicar los números puros que definen nuestro Universo en 1921, en las páginas de su famoso libro de texto sobre relatividad general. Propone que las características de partículas elementales de la Naturaleza como el electrón deberían derivarse localmente de la estructura del espacio y el tiempo en que residen¹³², de modo que debe existir una ecuación desconocida que exprese esta relación en la forma:

radio del electrón en cualquier dirección = constante numérica × radio de curvatura del espacio-tiempo en dicha dirección

Entre los números que Eddington consideraba de importancia primordial estaba el denominado «número de Eddington», que es

¹³¹ A. S. Eddington, «Address to the British Association», 1920, *Observatory* 43, 357-358 (1920).

¹³² En efecto, dijo: «Un electrón no sabría cuán grande debería ser a menos que existan longitudes independientes en el espacio frente a las que medirse». A. S. Eddington, *The Mathematical Theory of Relativity*, Cambridge University Press, Cambridge, 1923, p. 33.

igual al número de protones del Universo visible¹³³. Eddington calculó¹³⁴ (a mano) este número con enorme precisión en un crucero transatlántico, concluyendo con esta memorable afirmación:

*Creo que en el Universo hay 15 747 724 136 275 002 577 605
653 961 181 555 468 044 717 914 527 116 709 366 231 425
076 185 631 031 296 protones y el mismo número de
electrones.*

Este número enorme, normalmente escrito N_{Edd} , es aproximadamente igual a 10^{80} . Lo que atrajo la atención de Eddington hacia él era el hecho de que debe ser un número entero, y por eso en principio puede ser calculado *exactamente*.

Durante la década de 1920, cuando Eddington empezó su búsqueda para explicar las constantes de la Naturaleza, no se conocían bien las fuerzas débil y fuerte de la Naturaleza, y las únicas constantes dimensionales de la física que sí se conocían e interpretaban con confianza eran las que definían la gravedad y las fuerzas electromagnéticas. Eddington las dispuso en tres puros números adimensionales. Utilizando los valores experimentales de la época, tomó la razón entre las masas del protón y del electrón:

¹³³ En realidad sólo el número en la parte del Universo que es visible en principio, dada la finitud de la velocidad de la luz. El número de protones en el Universo entero podría ser infinito o finito dependiendo de la geometría global del espacio.

¹³⁴ Tenía estimaciones de la densidad y tamaño del Universo a partir de la astronomía y así podía calcular la masa multiplicándolas. Dividiendo esta masa total por la masa de un protón obtiene el número de protones en el Universo. Esto le habría llevado unos treinta segundos de cálculo. Lo que le llevó el viaje en barco fue la tediosa tarea de expresar la respuesta como un único número entero.

$$m_{\text{pr}}/m_e \approx 1840,$$

la inversa de la constante de estructura fina

$$2\pi\hbar c/e^2 \approx 137$$

y la razón entre la fuerza gravitatoria y la fuerza electromagnética entre un electrón y un protón,

$$e^2/Gm_{\text{pr}}m_e \approx 10^{40}$$

A éstas añadió su número cosmológico, $N_{\text{Edd}} \approx 10^{80}$. A estos cuatro números los llamó «las constantes últimas¹³⁵», y la explicación de sus valores era el mayor desafío de la ciencia teórica:

¿Son estas cuatro constantes irreducibles, o una unificación posterior de la física demostrará que alguna o todas ellas pueden ser prescindibles? ¿Podían haber sido diferentes de lo que realmente son?... Surge la pregunta de si las razones anteriores pueden ser asignadas arbitrariamente o si son inevitables. En el primer caso, sólo podemos aprender sus valores por medida; en el segundo caso es posible encontrarlos por la teoría... Creo que ahora domina ampliamente la opinión de que las [cuatro anteriores] constantes... no son arbitrarias,

¹³⁵ A. S. Eddington, *New Pathways in Science*, Cambridge University Press, Cambridge, 1935, p. 232. [Hay traducción española: *Nuevos senderos de la ciencia*, Montaner y Simón, Barcelona, 1956].

*sino que finalmente se les encontrará una explicación teórica; aunque también he oído expresar la idea contraria*¹³⁶.

Siguiendo con su especulación, Eddington pensaba que el número de constantes inexplicadas era un indicio útil del hueco que había que cerrar antes de que se descubriese una teoría verdaderamente unificada de todas las fuerzas de la Naturaleza. En cuanto a si esta teoría final contenía una constante o ninguna, tendríamos que esperar y ver:

*Nuestro reconocimiento actual de cuatro constantes en lugar de una indica meramente la cantidad de unificación de teoría que aún queda por conseguir. Quizá resulte que la constante que permanezca no sea arbitraria, pero de eso no tengo conocimiento*¹³⁷.

Eddington confiaba en que podría crear una teoría que entretrejería el mundo macroscópico de la astronomía y la cosmología con el mundo subatómico de protones y electrones. Sus números cósmicos eran inusuales en muchos aspectos. En primer lugar, por supuesto, nadie tenía ninguna idea de por qué tomaban los valores numéricos concretos que tenían. En segundo lugar, abarcaban una enorme variedad de tamaños. La razón de masas protón-electrón y la constante de estructura fina no están demasiado lejos de números puros próximos a uno y plausiblemente podrían ponerse como

¹³⁶ Eddington, *ibíd.*, pp. 233 y 234.

¹³⁷ Eddington, *ibíd.*, p. 234.

pequeños productos de números tales como 2, 3, o π en las fórmulas matemáticas. Esto es lo que Eddington esperaba. Pero los otros dos números que seleccionó son completamente diferentes. Son enormes. La aparición de un número como 10^{40} en una fórmula en física necesita una explicación muy especial, o al menos una razón que sea muy diferente de aquellas que estamos acostumbrados a encontrar para las cosas en ciencia. Y lo peor de todo, el número muchísimo mayor, $N_{\text{Edd}} \approx 10^{80}$, no sólo adolece de un problema de credibilidad aún más grande, sino que es prácticamente el cuadrado del primer número grande. ¡No puede ser una pura coincidencia! Eddington tenía la sensación de que si debía existir un número que quedara como la cantidad definitoria tras nuestro Universo, esa «constante arbitraria» estaba en la raíz de estos enormes números¹³⁸. Acerca de N_{Edd} el número mayor y más misterioso, escribió:

Considerado como el número de partículas en el Universo, siempre ha sido observado como un hecho especial [antes que como una verdad necesaria]. Un Universo, se dice, podría estar hecho con cualquier número de partículas; y hasta ahora por lo que concierne a la física debemos aceptar simplemente el número asignado a nuestro Universo como un accidente o como un capricho del Creador. Pero la investigación epistemológica

¹³⁸ Aunque Eddington estaba muy preocupado con estos números «grandes» del orden de 1040 y potencias superiores, no fue la primera persona en advertir su aparición en combinaciones de las constantes de la Naturaleza. Dicho descubrimiento fue hecho por Hermann Weyl en 1919. Este advirtió que: «Es un hecho que aparecen números puros con el electrón, cuyas magnitudes son totalmente diferentes de 1; por ejemplo, la razón del radio del electrón al radio gravitatorio y su masa es del orden de 1040; la razón del radio del electrón y el radio del mundo puede ser de proporciones similares», *Ann. Physik* 59, 129 (1919) y *Naturwissenschaften* 22, 145 (1934).

cambia nuestra idea de su Naturaleza. No puede hacerse un Universo con un número de partículas elementales que no sea compatible con el esquema de definiciones mediante el cual se asigna «el número de partículas» a un sistema en mecánica ondulatoria. Por consiguiente ya no debemos considerarlo un hecho tan especial sobre el Universo, sino como un parámetro que ocurre en las leyes de la Naturaleza y, como tal, parte de las leyes de la Naturaleza¹³⁹.

Tendremos mucho más que decir sobre los «grandes» números porque jugaron un papel influyente en el desarrollo de muchas teorías cosmológicas. Eddington no tenía una teoría que pudiera explicarlos, pero trabajó arduamente en hipótesis que pudieran explicar los números más pequeños próximos a 137 y 1840. Estos números controlan casi todas las características generales de los átomos y las estructuras atómicas.

¿Cómo trataba Eddington de explicar estos números? Un camino de ataque consistente para todos sus cálculos constante en justificar su ecuación especial

$$10 m^2 - 136 m + 1 = 0.$$

¹³⁹ . S. Eddington, *Philosophy of Physical Science*, Cambridge University Press, Cambridge, 1939, p. 69.

Esta ecuación es de las que uno se encuentra por primera vez en la escuela a los 15 años. Hay dos soluciones posibles de la ecuación¹⁴⁰ y están en razón de 1847,6 a 1. Esto estaba bastante cerca de la relación de masas protón-electrón (que en la época de Eddington era más próxima a 1836) para mover a Eddington a encontrar cualquier justificación para su ecuación y hacer pequeños ajustes que pudieran explicar las pequeñas «discrepancias». Creía que la forma de la propia ecuación estaba dictada por el número de combinaciones y permutaciones posibles de números y direcciones que caracterizaban nuestras cuatro dimensiones de espacio y tiempo. Las cantidades 1, 10 y 136 que aparecen en la ecuación se «derivan» del hecho de que hay $3^2 + 1^2 = 10$ cantidades simples disponibles para describir espacio y tiempo y luego $10^2 + 6^2 = 136$ en el siguiente nivel más complicado. Al principio Eddington había dado con el 136 como probable explicación para el valor del recíproco de la constante de estructura fina. Pero poco a poco llegó a convencerse de que era necesario multiplicar este número por $137/136$ (¡para obtener 137!) debido a un misterioso argumento sobre la necesidad de tener en cuenta que las cargas eléctricas efectivas de dos partículas tienen un aspecto indistinguible para ellas. Él afirma que «no hay nada místico en el hecho de que sean indistinguibles¹⁴¹», pero por desgracia casi todos los demás pensaban que lo había.

¹⁴⁰ Son $[136 \pm \sqrt{18\,456}]/20 = [136 \pm 135,85286]/20 = 13,5926$ o $0,007357$ de modo que la razón es 1847,57.

¹⁴¹ Eddington, *New Pathways in Science*, Cambridge University Press, Cambridge, 1935, pp. 251. Su explicación era la siguiente: «Mediante un argumento bastante precario parece probable que cuando varias cargas eléctricas forman un sistema perfectamente rígido se pierde

Esta secuencia de deducciones levantó un revuelo de interés y críticas en círculos científicos, tanto por el sospechoso factor «amañado» que cambiaba a toro pasado 136 por el más plausible 137, como por el obstinado hecho experimental de que desgraciadamente la constante de estructura fina no parecía ser ni mucho menos un número entero exacto. Eddington escribió incluso un artículo para uno de los periódicos de Londres explicando los problemas de sus esotéricas deducciones. Muchos otros científicos estaban completamente confundidos y algunos, como Vladimir Fock, se vieron impulsados a poetizarlo¹⁴²:

Though we may weigh it as we will,
Exhausted and delirious
One-hundred-and-thirty-even still
Remains for us mysterious.
But Eddington, *he*, sees it clear,
Denouncing those who tend to jeer;
It is the number of (says he)

1/137 de su masa. Puesto que el núcleo atómico es aproximadamente rígido, esto debería dar una determinación aproximada de la “fracción de empaquetamiento”, *Proc. Roy. Soc. A* 126, 696 (1930).

¹⁴² V. A. Fock, citado por George Gamow en *Biography of Physics*, Harper & Row, Nueva York, 1961, p. 327. [Hay traducción española: *Biografía de la física*, Alianza Editorial, Madrid, 1998]. Fock fue un influyente físico soviético que intentó hacer políticamente aceptable a Einstein y su obra durante el período estalinista. En particular, rebautizó la teoría de la relatividad de Einstein como «teoría de invariancia» para contrarrestar la acusación de que la teoría era opuesta en cierto sentido a la verdad absoluta del materialismo dialéctico. Su notable texto sobre la teoría de la relatividad general de Einstein, *The Theory of Space, Time and Gravitation*, publicada por Pergamon (Oxford, 1959) contiene un famoso comentario preliminar que afirma que el libro fue posible solamente a causa de la influencia positiva del materialismo dialéctico.

The world's dimensions. *Can it?! be?!¹⁴³*

La aproximación de Eddington a los Grandes Números no era tan oscura. Era ciertamente especulativa pero al menos sus colegas podían entenderle. Él esperaba que las masas de las partículas como el electrón pudieran derivarse de alguna manera de las fluctuaciones estadísticas de todas las masas en el Universo. La magnitud de las fluctuaciones estadísticas en conjuntos de N partículas viene dada típicamente por la raíz cuadrada de N y uno podría convencerse por ello de que la razón de la fuerza eléctrica a la fuerza gravitatoria entre dos partículas era una fluctuación estadística de magnitud determinada por la raíz cuadrada de $N_{\text{Edd}} \approx 10^{80}$, que está muy cerca de 10^{40} .

§. Física teatral

*Las analogías no prueban nada,
eso es completamente cierto, pero
pueden hacer que uno se sienta
más cómodo.*

SIGMUND FREUD

La metodología de Eddington fue objeto de burla inmisericorde por parte de otros físicos escépticos de la época. He aquí un ejemplo encantador con el que Beck, Bethe y Riezler consiguieron engañar al

¹⁴³ Aunque podemos pesarlo como queramos, / agotado y delirante / ciento treinta y siete sigue / siendo misterioso para nosotros. / Pero Eddington, él, lo ve claro, / denunciando a quienes tienden a burlarse; / es el número (dice él) / de las dimensiones del mundo. *¿Puede ser?*

serio editor de *Naturwissenschaften* al publicar¹⁴⁴ la siguiente nota en alemán en 1931:

Nota sobre la teoría cuántica de temperatura cero. Consideremos una red cristalina hexagonal. El cero absoluto de la misma está caracterizado por la condición de que todos los grados de libertad del sistema se congelan, es decir, cesan todos los movimientos internos de la red. Una excepción a esto es, por supuesto, el movimiento del electrón en su órbita de Bohr. Según Eddington cada electrón posee $1/a$ grados de libertad, donde a es la constante de estructura fina de Sommerfeld. Aparte de los electrones, nuestro cristal sólo contiene protones, y el número de grados de libertad para ellos es el mismo puesto que, según Dirac, un protón puede considerarse como un agujero en el gas electrónico. Así pues, puesto que queda un grado de libertad debido al movimiento orbital, para alcanzar el cero absoluto debemos eliminar de una sustancia $2/a - 1$ grados de libertad por neutrón (= 1 electrón + 1 protón; puesto que nuestro cristal tiene que ser eléctricamente neutro en conjunto). Obtenemos por consiguiente para la temperatura cero T_0

¹⁴⁴ G. Beck, H. Bethe y W. Riezler, *Naturwissenschaften*, 19, 29 (1931). Esta traducción es de Max Delbrück, en *Cosmology, Fusion, and Other Matters*, ed. F. Reines, Adam Hilger, Bristol, 1972. Es digno de mención que en esta época se consideró seriamente la posibilidad de que la constante de estructura fina pudiera estar relacionada con el concepto de temperatura. Paul Dirac estuvo interesado en esta posibilidad y Heisenberg la tuvo en cuenta. Éste menciona su desencanto con ella en una carta a Dirac algunos años más tarde, al escribir el 27 de marzo de 1935: «Ya no creo en absoluto en su conjetura de que la constante de estructura fina de Sommerfeld puede tener algo que ver con el concepto de temperatura... Más bien, estoy firmemente convencido que debemos determinar e^2/hc dentro de la teoría», citado en H. Kragh, *Dirac: A Scientific Biography*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990, p. 209.

$$T_0 = -(2/a - 1) \text{ grados}$$

Haciendo $T_0 = -273^\circ$ obtenemos para $1/a$ el valor 137, que, dentro de los márgenes de error, coincide plenamente con el valor obtenido de una forma independiente. Uno puede convencerse fácilmente de que nuestro resultado es independiente de la elección especial de la estructura cristalina.

Cambridge, 10 de diciembre de 1930

G. BECK, H. BETHE, W. RIEZLER

De hecho, tan convincente parecía este sinsentido para algunos lectores que a Riezler se le pidió que hiciese una exposición del trabajo en el seminario de física semanal de Sommerfeld en Múnich¹⁴⁵. A Eddington, sin embargo, no le hizo tanta gracia, como tampoco se la hizo a Herr Berliner, el editor de la revista, cuando descubrió que le habían hecho parecer un imbécil. El serio Herr Berliner publicó inmediatamente un «erratum» el 6 de marzo que señalaba que:

La nota de G. Beck, H. Bethe y W. Riezler publicada en el número de 9 de enero de esta revista no pretendía ser tomada en serio. Pretendía caracterizar cierta clase de artículos sobre física teórica de años recientes que son puramente especulativos y basados en argumentos numéricos espurios. En una carta remitida a los editores estos señores lamentan que la

¹⁴⁵ Arnold Sommerfeld había introducido la a en la física, denominando este símbolo como una nueva «Abkürzung» (abreviatura), en *Sitz. Ber. Akad. Wiss.*, p. 459, (1915).

formulación que dieron a esta idea pudiera producir malentendidos.

Pero el travieso George Gamow nunca se cansaba de gastar bromas, e inmediatamente después él, Rosenfeld y Pauli escribieron por separado cartas al editor desde diferentes direcciones de Europa protestando porque la revista había publicado ahora otro de estos vergonzosos artículos paródicos y apuntaban con el dedo a otro artículo seminumerológico, «Origen de la radiación cósmica penetrante», de un pobre autor confiado¹⁴⁶, exigiendo que el editor obtuviese su inmediata retirada por parte del autor para mantener los niveles de la revista.

He aquí otra sátira tomada de las conferencias de Max Born en 1944 sobre *Experimento y teoría en física*:¹⁴⁷

Eddington conecta las constantes físicas adimensionales con el número n de dimensiones de sus espacios E y su teoría lleva a la función $f(n) = n^2(n^2 + 1)/2$ que, para números pares consecutivos $n = 2, 4, 6...$ toma los valores 10, 136, 666... Números realmente apocalípticos. Se ha propuesto que algunas líneas bien conocidas del Apocalipsis de San Juan deberían escribirse de esta manera: «Y vi una bestia saliendo del mar que tenía $f(2)$ cuernos y su número es $f(6)$...» pero es discutible si la

¹⁴⁶ Según Delbrück, ref. 21, era A. V. Das.

¹⁴⁷ Born se refería a este corto libro como su «ensayo anti-Eddington y Milne» en una carta a Einstein el año siguiente, ver M. Born, *Albert Einstein —Max Born, Briefwechsel 1916-1955*, Rowohlt, Hamburgo, 1972, carta del 10 de octubre de 1944. [Hay traducción española: *Correspondencia Einstein-Born*, Siglo XXI].

cifra x en «... y se le dio autoridad para continuar x meses...» debe interpretarse como $1 \times f(3) - 3 \times f(1)$ o como $[f(4) - f(2)]/3$.

Un aparte que ilustra la dificultad de muchos para reconciliar el trabajo de Eddington sobre constantes fundamentales con sus monumentales contribuciones a la relatividad general y la astrofísica puede encontrarse en una historia que contaba Sam Goudsmit¹⁴⁸ referente a él mismo y al físico holandés Kramers:

El gran Arthur Eddington dio una conferencia sobre su pretendida derivación de la constante de estructura fina a partir de una teoría fundamental. Goudsmit y Kramers estaban entre la audiencia. Goudsmit entendió poco pero reconoció que era un absurdo inverosímil. Kramers entendió mucho y reconoció que era un completo absurdo. Tras la discusión, Goudsmit se acercó a su amigo y mentor Kramers y le preguntó: «¿Todos los físicos se vuelven locos cuando se hacen mayores? Tengo miedo». Kramers respondió, «No Sam, no tienes que asustarte. Un genio como Eddington quizá puede volverse loco pero un tipo como tú sólo se hace cada vez más tonto».

Lo más interesante de los intentos de Eddington por explicar las constantes de la Naturaleza mediante gimnasia algebraica y numérica es su efecto duradero sobre los lectores de sus libros de divulgación. A él le gustaba contarles sus nuevos «cálculos» de las

¹⁴⁸ M. Dresden, H. A. Kramers: *Between Tradition and Revolution*, Springer, Nueva York, 1987, p. 518.

constantes de la Naturaleza, y la impresión aplastante que transmitía era que se podrían llegar a desvelar algunos de los secretos más profundamente ocultos del Universo con algunas conjeturas inspiradas y algo de numerología. Si alguien notaba que algunas ecuaciones tenían soluciones próximas a números como 137 y 1840, entraba en el juego como un rival de Einstein. No había ninguna necesidad de observar el mundo ni ninguna necesidad de hacer predicciones sobre cosas que todavía no se habían visto; el juego consistía en ligar números.

Creo que la obra de Eddington, y su amplia divulgación en libros muy vendidos y que continúan leyéndose más de sesenta años después de su publicación original, inspiró a una generación de aficionados que soñaban con encontrar la explicación numerológica de las constantes de la Naturaleza. Cada semana recibo cartas con un tipo de cálculos que debe mucho al estilo y la aproximación a la Naturaleza de Eddington. Se caracterizan por los cálculos numéricos muy detallados, la limitación de intereses a un pequeño subconjunto de las constantes de la Naturaleza y ningún deseo de predecir algo nuevo.

Para evaluar la importancia de relaciones como éstas, o las que vimos propuestas en el último capítulo para explicar el valor numérico de la constante de estructura fina, tenemos que formular una sencilla pregunta. ¿Cuál es la probabilidad de que fórmulas aparentemente impresionantes aparezcan puramente por azar? Si escogemos unos pocos números sugerentes como 2, 3 o π y los multiplicamos algunas veces, ¿qué probabilidad hay de que

ob tengamos un número que se acerque mucho a alguna constante de la Naturaleza? Por desgracia para los numerólogos, la respuesta es que estas fórmulas no son nada impresionantes¹⁴⁹. Es fácil quedar impresionado por fórmulas numéricas porque nos es difícil apreciar cuánta búsqueda deliberada ha entrado en la fórmula expuesta y cuántas maneras hay de obtener un buen acuerdo. Por ejemplo, con un poco de trabajo podemos encontrar el tipo de fórmula de la que cualquier pitagórico moderno estaría orgulloso¹⁵⁰:

$$666 + 6 + 6 + 6 = (6 - 6/6)^{(6+6+6)/6} + 6^{(6+6+6)/6} + (6 + 6/6)^{(6+6+6)/6}$$

Pero no se le debería dotar de ningún significado apocalíptico.

Los intentos detallados de Eddington de explicar los valores de las constantes de la Naturaleza no acertaron el camino; pero abrieron nuevas perspectivas y posibilidades. Elevaron la visión de los físicos y crearon una nueva frontera en donde esforzarse. Su perenne rival James Jeans captó perfectamente la importancia de esta búsqueda insatisfecha cuando escribió en 1947 sobre la búsqueda infructuosa de Eddington de una teoría fundamental:

Pocos, si es que hay alguno, de los colegas de Eddington aceptaron sus ideas en su totalidad; en realidad, pocos, si hay alguno, afirmaron entenderlas. Pero su línea de pensamiento general no parece irrazonable en sí misma, y parece probable

¹⁴⁹ J. D. Barrow y F. J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, Londres, 1986, p. 231.

¹⁵⁰ U. Dudley, *Numerology, or what Pythagoras wrought*, Math. Assoc. of America, Washington DC, 1997, p. 7.

*que alguna síntesis enorme semejante pueda con el tiempo explicar la Naturaleza del mundo en que vivimos, aunque el momento no haya llegado todavía*¹⁵¹.

Los intentos de Eddington de dar una explicación unificada de las constantes de la Naturaleza se ganaron pocas adhesiones. Los grandes físicos de su época, como Dirac, Einstein, Bohr y Born, la encontraron inútil y muy diplomáticamente confesaron que no la comprendían. Eddington se sintió frustrado por esta recepción y no podía entender por qué otros no veían las cosas como él, quejándose en 1944 a su amigo Herbert Dingle de que¹⁵²:

Trato continuamente de descubrir por qué la gente encuentra oscuro el procedimiento. Pero señalaría que incluso Einstein era considerado oscuro, y cientos de personas han pensado que era necesario explicarle. Yo no puedo creer seriamente que alcance alguna vez la oscuridad de Dirac. Pero en el caso de Einstein y Dirac la gente ha pensado que valía la pena penetrar en la oscuridad. Creo que me comprenderán perfectamente cuando se den cuenta de que tienen que hacerlo así, y cuando se ponga de moda «explicar» a Eddington.

Ese día nunca llegó.

¹⁵¹ J. Jeans, *The Growth of Physical Science*, Cambridge University Press, Cambridge, 1947, p. 357.

¹⁵² Carta a Dingle citada en J. G. Crowther, *British Scientists of the Twentieth Century*, Routledge & Kegan Paul, Londres, 1952, p. 194.

Capítulo 6

El misterio de los números muy grandes

La historia es la ciencia de las cosas que no se repiten.

PAUL VALÉRY¹⁵³

§. Números espeluznantes

Aunque hablamos mucho de coincidencias, realmente no creemos en ellas. En el fondo de nuestro corazón tenemos mejor opinión del Universo, estamos secretamente convencidos de que no es algo descuidado y desordenado, de que todo lo que hay en él tiene sentido.

J. B. PRIESTLEY

El mayor misterio que rodea a los valores de las constantes de la Naturaleza es sin duda la ubicuidad de algunos números enormes que aparecen en una variedad de consideraciones aparentemente inconexas. El número de Eddington es un ejemplo notable. El

¹⁵³ P. Valéry, *Variété* IV.

número total de protones que hay dentro del alcance del Universo observable¹⁵⁴ está próximo al número

$$10^{80}$$

Si preguntamos ahora por la razón entre las intensidades de las fuerzas electromagnética y gravitatoria entre dos protones, la respuesta no depende de su separación¹⁵⁵, sino que es aproximadamente igual a

$$10^{40}$$

Es un misterio. Es bastante habitual que los números puros que incluyen las constantes de la Naturaleza difieran de 1 en un factor del orden de 10^2 , ¡pero 10^{40} , y su cuadrado, 10^{80} , es rarísimo! Y esto no es todo. Si seguimos a Max Planck y calculamos un valor estimado para la «acción»¹⁵⁶ del Universo observable en unidades fundamentales de Planck para la acción¹⁵⁷, obtenemos

¹⁵⁴ Ésta se define como la región desde la que la luz ha tenido tiempo de viajar desde que aparentemente comenzó la expansión. Es una esfera de un radio aproximadamente de 13000 millones de años luz centrada en nosotros.

¹⁵⁵ Porque cada fuerza decrece de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de separación.

¹⁵⁶ Esto es aproximadamente igual a su energía multiplicada por su edad.

¹⁵⁷ En 1980 hubo un considerable interés en la posibilidad de que el protón pudiera ser inestable con una semi-vida próxima a unos 10^{31} años (por un tiempo hubo afirmaciones, finalmente no confirmadas, de que se había detectado esta desintegración). Yo señalé entonces que la razón de esta semivida predicha al tiempo fundamental de Planck era aproximadamente 10^{80} , ver J. D. Barrow, «The Proton Half-life and the Dirac Hypothesis», *Nature*, 282, pp. 698-699, (1979).

10^{120}

Ya hemos visto que Eddington se inclinaba a relacionar el número de partículas del Universo observable con alguna cantidad que incluyera la constante cosmológica. Esta cantidad ha tenido una historia muy tranquila desde esa época, reemergiendo ocasionalmente cuando los cosmólogos teóricos necesitan encontrar una manera de acomodar nuevas observaciones incómodas. Recientemente se ha repetido este escenario. Nuevas observaciones de alcance y precisión sin precedentes, posibilitadas por el telescopio espacial Hubble trabajando en cooperación con telescopios sensibles en tierra, han detectado supernovas en galaxias muy lejanas. Su pauta de brillo y atenuación característica permite deducir su distancia a partir de su brillo aparente. Y, sorprendentemente, resulta que están alejándose de nosotros mucho más rápido de lo que cualquiera esperaba. La expansión del Universo ha pasado de ser un estado de deceleración a uno de aceleración. Estas observaciones implican la existencia de una constante cosmológica positiva. Si expresamos su valor numérico como un número puro adimensional medido en unidades del cuadrado de la longitud de Planck, entonces obtenemos un número muy próximo a

 10^{-120}

Nunca se ha encontrado un número más pequeño en una investigación física real.

¿Qué vamos a hacer con todos estos Grandes Números? ¿Hay algo cósmicamente significativo en 10^{40} y sus cuadrados y cubos?

§. Una hipótesis capital

*¡Mira lo que le pasa a la gente
cuando se casa!*

GEORGE GAMOW¹⁵⁸

La aparición de algunos de estos Grandes Números ha sido una fuente de sorpresas desde que fue advertida por primera vez por Hermann Weyl en 1919. Eddington había tratado de construir una teoría que hiciera comprensible su aparición, pero no logró convencer a un número significativo de cosmólogos de que estaba en la vía correcta. Pese a todo Eddington consiguió convencer a la gente de que había algo que necesitaba explicación. De forma completamente inesperada, fue uno de sus famosos vecinos de Cambridge quien escribió a la revista *Nature* la carta que consiguió avivar el interés por el problema con una idea que sigue siendo una posibilidad viable incluso hoy.

Paul Dirac ocupó la cátedra lucasiana de matemáticas en Cambridge durante parte del tiempo en que Eddington estuvo viviendo en los Observatorios. Las historias sobre la sencilla y completamente lógica aproximación de Dirac a la vida y la interacción social son muy numerosas, y tenemos una buena

¹⁵⁸ Comentario hecho por Gamow a Niels Bohr al ver el artículo de Dirac sobre la hipótesis de los Grandes Números, en *Nature*, G. Gamow, «History of the Universe», *Science* 158, pp. 766-769 (1967). Dirac acababa de casarse sólo un mes antes de escribir el artículo.

confirmación de su peculiar carácter al descubrir que escribió su inesperada incursión en los Grandes Números durante su luna de miel, en febrero de 1937¹⁵⁹.

Sin estar convencido por el enfoque numerológico de Eddington respecto a la presencia de «Grandes Números» entre las constantes de la Naturaleza¹⁶⁰, Dirac argumentó que es muy poco probable que números adimensionales muy grandes, que toman valores como 10^{40} y 10^{80} , sean accidentes independientes y no relacionados: debe existir alguna fórmula matemática no descubierta que liga las cantidades implicadas. Deben ser consecuencias más que coincidencias. Esta es la hipótesis de los Grandes Números (HGN) de Dirac:

*Dos cualesquiera de los números adimensionales muy grandes que ocurren en la Naturaleza están conectados por una sencilla relación matemática, en la que los coeficientes son del orden de la unidad*¹⁶¹.

Los Grandes Números de que se valía Dirac para formular esta atrevida hipótesis salían del trabajo de Eddington y eran tres:

¹⁵⁹ P. A. M. Dirac, «A New Basis for Cosmology», *Proc. Roy. Soc. A* 165, pp. 199-208 (1938).

¹⁶⁰ Dirac comentó que «los argumentos de Eddington no siempre son rigurosos... [pero] 10^{39} y 10^{78} son tan enormes como para hacer pensar que necesitan un tipo de explicación completamente diferente».

¹⁶¹ P. A. M. Dirac, *Nature* 139, p. 323 (1937) y *Proc. Roy. Soc. A*, p. 165, 199 (1938). Dirac quiere decir que dos colecciones cualesquiera independientes de constantes adimensionales de la Naturaleza deben ser proporcionales, donde la constante de proporcionalidad debe estar próxima a 1, digamos aproximadamente una décima o diez, quizá compuesta de factores puramente numéricos como 2 y π . Factores numéricos que fueran muy grandes o muy pequeños, por ejemplo un millón, no estarían permitidos.

$$N_1 = (\text{tamaño del Universo observable})/(\text{radio del electrón}) = \\ ct/(e^2/m_e c^2) \approx 10^{40}$$

$$N_2 = \text{razón fuerza electromagnética-a-gravitatoria entre protón y} \\ \text{electrón} = e^2/Gm_e m_{pr} \approx 10^{40}$$

$$N = \text{número de protones en el Universo observable} = c^3 t/Gm_{pr} \approx 10^{80}$$

Aquí, t es la edad actual del Universo, m_e es la masa de un electrón, m_{pr} es la masa de un protón, G la constante de gravitación, c la velocidad de la luz y e la carga del electrón.

Según la hipótesis de Dirac, los números N_1 , N_2 y \sqrt{N} eran realmente *iguales* salvo pequeños factores numéricos del orden de la unidad. Con esto quería decir que debe haber leyes de la Naturaleza que exijan fórmulas como $N_1 = N_2$, o incluso $N_1 = 2N_2$. Un número como 2 o 3, no terriblemente diferente de 1 está permitido porque es mucho más pequeño que los Grandes Números implicados en la fórmula; esto es lo que él quería decir por «coeficientes... del orden de la unidad».

Esta hipótesis de igualdad entre Grandes Números no es en sí misma original de Dirac. Eddington y otros habían escrito antes relaciones semejantes, pero Eddington no había distinguido entre el número de partículas en el Universo entero —que podría ser infinito— y el número de partículas en el Universo observable, que se define como una esfera centrada en nosotros con un radio igual a la velocidad de la luz multiplicada por la edad actual del Universo.

El cambio radical precipitado por la HGN de Dirac es que nos exige que creamos que *un conjunto de constantes tradicionales de la Naturaleza, como N_2 , debe estar cambiando a medida que el Universo envejece en el tiempo, t :*

$$N_1 \approx N_2 \approx \sqrt{N} \propto t$$

Puesto que Dirac había incluido dos combinaciones que contenían la edad del Universo, t , en su catálogo de Grandes Números, la relación que él propone requiere que una combinación de tres de las constantes de la Naturaleza tradicionales no sea constante en absoluto, sino que su valor debe aumentar continuamente a medida que el Universo envejece, de modo que

$$e^2/Gm_{pr} \propto t$$

Dirac decidió acomodar este requisito abandonando la constancia de la constante de gravitación de Newton, G . Sugirió que estaba decreciendo en proporción directa a la edad del Universo en escalas de tiempo cósmicas, como

$$G \propto 1/t$$

Así pues, en el pasado G era mayor y en el futuro será menor que lo que se mide hoy. Ahora vemos que $N_1 \approx N_2 \approx \sqrt{N} \propto t$ y la enorme magnitud de los tres Grandes Números es una consecuencia de la

gran edad del Universo¹⁶²: todas aumentan con el paso del tiempo¹⁶³.

La propuesta de Dirac provocó un revuelo entre un grupo de científicos vociferantes que llenaron las páginas de cartas de la revista *Nature* con argumentos a favor y en contra¹⁶⁴. Mientras tanto, Dirac mantenía su tranquilidad de costumbre, pero escribió sobre su creencia en la importancia que otorgaba a los Grandes Números para nuestra comprensión del Universo con palabras que podrían haber sido de Eddington, pues reflejan muy estrechamente la filosofía de la fracasada «teoría fundamental»:

¿No cabría la posibilidad de que todos los sucesos presentes correspondan a propiedades de este Gran Número [10^{40}], y, generalizando aún más, que la historia entera del Universo corresponda a propiedades de la serie entera de los números naturales...? Hay así una posibilidad de que el viejo sueño de los filósofos de conectar toda la Naturaleza con las propiedades de los números enteros se realice algún día¹⁶⁵.

¹⁶² La conclusión $N \propto t^2$ llevó posteriormente a Dirac a afirmar (P. A. M. Dirac, *Proc. Roy. Soc. A* 333, 403 [1973]), de forma completamente equivocada, que este resultado requería la creación continua de protones. De hecho, todo lo que nos está diciendo es que conforme el Universo envejece podemos ver cada vez más protones que entran dentro de nuestro horizonte.

¹⁶³ Por supuesto, esta hipótesis puede decirse por qué las diferentes colecciones de constantes N_1 , N_2 y \sqrt{N} son de magnitud similar pero no por qué la magnitud es ahora próxima a 10^{40} .

¹⁶⁴ El crítico más vociferante era Dingle, quien unía las teorías de Milne y Dirac como ejemplos de una combinación de «parálisis de la razón con intoxicación de la fantasía... En lugar de la inducción de principios a partir de fenómenos vamos a una pseudociencia de cosmitología invertebrada, e invitados a cometer suicidio para evitar la necesidad de morir». H. Dingle, «Modern Aristotelianism», *Nature* 139, p. 784 (1937).

¹⁶⁵ P. A. M. Dirac, «The Relation between Mathematics and Physics», *Proc. Royal Society (Edimburgo)* 59, p. 129 (1937).

La aproximación de Dirac tiene dos elementos importantes. En primer lugar, trata de demostrar que lo que previamente podría haberse considerado como coincidencias son consecuencias de un conjunto de relaciones más profundo que han sido pasadas por alto. En segundo lugar, sacrifica la constancia de la más antigua constante de la Naturaleza conocida. Por desgracia, la hipótesis de Dirac no sobrevivió durante mucho tiempo. El cambio propuesto en el valor de G era demasiado drástico. En el pasado la gravedad tendría que haber sido mucho más intensa; la emisión de energía del Sol habría cambiado y la Tierra habría estado mucho más caliente en el pasado de lo que se suponía normalmente¹⁶⁶. De hecho, como demostró¹⁶⁷ el físico americano Edward Teller en 1948, los océanos habrían estado hirviendo en la era precámbrica, hace doscientos o trescientos millones de años, y la vida tal como la conocemos no habría sobrevivido, pese a que la evidencia geológica entonces disponible demostraba que la vida había existido sobre la Tierra durante al menos quinientos millones de años. Teller, un emigrado húngaro, era un físico de gran nivel que desempeñó un importante trabajo en el desarrollo de la bomba de hidrógeno. Él y Stan Ulam en Los Álamos fueron quienes dieron con la idea clave (descubierta independientemente por Andrei Sajarov en la Unión Soviética) que mostraba cómo podía detonarse una bomba nuclear. Más tarde, Teller tuvo un papel controvertido en el proceso de

¹⁶⁶ La luminosidad del Sol es proporcional a G^7 y el radio de la órbita de la Tierra alrededor del Sol es proporcional a G^{-1} , de modo que la temperatura media en la superficie de la Tierra es proporcional a $G^{9/4} \propto t^{-9/4}$.

¹⁶⁷ E. Teller, *Phys. Rev.* 73, p. 801 (1948).

Robert Oppenheimer y se convirtió en un halcón radical durante el período de la guerra fría. Fue el modelo para el personaje del doctor Strangelove tan memorablemente interpretado por Peter Sellers en la película del mismo nombre¹⁶⁸. Aún es una figura influyente en la ciencia armamentística y en los estudios energéticos en Estados Unidos¹⁶⁹.

El eufórico George Gamow era un buen amigo de Teller y respondió al problema del océano hirviente sugiriendo que podía paliarse si se suponía que las coincidencias de Dirac eran debidas a una variación temporal en e , la carga del electrón, con e^2 aumentando con el tiempo como requiere la ecuación $e^2/Gm_{pr} \propto t$.¹⁷⁰

Tampoco esta sugerencia sobrevivió durante mucho tiempo. Por desgracia, la propuesta de Gamow de una e variable tenía todo tipo de consecuencias inaceptables para la vida sobre la Tierra. Pronto se advirtió de que la teoría de Gamow hubiera dado como resultado que el Sol habría agotado hace tiempo todo su combustible nuclear. El Sol no estaría brillando hoy si e^2 crece en proporción a la edad del Universo. Su valor en el pasado habría sido demasiado pequeño para permitir que se formaran estrellas como el Sol.

Gamow tuvo varias discusiones con Dirac sobre estas variantes de su hipótesis de G variable. Dirac dio una interesante respuesta a Gamow con respecto a su idea de que la carga del electrón, y con

¹⁶⁸ *Dr. Strangelove, or How I Learned to Stop Worrying and Love the Bomb* (Stanley Kubrick, 1964). La película se tituló en España *¿Teléfono rojo? Volamos hacia Moscú. (N. del t.)*

¹⁶⁹ Edward Teller murió el 9 de septiembre de 2003. (N. del t.)

¹⁷⁰ Un cambio en el valor de e no afecta a la órbita de la Tierra alrededor del Sol, mientras que la luminosidad del Sol es proporcional a e^{-6} de modo que la temperatura superficial media de la Tierra es proporcional a $t^{-3/4}$ y la era de los océanos en ebullición se desplazaría demasiado hacia el pasado para ser un problema para nuestra historia biológica.

ello la constante de estructura fina, pudiera estar variando. Recordando sin duda la creencia inicial de Eddington en que la constante de estructura fina era un número racional, escribe a Gamow en 1961 hablándole de las consecuencias cosmológicas de su variación con el logaritmo de la edad del Universo:

Es difícil formular cualquier teoría firme sobre las etapas primitivas del Universo porque no sabemos si hc/e^2 es constante o varía proporcionalmente a $\log(t)$. Si hc/e^2 fuera un entero tendría que ser una constante, pero los experimentadores dicen ahora que no es un entero, de modo que muy bien podría estar variando. Si realmente varía, la química de las etapas primitivas sería completamente diferente, y la radiactividad también estaría afectada. Cuando empecé a trabajar sobre gravitación esperaba encontrar alguna conexión entre ella y los neutrinos, pero esto ha fracasado¹⁷¹.

Dirac no iba a suscribir fácilmente una e variable como solución al enigma de los Grandes Números. Su trabajo científico más importante había hecho comprensible la estructura de los átomos y el comportamiento del electrón. Todo esto se basaba en la hipótesis, compartida por casi todos los demás, de que e era una verdadera constante, la misma en todo tiempo y todo lugar en el Universo. Incluso Gamow abandonó pronto su teoría sobre la e variable y concluyó que

¹⁷¹ P. A. M. Dirac, carta a Gamow, citada por H. Kragh, *Dirac: A Scientific Biography*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990, p. 236, original en Library of Congress, manuscript collection.

El valor de e se mantiene en pie como el Peñón de Gibraltar durante los últimos 6×10^9 años¹⁷².

La sugerencia de Dirac despertó gran interés en científicos de muchos rincones inesperados. Allan Turing, pionero de la criptografía y la teoría de la computación, estaba fascinado por la idea de la gravedad variable y especuló sobre la posibilidad de probar la idea a partir de la evidencia fósil, preguntando si «un paleontólogo podría decir, a partir de la huella de un animal extinto, si su peso era el que se suponía¹⁷³».

El gran biólogo J. B. S. Haldane¹⁷⁴ se sintió fascinado por las posibles consecuencias biológicas de las teorías cosmológicas en que las «constantes» tradicionales cambian con el tiempo o donde los procesos gravitatorios se despliegan de acuerdo con un reloj cósmico diferente del de los procesos atómicos. Tales universos de dos tiempos habían sido propuestos por Milne y fueron las primeras sugerencias de que G podría no ser constante. Unos procesos, como la desintegración radiactiva o los ritmos de interacción molecular, podrían ser constantes sobre una escala de tiempo pero significativamente variables con respecto a la otra. Esto daba lugar a un escenario en el que la bioquímica que sustentaba la vida sólo se hacía posible después de una particular época cósmica. Haldane sugiere que:

¹⁷² Seis mil millones de años era su estimación de la edad del Universo en esa época. Ahora sabemos que esto era una subestimación importante debido a un error de calibración de las distancias a las galaxias que fue corregido en 1953.

¹⁷³ A. Hodges, *Alan Turing: The Enigma of Intelligence*, Hutchinson, Londres, 1983.

¹⁷⁴ J. B. S. Haldane, «Radioactivity and the Origin of Life in Milne's Cosmology», *Nature* 158, p. 555 (1944), ver también *Nature* 139, p. 1002 y el artículo de Haldane en *New Biology*, n.º 16, eds., M. L. Johnson, M. Abercrombie y G. E. Fogg, Penguin, Londres, 1955.

Hubo, de hecho, un momento en el que se hizo posible por primera vez vida de cualquier tipo, y las formas superiores de vida sólo pueden haberse hecho posibles en una fecha posterior. Análogamente, un cambio en las propiedades de la materia puede explicar algunas de las peculiaridades de la geología precámbrica.

Este imaginativo escenario no es diferente del que ahora se conoce como «equilibrio interrumpido», en el que la evolución ocurre en una sucesión discontinua de brotes acelerados entre los que se intercalan largos períodos de cambio lento. Sin embargo, Haldane ofrece una explicación para los cambios.

Lo que tienen en común todas estas respuestas a las ideas de Eddington y de Dirac es una apreciación creciente de que las constantes de la Naturaleza desempeñan un papel cosmológico vital: que existe un lazo entre la estructura del Universo en conjunto y las condiciones locales internas que se necesitan para que la vida se desarrolle y persista. Si las constantes tradicionales varían, entonces las teorías astronómicas tienen grandes consecuencias para la biología, la geología y la propia vida.

§. Que luego crecerá

El embrión de una gran masa gigante que luego crecerá.

WILLIAM SHAKESPEARE, Troilo y Crésida¹⁷⁵

¹⁷⁵ Trad. de Ángel Luis Pujante: *Troilo y Crésida*, Espasa, Madrid, 2002.

El legado a corto plazo del temprano interés por los Grandes Números que incluyen a las constantes de la Naturaleza fue un foco de atención hacia la posibilidad de que algunas constantes tradicionales de la Naturaleza pudieran estar variando muy lentamente durante los miles de millones de años de la historia cósmica. Se desarrollaron nuevas teorías de la gravedad, que ampliaban la teoría de la relatividad general de Einstein para incluir una gravedad variable. En lugar de ser tratada como una constante, la G de Newton era como la temperatura, capaz de variar en intensidad de un lugar a otro y con el paso del tiempo. Afortunadamente, no estaba tan desesperantemente libre de restricciones como podría parecer a primera vista. Para que los cambios en G respecto a las leyes de causa y efecto no propaguen cambios a velocidades mayores que la de la luz, y no violen la conservación de la energía, hay un único tipo de teoría que cuadra las cuentas. Muchos científicos encontraron partes de esta teoría, pero la representación más sencilla y más completa de la misma fue elaborada por el físico americano Robert Dicke y su estudiante de investigación Carl Brans en 1961.

Dicke era un físico extraño. Se sentía igualmente cómodo como matemático, como físico experimental, como destilador de datos astronómicos complicados o como diseñador de sofisticados instrumentos de medida. Tenía los intereses científicos más amplios. Comprendió que la idea de una «constante» gravitatoria variable podía ser sometida a una gran cantidad de pruebas observacionales, utilizando los datos de la geología, la paleontología,

la astronomía y la física de laboratorio. Tampoco estaba motivado simplemente por un deseo de explicar los Grandes Números. Hacia mediados de la década de 1960 hubo una motivación adicional para desarrollar una extensión de la teoría de la gravedad de Einstein que incluyera una G variable. En efecto, durante un tiempo pareció que las predicciones de Einstein sobre el cambio en la órbita del planeta Mercurio no coincidían con las observaciones cuando se tenía en cuenta la forma ligeramente achatada del Sol.

Dicke demostró que si se permitía una variación de G con el tiempo, entonces podía elegirse su ritmo de cambio para tener un valor que coincidiera con las observaciones de la órbita de Mercurio. Lamentablemente, años más tarde se descubrió que todo esto era una pérdida de tiempo. El desacuerdo con la teoría de Einstein se debía a inexactitudes en nuestros intentos de medir el diámetro del Sol que hacían que éste pareciera tener una forma diferente de la real. No es fácil medir el tamaño del Sol con los niveles de precisión exigidos debido a la turbulenta actividad en su superficie. Cuando se resolvió este problema en 1977, desapareció la necesidad de una G variable para reconciliar las observaciones con la teoría¹⁷⁶.

En 1957, mientras empezaba a elaborar teorías con G variable, Dicke preparó una revisión importante de las evidencias geofísicas, paleontológicas y astronómicas a favor de posibles variaciones de las constantes físicas tradicionales. Hizo la interesante observación

¹⁷⁶ Ver C. Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1981, p. 181.

de que explicar los «Grandes Números» de Eddington y Dirac debe tener algún aspecto biológico¹⁷⁷:

El problema del gran tamaño de estos números es ahora fácil de explicar... Hay un único número adimensional grande que tiene un origen estadístico. Este es el número de partículas en el Universo. La edad del Universo «ahora» no es aleatoria sino que está condicionada por factores biológicos... [porque cambios en los valores de los Grandes Números] impedirían la existencia del hombre para considerar el problema.

Cuatro años más tarde desarrolló esta importante intuición con más detalle, con especial referencia a las coincidencias de los Grandes Números de Dirac, en una breve carta que se publicó en la revista *Nature*. Dicke argumentaba que formas de vida bioquímicas como nosotros mismos deben su propia base química a elementos tales como el carbono, el nitrógeno, el oxígeno y el fósforo que son sintetizados tras miles de millones de años de evolución estelar en la secuencia principal. (El argumento se aplica con la misma fuerza a cualquier forma de vida basada en cualesquiera elementos atómicos más pesados que el helio). Cuando las estrellas mueren, las explosiones que constituyen las supernovas dispersan estos elementos biológicos «pesados» por todo el espacio, de donde son incorporados en granos, planetesimales, planetas, moléculas «inteligentes» autorreplicantes como ADN y, finalmente, en nosotros

¹⁷⁷ R. H. Dicke, «Principle of Equivalence and Weak Interactions», *Rev. Mod. Phys.* 29, p. 355 (1957).

mismos. No pueden aparecer observadores hasta que haya transcurrido aproximadamente el tiempo de vida media de una estrella que quema hidrógeno en la secuencia principal, y es difícil que aquéllos sobrevivan una vez que las estrellas se han apagado. Esta escala temporal está controlada por el hecho de que las constantes fundamentales de la Naturaleza sean

$$t(\text{estrella}) \approx (Gm_{\text{pr}}^2/hc)^{-1} h/m_{\text{pr}}c^2 \approx \\ \approx 10^{40} \times 10^{-23} \text{ segundos} \approx 10\,000 \text{ millones de años}$$

No esperaríamos estar observando el Universo en tiempos significativamente mayores que $t(\text{estrella})$, puesto que todas las estrellas estables se habrían expandido, enfriado y muerto. Tampoco seríamos capaces de ver el Universo en tiempos mucho menores que $t(\text{estrella})$ porque no podríamos existir. No habría estrellas ni elementos pesados como el carbono. Parece que estamos encorsetados por los hechos de la vida biológica para mirar al Universo y desarrollar teorías cosmológicas una vez que haya transcurrido un tiempo $t(\text{estrella})$ desde el Big Bang.

Así pues, el valor del Gran Número de Dirac $N(t)$ no es en absoluto aleatorio. Debe tener un valor próximo al que toma $N(t)$ cuando t está próximo al valor $t(\text{estrella})$.

Si consideramos el valor de N en el instante $t(\text{estrella})$ encontramos precisamente la coincidencia del Gran Número de Dirac. Todo lo que la coincidencia de Dirac dice es que vivimos en un tiempo de la historia cósmica posterior a la formación de las estrellas y anterior a

su muerte. Esto no es sorprendente. Dicke nos está diciendo que no podríamos dejar de observar la coincidencia de Dirac: es un requisito para que exista vida como la nuestra. No hay necesidad de abandonar la teoría de la gravitación de Einstein exigiendo que G varíe, como Dirac exigía implícitamente, ni necesitamos deducir una conexión numerológica entre la intensidad de la gravedad y el número de partículas en el Universo como había pensado Eddington. La coincidencia del Gran Número no es más sorprendente que la existencia de la propia vida.

La respuesta de Dirac, sus primeros comentarios escritos sobre cosmología durante más de veinte años, a esta inusual perspectiva sobre las observaciones cosmológicas fue bastante tibia:

En la hipótesis de Dicke sólo podrían existir planetas habitables durante un limitado período de tiempo. Con mi hipótesis podrían existir indefinidamente en el futuro y la vida no tendría por qué terminar nunca. No hay un argumento decisivo para escoger entre estas hipótesis. Yo prefiero la que admite la posibilidad de una vida sin fin.

Aunque estaba dispuesto a aceptar que sería poco probable que existiera vida antes de que las estrellas se hubieran formado, no lo estaba tanto a conceder que no pudiera continuar mucho después de que las estrellas se hubieran consumido. Con la idea de Dirac de G variable las coincidencias seguirían viéndose en cualquier tiempo, pero en la hipótesis de Dirac sólo se verían cerca de la época actual. Dirac no pensaba que fuera un problema en su teoría tener planetas

habitables en el lejano futuro. Sin embargo, si la gravedad se está haciendo más débil no está claro que las estrellas y los planetas pudieran existir en el futuro lejano. Cuando menos, otras constantes tendrían que variar para mantener el equilibrio entre la gravedad y las otras fuerzas de la Naturaleza que hacen posible su existencia.

Sorprende que otros cosmólogos notables como Milne hubieran argumentado previamente en dirección opuesta a la de Dicke. Milne consideraba algo sospechosa la aparición de coincidencias de Grandes Números en las teorías de Eddington. No creía que «ninguna teoría fundamental» de la Naturaleza pudiera llegar a explicar coincidencias entre Grandes Números precisamente porque los Grandes Números incluían la edad actual del Universo. Puesto que no había nada especial en el tiempo presente en el que estamos viviendo, ninguna teoría fundamental de la física podía predecirlo o discriminarlo, y por ello no podía explicar las coincidencias:

Hay necesariamente una cantidad definida empíricamente, t [la edad actual del Universo], que aparece en estas expresiones, pues esto simplemente mide la posición del instante en el que casualmente estamos viendo el Universo. Este, por supuesto, es incapaz de predecir... La circunstancia de que la teoría de Eddington sobre las constantes de la Naturaleza parece predecirlo... sobre bases a priori es a mi entender un argumento en contra de la teoría de Eddington... pues se asemeja en mucho a la hazaña de predecir la edad del Universo en el

*momento en que casualmente lo estamos viendo; lo que sería absurdo*¹⁷⁸.

Dirac demostró que, por el contrario, uno podía ciertamente predecir algo muy concreto sobre la edad del Universo si son seres basados en el carbono los que están haciendo la predicción.

El punto de Dicke puede ser reformulado de una manera aún más sorprendente. Para que un Universo Big Bang contenga los ladrillos básicos¹⁷⁹ necesarios para la evolución posterior de la complejidad bioquímica debe tener una edad al menos tan larga como el tiempo que se necesita para que las reacciones nucleares en las estrellas produzcan dichos elementos.

Esto significa que el Universo observable debe tener al menos diez mil millones de años y por ello, puesto que se está expandiendo, debe tener un tamaño de al menos diez mil millones de años luz. No podríamos existir en un Universo que fuera significativamente más pequeño.

A pesar de la antipatía de Dirac por el enfoque de Dicke, podemos encontrar una aplicación inusual de una idea similar que introdujo para salvar su teoría de que G decrece a medida que el Universo envejece.

Después de que Edward Teller y otros hubieran descubierto los problemas generados por una variación de la gravedad tan radical para la historia de las estrellas y la vida en la Tierra, hubo intentos

¹⁷⁸ E. A. Milne, *Modern Cosmology and the Christian Conception of God*, Oxford University Press, Londres, 1952, p. 158.

¹⁷⁹ Por esto entendemos elementos químicos más pesados que el helio.

de mantener viva la teoría de la G variable suponiendo que estrellas como el Sol atravesaban periódicamente nubes densas de las que tomaban material con suficiente rapidez como para compensar los efectos de la G decreciente en la atracción gravitatoria del Sol. Gamow pensaba que semejante hipótesis

sería muy poco elegante, de modo que la cantidad total de elegancia de la teoría entera habría decrecido considerablemente incluso si la elegante hipótesis [$G \propto t^{-1}$] se hubiera salvado. Por ello, nos vemos devueltos a la hipótesis de que 10^{40} es simplemente el número máximo que Dios todopoderoso pudo escribir durante el primer día de la creación.

Es interesante notar la insistencia de Gamow en la «poca elegancia» de amañar la teoría de esta manera, porque Dirac siempre exhortaba a los demás a buscar «belleza» (que no es necesariamente lo mismo que simplicidad, como le gustaba señalar) en las ecuaciones que describen una teoría física.

De hecho, en cierta ocasión escribió a Heisenberg acerca de una de sus teorías propuestas que

mi objeción principal a tu trabajo es que yo no creo que tu ecuación básica... tenga suficiente belleza matemática para ser una ecuación fundamental de la física. La ecuación correcta, cuando se descubra, incluirá probablemente algún tipo nuevo de

*matemáticas y despertará gran interés entre los matemáticos puros*¹⁸⁰.

Pese a todo Dirac defendía con gusto la idea de acreción, por improbable que pudiera parecer, sobre la base de que podría ser necesaria para que existiera la vida:

*No veo tu objeción a la hipótesis de la acreción. Podemos suponer que el Sol ha atravesado unas nubes densas, lo bastante como para que recoja materia suficiente para mantener la Tierra a una temperatura habitable durante 10^9 años. Puedes decir que es improbable que la densidad debiera ser precisamente la justa para este objetivo. Estoy de acuerdo. Es improbable. Pero este tipo de improbabilidad no importa. Si consideramos todas las estrellas que tienen planetas, sólo una fracción muy pequeña de ellas habrá atravesado nubes de la densidad correcta para mantener en sus planetas una temperatura constante el tiempo necesario para que se desarrolle vida avanzada. No habrá tantos planetas con hombres como pensábamos antes. Sin embargo, con tal de que haya uno es suficiente para que los hechos encajen. De modo que no hay ninguna objeción a suponer que nuestro Sol ha tenido una historia muy inusual e improbable.*¹⁸¹

¹⁸⁰ P. A. M. Dirac, carta a Heisenberg, 6 de marzo 1967, citada por L. M. Brown y H. Rechenberg, en B. Kursunoglu y E. Wigner (eds)., *Paul Adrien Maurice Dirac. Reminiscences about a Great Physicist*, Cambridge University Press, Cambridge, 1987, p. 148.

¹⁸¹ Dirac a Gamow, 20 de noviembre 1967, citado en H. Kragh, *Dirac: A Scientific Biography*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 238.

Aquí se presenta una notable contradicción, si tenemos en cuenta que seis años antes se había opuesto a la inclusión que hacía Dicke de la vida humana como un factor al evaluar la probabilidad de que aparezcan situaciones inusuales.

Un argumento hermosamente simple con respecto a la inevitabilidad del gran tamaño del Universo *para nosotros* aparece por primera vez en el texto de las Conferencias Bampton impartidas por el teólogo de Oxford Eric Mascall. Fueron publicadas en 1956 con el título *Teología cristiana y ciencia natural* y el autor atribuye la idea básica a Gerald Whitrow.

Estimulado por las sugerencias de Whitrow, escribe:

Si tenemos tendencia a sentirnos intimidados sólo por el tamaño del Universo, está bien recordar que en algunas teorías cosmológicas existe una conexión directa entre la cantidad de materia en el Universo y las condiciones en cualquier porción limitada del mismo, de modo que en efecto puede ser necesario que el Universo tenga el enorme tamaño y la enorme complejidad que la astronomía moderna ha revelado para que la Tierra sea un posible hábitat para seres vivos¹⁸².

Esta simple observación puede ampliarse para ofrecernos una comprensión profunda de los sutiles lazos que existen entre aspectos superficialmente diferentes del Universo que vemos a

¹⁸² E. Mascall, *Christian Theology and Natural Science*, Longmans, Londres, 1956, p. 43. Mascall se refiere a «un artículo inédito» de Whitrow. Cuando yo pregunté al profesor Whitrow sobre esto en 1979 él me respondió con disculpas que «no tengo ningún recuerdo de lo que pasó con el “artículo inédito”, si es que existió».

nuestro alrededor y las propiedades que se necesitan si un Universo va a contener seres vivos de cualquier tipo.

§. Grande y viejo, oscuro y frío

Es un mundo viejo y divertido: un hombre tiene suerte si consigue salir vivo de él.

W. C. FIELDS¹⁸³

Hemos visto que los procesos de la alquimia estelar necesitan tiempo: miles de millones de años de tiempo. Y debido a que nuestro Universo se está expandiendo, tiene que tener un tamaño de miles de millones de años luz para que el tiempo de producir los ladrillos para una complejidad viviente sea suficiente. Un Universo que fuera sólo del tamaño de nuestra Vía Láctea, con sus cien mil millones de estrellas, tendría poco más de un mes. Otra consecuencia de un viejo Universo en expansión, aparte de su gran tamaño, es que es frío, oscuro y solitario. Cuando se expande el volumen de cualquier bola de gas o radiación, la temperatura de sus constituyentes decrece en proporción al incremento de tamaño. Un Universo que sea suficientemente grande y frío para contener los ladrillos de la complejidad será muy frío y los niveles medios de energía radiante serán tan bajos que el espacio parecerá oscuro en todas partes.

Es instructivo reflexionar sobre todas las respuestas metafísicas y religiosas que, a lo largo de los siglos, se han dado a la oscuridad

¹⁸³ W. C. Fields, *You're Telling Me*, 1934.

del cielo nocturno y a las figuras de las estrellas bordadas en él; a la inmensidad del espacio y nuestro lugar secundario dentro del mismo, un mero punto en el gran esquema de las cosas. La cosmología moderna muestra que estos aspectos no son accidentes aleatorios. Son parte de la interconexión general del Universo. Son, de hecho, características necesarias de cualquier Universo que contenga observadores vivos. Y, de forma notable, el efecto metafísico de este tipo de Universo sobre sus habitantes muy bien puede ser un inevitable producto colateral para cualesquiera seres sensibles en cualquier lugar. El Universo tiene la curiosa propiedad de hacer que los seres vivos piensen que sus inusuales propiedades son poco propicias a la existencia de vida, cuando de hecho son esenciales para ella.

El Universo visible contiene sólo:

- 1 átomo por metro cúbico
- 1 Tierra por $(10 \text{ años luz})^3$
- 1 estrella por $(10^3 \text{ años luz})^3$
- 1 galaxia por $(10^7 \text{ años luz})^3$
- 1 «Universo» por $(10^{10} \text{ años luz})^3$

Figura 6.1. La densidad de materia en nuestro Universo expresada en varias unidades de volumen diferentes que muestran cómo las galaxias, estrellas, planetas y átomos están realmente en la media. No debería sorprendernos que la vida extraterrestre sea tan rara.

Si niveláramos todo el material del Universo para conseguir un mar uniforme de átomos veríamos qué poco hay de cualquier cosa. Habría poco más de aproximadamente un átomo por cada metro cúbico de espacio. Ningún laboratorio en la Tierra podría producir un vacío artificial que fuera remotamente próximo a éste. El mejor vacío hoy alcanzable contiene aproximadamente un billón de átomos por metro cúbico.

Esta manera de mirar el Universo ofrece algunas nuevas ideas importantes acerca de las propiedades que nos muestra. Muchas de sus características más sorprendentes —su inmenso tamaño y su enorme edad, la soledad y oscuridad del espacio— son condiciones necesarias para que haya observadores inteligentes como nosotros. No debería sorprendernos que la vida extraterrestre, si existe, sea tan rara y tan lejana. La baja densidad media de materia en el Universo significa que si agregáramos material en estrellas o galaxias, deberíamos esperar que las distancias medias entre estos objetos fueran enormes. En la figura 6.1 se expresa la densidad de materia en el Universo de varias maneras diferentes que muestran el alejamiento que cabría esperar entre los planetas, las estrellas y las galaxias.

En la figura 6.2 mostramos la trayectoria en expansión de nuestro Universo a medida que pasa el tiempo. Poco a poco, el ambiente del Universo se enfría y permite que se formen átomos, moléculas, galaxias, estrellas y planetas.

Nosotros estamos situados en un nicho concreto de historia cósmica entre el nacimiento y la muerte de las estrellas.

Parece que también el filósofo existencialista Karl Jaspers se sintió provocado por los escritos de Eddington a considerar el significado de nuestra existencia en un lugar particular en una época particular de la historia cósmica.

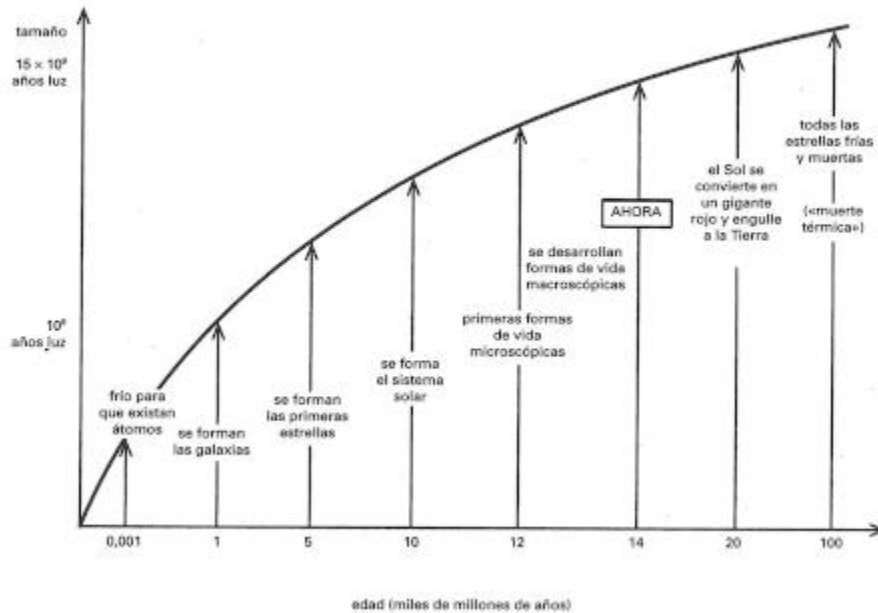


Figura 6.2. El entorno cambiante en un Universo en expansión como el nuestro. A medida que el Universo se enfría y envejece es posible que se formen átomos, moléculas, galaxias, estrellas, planetas y organismos vivos. En el futuro las estrellas agotarán su combustible nuclear y morirán. Hay un nicho de historia cósmica en el que nuestro tipo de evolución biológica debe ocurrir por primera vez, si es que ocurre alguna vez.

En su influyente libro¹⁸⁴ escrito en 1949, poco después de la muerte de Eddington, pregunta:

¿Por qué vivimos y desarrollamos nuestra historia en este punto concreto del espacio infinito, en un minúsculo grano de polvo en el Universo, en un rincón marginal? ¿Por qué precisamente ahora en el tiempo infinito? Éstas son cuestiones cuya insolubilidad nos hace conscientes de un enigma.

El hecho fundamental de nuestra existencia es que parecemos estar aislados en el cosmos. Somos los únicos seres racionales capaces de expresarse en el silencio del Universo. En la historia del sistema solar se ha dado en la Tierra, durante un período de tiempo infinitesimalmente corto, una situación en la que los seres humanos evolucionan y adquieren conocimiento de sí mismos y de existir... Dentro del cosmos ilimitado, en un minúsculo planeta, durante un minúsculo período de algunos milenios, algo ha tenido lugar como si este planeta fuera lo que abarca todo, lo auténtico. Éste es el lugar, una mota en la inmensidad del cosmos, en el que el ser ha despertado con el hombre.

Hay aquí algunas grandes hipótesis sobre el carácter único de la vida humana en el Universo. En cualquier caso se plantea la pregunta, aunque no se responde, de por qué estamos aquí en el

¹⁸⁴ K. Jaspers, *The Origin and Goal of History*, trad. M. Bullock, Greenwood Press, Westpoint, 1976, p. 237, publicado por primera vez en 1949 como *Vom Ursprung und Ziel der Geschichte*. [Hay traducción española: *Origen y meta de la historia*, Alianza, Madrid, 1985]. Agradezco a Yuri Balashov el haber llamado mi atención respecto a este trabajo.

tiempo y lugar en que lo hacemos. Hemos visto que la cosmología moderna puede ofrecer una respuesta iluminadora a esta pregunta.

§. El número más grande de todos

Al-Gor'itmo, n. Operación matemática que se repite muchas veces hasta que converge al resultado deseado, especialmente en Florida.

The Grapevine

Los astrónomos están acostumbrados a números enormes. Se enfrentan al reto de explicar a los profanos lo que realmente significan millones y millones de estrellas con alguna analogía sencilla. Sólo cuando la deuda nacional norteamericana ascendió a niveles astronómicos aparecieron repentinamente en las páginas financieras de los periódicos números superiores a la cantidad de estrellas de la Vía Láctea o a las galaxias del Universo¹⁸⁵. Pese a todo, y curiosamente, si uno quiere números realmente grandes, números que dejan pequeños incluso a los 10^{80} de Eddington y Dirac, la astronomía no es el lugar donde buscarlos. Los números grandes de la astronomía son aditivos. Aparecen porque estamos contando estrellas, planetas, átomos y fotones en un volumen

¹⁸⁵ Es una coincidencia interesante (también parcialmente explicada por el hecho de que vivimos con más probabilidad en la época en que brillan las estrellas) que el número de estrellas de una galaxia es aproximadamente igual al número de galaxias del Universo visible. Ambos números son aproximadamente cien mil millones. En el futuro lejano (si hay estrellas y galaxias) el Universo observable será más grande y contendrá más galaxias.

enorme. Si uno quiere números realmente enormes tiene que encontrar un lugar donde las posibilidades más que sumarse se multipliquen. Para esto se necesita complejidad. Y para la complejidad se necesita biología.

En el siglo XVII el físico inglés Robert Hooke hizo un cálculo del «número de ideas independientes que la mente es capaz de mantener¹⁸⁶». La respuesta que obtuvo era 3 155 760 000. Por grande que este número pudiera parecer (no vivimos lo bastante para contarlo) ahora se vería como una asombrosa subestimación. Nuestros cerebros contienen unos diez mil millones de neuronas, de cada una de las cuales salen antenas, o axones, que a su vez se unen aproximadamente a otras mil. Estas conexiones desempeñan un papel en la creación de nuestras ideas y recuerdos. Cómo se hace es todavía uno de los secretos mejor guardados de la Naturaleza. Mike Holderness sugiere que una manera de estimar¹⁸⁷ el número de ideas posibles que podría concebir un cerebro es contar todas estas conexiones. El cerebro puede hacer muchas cosas a la vez, de modo que podríamos verlo como cierto número, digamos un millar, de pequeños grupos de neuronas. Si cada neurona establece mil conexiones diferentes con los otros diez millones de neuronas en el mismo grupo, entonces el número de formas diferentes en que podría establecer conexiones en el mismo grupo de neuronas es $10^7 \times 10^7 \times 10^7 \times \dots$ un millar de veces. Esto

¹⁸⁶ Se informa de esto en Albrecht von Haller, *Elementa Physiologiae*, vol. 5, Londres, 1786, p. 547.

¹⁸⁷ Estas estimaciones se deben a Mike Holderness, «Think of a Number», *New Scientist*, 16 de junio de 2001, p. 45.

da 10^{7000} posibles estructuras de conexiones. Pero éste es sólo el número para un grupo de neuronas. El número total para 10^7 neuronas es 10^{7000} multiplicado por sí mismo 10^7 veces. Esto es $10^{70\ 000\ 000\ 000}$. Si los aproximadamente 1000 grupos de neuronas pueden operar independientemente unos de otros, entonces cada uno de ellos contribuye con $10^{70\ 000\ 000\ 000}$ cableados posibles, lo que aumenta el total hasta el número de Holderness, $10^{70\ 000\ 000\ 000\ 000}$.

Esta es la estimación moderna del número de estructuras eléctricas diferentes que podría sostener el cerebro. En cierto sentido es el número de posibles pensamientos o ideas diferentes que podría tener un cerebro humano. Resaltamos el *podría*. Este número es tan inmenso que deja en mantillas al pequeño número de átomos en el Universo observable: apenas 10^{80} . Pero a diferencia del número de átomos en el Universo, su inmensidad no es el resultado de llenar un volumen enorme con pocas cosas. El cerebro es más bien pequeño. Sólo contiene unos 10^{27} átomos. El enorme número procede de la complejidad potencial del número de conexiones entre componentes. Esto es lo que entendemos por complejidad. Surge del número de formas diferentes en que pueden conectarse las componentes, antes que de la identidad de dichos componentes. Y, puesto que estos Grandes Números surgen del número de permutaciones disponibles para una compleja red de interruptores, no será explicable en términos de las constantes de la Naturaleza de la misma forma que lo son los Grandes Números astronómicos. No sólo son más grandes; son también diferentes.

Capítulo 7

La biología y las estrellas

*Las cosas son más como son
ahora que lo fueron nunca antes.*

DWIGHT D. EISENHOWER

¿Es viejo el Universo?

Las cuatro edades del hombre:

Lager, Aga, Saga y Gaga.

ANÓNIMO

Cuando pensamos en la edad y el tamaño del Universo lo hacemos generalmente utilizando medidas de tiempo y espacio como años, kilómetros o años luz. Como ya hemos visto, estas medidas son extraordinariamente antropomórficas. ¿Por qué medir la edad el Universo utilizando un «reloj» que hace un «tic» cada vez que nuestro planeta completa una órbita alrededor de su estrella madre? ¿Por qué medir su densidad en términos de átomos por metro cúbico? Las respuestas a estas preguntas son por supuesto la misma: porque es conveniente y siempre lo hemos hecho así. Pero ésta es una situación en donde resulta especialmente apropiado utilizar las unidades «naturales» de masa, longitud y tiempo que Stoney y Planck introdujeron para ayudarnos a escapar de la camisa de fuerza que suponía la perspectiva centrada en el ser humano. Si adoptamos unidades de Planck vemos que

la edad actual del Universo visible $\approx 10^{60}$ tiempos de Planck

El tamaño del Universo visible es asimismo enorme:

tamaño actual del Universo visible $\approx 10^{60}$ longitudes de Planck

y también lo es su masa:

masa actual del Universo visible $\approx 10^{60}$ masas de Planck

Vemos así que la bajísima densidad de materia en el Universo es un reflejo del hecho de que

densidad actual del Universo visible $\approx 10^{-120}$ de la densidad de Planck

y la temperatura del espacio, a 3 grados sobre el cero absoluto, es, por tanto,

temperatura actual del Universo visible $\approx 10^{-30}$ de la temperatura de Planck.

Estos números extraordinariamente grandes y estas fracciones extraordinariamente minúsculas nos muestran inmediatamente que el Universo está estructurado en una escala sobrehumana de

proporciones asombrosas cuando la sopesamos en los balances de su propia construcción.

Con respecto a sus propios patrones el Universo es viejo. El tiempo de vida natural de un mundo gobernado por la gravedad, la relatividad y la mecánica cuántica es el fugazmente breve tiempo de Planck. De algún modo nuestro Universo se las ha arreglado para seguir expandiéndose durante un inmenso número de tiempos de Planck. Parece que es mucho más viejo de lo que debería ser. Más adelante veremos que los cosmólogos creen saber cómo se produjo esto.

Pero, pese a la enorme edad del Universo en «tics» de tiempo de Planck, hemos aprendido que casi todo este tiempo es necesario para producir estrellas y los elementos químicos que sustentan la vida.

§. La oportunidad de una vida

*En el final del Universo uno tiene
que utilizar mucho el tiempo
pretérito... todo ha sido hecho,
¿sabes?*

DOUGLAS ADAMS¹⁸⁸

¿Por qué nuestro Universo no es mucho más viejo de lo que parece ser? Es fácil entender por qué el Universo no es mucho más joven. Las estrellas tardan mucho tiempo en formarse y producir los

¹⁸⁸ D. Adams, *The Restaurant at the End of the Universe*, Pan, Londres, 1980, p. 84.

elementos más pesados que requiere la complejidad biológica. Pero los universos viejos también tienen sus problemas. Conforme pasa el tiempo en el Universo el proceso de formación de estrellas se frena. Todo el gas y el polvo que constituyen las materias primas de las estrellas habrán sido procesados por las estrellas y eyectados al espacio intergaláctico donde no pueden enfriarse y fundirse en nuevas estrellas. Pocas estrellas supone pocos sistemas solares y planetas. Los planetas que se forman son menos activos que los que se formaron antes. La producción de elementos radioactivos en las estrellas disminuirá, y los que se formen tendrán semividas más largas. Los nuevos planetas serán menos activos geológicamente y carecerán de muchos de los movimientos internos que impulsan el vulcanismo, la deriva continental y la elevación de las montañas en la Tierra. Si esto también hace menos probable la presencia de un campo magnético en un planeta, entonces será muy poco probable que la vida evolucione hasta formas complejas. Las estrellas típicas, como nuestro Sol, emiten desde su superficie un viento de partículas cargadas eléctricamente que barre las atmósferas de los planetas en órbita a menos que el viento pueda ser desviado por un campo magnético. En nuestro sistema solar el campo magnético de la Tierra ha protegido su atmósfera del viento solar, pero Marte, que no está protegido por ningún campo magnético, perdió su atmósfera hace tiempo.

Probablemente no es fácil mantener una larga vida en un planeta del sistema solar. Poco a poco hemos llegado a apreciar cuán precaria es. Dejando a un lado los intentos que siguen realizando

los seres vivos de extinguirse a sí mismos, agotar los recursos naturales, propagar infecciones letales y venenos mortales, también hay serias amenazas externas. Los movimientos de cometas y asteroides constituyen una seria amenaza para el desarrollo y persistencia de vida inteligente en sus primeras etapas. Los impactos no son infrecuentes y en el pasado lejano han tenido efectos catastróficos sobre la Tierra. Somos afortunados por estar doblemente protegidos de estos impactos: por nuestra pequeña y cercana vecina, la Luna, y por nuestro vecino lejano y gigante, Júpiter. Júpiter tiene una masa mil veces mayor que la Tierra y está situado en las afueras del sistema solar donde su poderosa atracción gravitatoria puede capturar objetos entrantes que se dirigen hacia el interior de él. En julio de 1994 pudimos ser testigos de la fragmentación y captura del cometa Schumacher-Levy 9 por Júpiter¹⁸⁹. En el siglo XX tuvimos dos impactos importantes en la Tierra, uno en América del Sur y el otro en Tunguska, al norte de Rusia. Hemos estado haciendo trampas con la ley de los promedios y un día nuestra suerte cambiará. Algunos gobiernos ya están invirtiendo esfuerzos en seguir las trayectorias de los asteroides y están planteando medidas contra objetos próximos a la Tierra. Evidentemente, cuanto más tiempo dura un planeta mayores son las probabilidades de que sea golpeado (ver figura 7.1).

Curiosamente estas intervenciones externas sobre la evolución de la Tierra tienen otra cara.

¹⁸⁹ Para imágenes de estos espectaculares acontecimientos ver http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/sl9/comet_images.html.

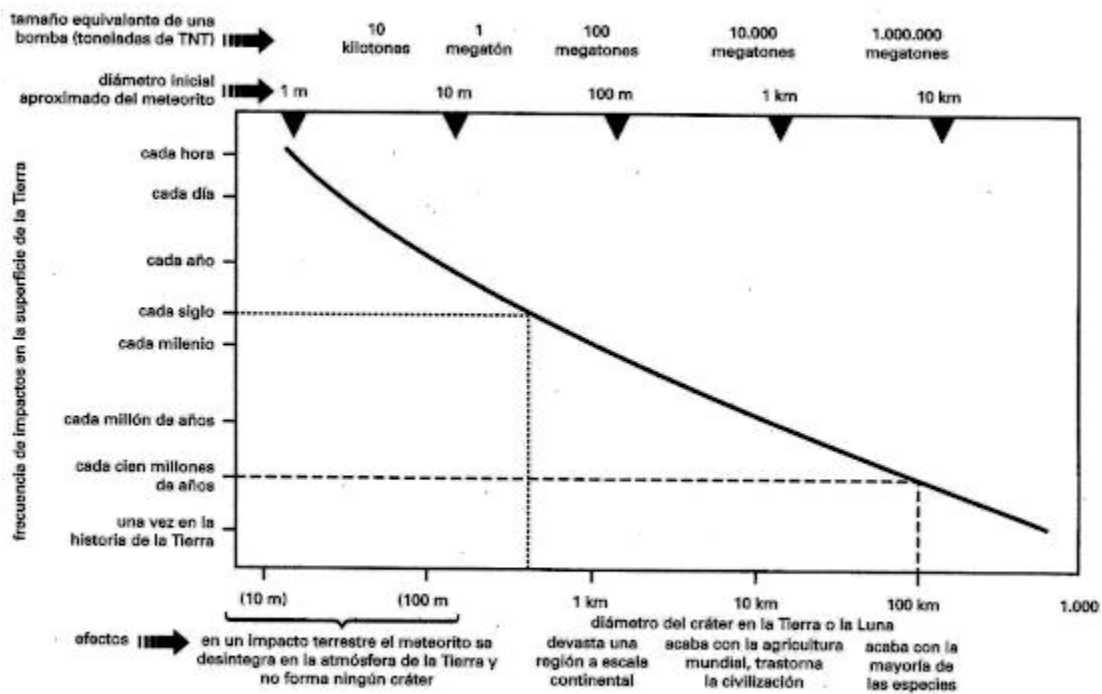


Figura 7.1. Frecuencia media de los impactos de meteoritos de diferentes tamaños en la superficie de la Tierra. También se muestran el diámetro del meteorito y el diámetro del cráter dejado en la superficie de la Tierra junto con los efectos probables¹⁹⁰.

Es cierto que pueden producir extinciones globales y retrasar la evolución de la complejidad en millones de años. Pero, con moderación, pueden tener un efecto positivo y acelerador sobre la evolución de formas de vida inteligente. Cuando los dinosaurios se extinguieron por el impacto de un gran meteorito o un cometa que chocó con la Tierra en la península de Yucatán hace 65 millones de

¹⁹⁰ Versión modificada de la figura 8.1 en P. D. Ward y D. Brownlee, *Rare Earth*, Copernicus, Nueva York, 2000, p. 165.

años, al final de la Era Mesozoica, la Tierra fue rescatada de un callejón sin salida evolutivo. Parece que los dinosaurios evolucionaron por una vía que desarrollaba el tamaño físico antes que el tamaño cerebral. La desaparición de los dinosaurios, junto con muchas otras formas de vida sobre la Tierra en aquella época, hizo un hueco para la aparición de los mamíferos. Además limpió algunos nichos de competidores por los recursos naturales. Lo cual estimuló una rápida aceleración del desarrollo de la diversidad. Quizá los impactos desempeñen un papel vital en la puesta en marcha de la evolución cuando se atasca en caminos poco prometedores. Sin impactos, los procesos de desarrollo pueden establecerse en un camino estable pero poco prometedor con extinciones sistemáticas que reducen continuamente la diversidad de especies (ver figura 7.2). Unas condiciones duras y rápidamente cambiantes estimulan la adaptación y aceleran el proceso evolutivo. También incrementan la diversidad, y crear diversidad es el mejor seguro de vida que puede tener un planeta contra la extinción total de su biología por un impacto futuro. Aunque no lo veríamos igual si fuéramos dinosaurios.

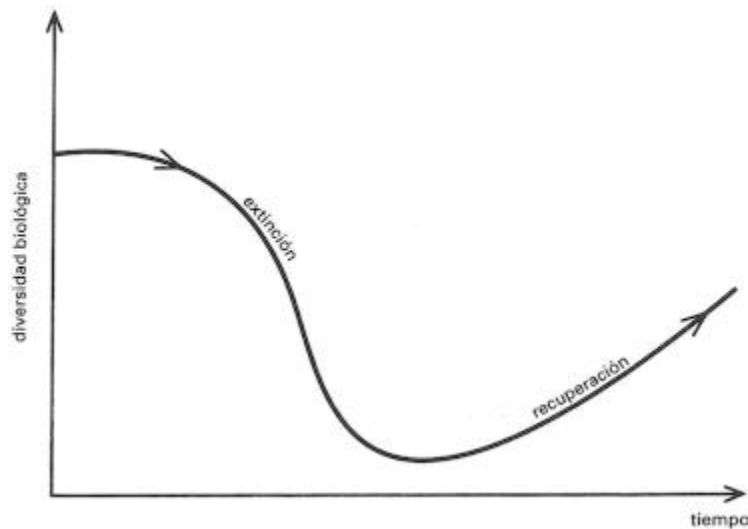


Figura 7.2. Pauta de la respuesta a una crisis medioambiental que causa en la Tierra una extinción en masa¹⁹¹.

En nuestro sistema solar la vida se desarrolló por primera vez sorprendentemente pronto tras la formación de un entorno terrestre hospitalario. Hay algo inusual en esto. Supongamos que llamamos $t(\text{bio})$ al tiempo que habitualmente se necesita para que se desarrolle la vida. A partir de la evidencia de nuestro sistema solar, que tiene unos 4600 miles de millones de años, parece que el tiempo necesario para que las estrellas se asienten y creen una fuente estable de calor y luz, $t(\text{estrella})$, no es muy diferente de $t(\text{bio})$ porque hemos encontrado formas simples de vida bacteriana terrestre que tienen varios miles de millones de años.

Esta similitud entre $t(\text{bio})$ y $t(\text{estrella})$ parece una coincidencia. A primera vista cabría suponer que los procesos bioquímicos microscópicos y las condiciones ambientales locales que se

¹⁹¹ *Ibid.*, p. 173.

combinan para determinar la magnitud de $t(\text{bio})$ son *independientes* de los procesos nucleares astrofísicos y los procesos gravitatorios que determinan el tiempo de vida estelar típico de una estrella. Sin embargo, esta hipótesis lleva a la sorprendente conclusión de que deberíamos esperar que las formas de vida extraterrestre sean excepcionalmente raras. El argumento, en su forma más simple, introducido por Brandon Carter¹⁹² y desarrollado por mí mismo y Frank Tipler¹⁹³, y aún minuciosamente investigado hoy¹⁹⁴ procede así. Si $t(\text{bio})$ y $t(\text{estrella})$ están desconectados uno de otro, entonces el tiempo que tarda en aparecer la vida será aleatorio con respecto a la escala de tiempo estelar $t(\text{estrella})$. De modo que lo más probable¹⁹⁵ es que encontráramos o bien que $t(\text{bio})$ es mucho mayor que $t(\text{estrella})$ o bien que $t(\text{bio})$ es mucho menor que $t(\text{estrella})$.

Recapitulemos ahora. Por una parte, si $t(\text{bio})$ es generalmente mucho menor que $t(\text{estrella})$, tenemos que preguntamos por qué el primer sistema solar habitado observado (¡el nuestro!) tiene un $t(\text{bio})$ aproximadamente igual a $t(\text{estrella})$. Según nuestra lógica, sería muy poco probable. Por otra parte, si $t(\text{bio})$ suele ser mucho mayor que $t(\text{estrella})$, entonces el primer sistema solar habitado observado (el

¹⁹² B. Carter, *Phi. Trans. Roy. Soc. A* 310, p. 347 (1983).

¹⁹³ J. D. Barrow y F. J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, Londres, 1986.

¹⁹⁴ Hay ahora una vasta literatura sobre el denominado «argumento del Juicio Final», ver por ejemplo J. Leslie, *The End of the World: The Science and Ethics of Human Extinction*, Routledge, Londres, 1996; H. B. Nielsen, «On Future Population», *Acta, Phys. Polonica B* 20, 427 (1989); J. R. Gott, «Implications of the Copernican Principle for our Future Prospects», *Nature* 363, pp. 315-319 (1993) y «How the Copernican Principle is Consistent with a Bayesian Approach», *Nature* 368, p. 108 (1994). Para una selección de otros artículos ver la dirección en la red de Nick Bostrom en <http://www.anthropic-principle.com/preprints.html>.

¹⁹⁵ Porque hay muchas más maneras de que los dos tiempos sean muy diferentes que de que sean similares.

nuestro) es una chiripa estadística al ser $t(\text{bio})$ aproximadamente igual a $t(\text{estrella})$, puesto que los sistemas con $t(\text{bio})$ mucho mayor que $t(\text{estrella})$ aún tienen que evolucionar. Así pues, nos vemos llevados a concluir que somos una rareza, uno de los primeros sistemas vivos en entrar en escena.

Para escapar de esta conclusión tenemos que socavar una de las hipótesis subyacentes al argumento que lleva a ella. Por ejemplo, si suponemos que $t(\text{bio})$ no es independiente de $t(\text{estrella})$, entonces las cosas parecen diferentes. Si la razón $t(\text{bio})/t(\text{estrella})$ aumenta con $t(\text{estrella})$, entonces puede llegar a ser probable que encontremos $t(\text{bio})$ aproximadamente igual a $t(\text{estrella})$. Mario Livio¹⁹⁶ ha sugerido cómo podían estar relacionados $t(\text{bio})$ y $t(\text{estrella})$ mediante una relación de esta forma general: para ello supone que la evolución de una atmósfera planetaria que sustente la vida requiere una fase inicial durante la cual el oxígeno es liberado por la fotodisociación de vapor de agua. En la Tierra esto necesitó 2400 millones de años y llevó el oxígeno atmosférico a aproximadamente una milésima de su valor actual. Cabría esperar que la longitud de esta fase fuera inversamente proporcional a la intensidad de la radiación en el intervalo de longitudes de onda 1000-2000 ángstroms, donde están los niveles moleculares clave para la absorción de agua. Quizá estudios posteriores de la evolución estelar nos permitan determinar la longitud de esta fase y establecer así una conexión entre el

¹⁹⁶ M. Livio, «How Rare Are Extraterrestrial Civilizations and When Did They Emerge?» *Astrophys. J.* 511, p. 429 (1999).

tiempo de evolución biológica y el tiempo de vida estelar en la secuencia principal.

Este modelo indica una ruta posible para vincular las escalas de tiempo bioquímico de la evolución de la vida y las escalas de tiempo astrofísico que determinan el tiempo requerido para crear un ambiente sustentado por una estrella estable que consume hidrógeno. Por supuesto, hay eslabones débiles en este argumento. Proporciona sólo una condición necesaria para que se desarrolle la vida, *no* una condición suficiente. Podríamos imaginar una expresión que diera la probabilidad de formación de un planeta alrededor de una estrella. Incluiría otros muchos factores que determinarían la cantidad de materia disponible para la formación de planetas sólidos con atmósfera a distancias que permitan la presencia de agua líquida y condiciones superficiales estables. Además, sabemos que en los procesos de formación planetaria del sistema solar hay muchos «accidentes» que han desempeñado posteriormente un papel principal en la existencia de condiciones estables y duraderas en la Tierra. Por ejemplo, como han demostrado Jacques Laskar y sus colaboradores¹⁹⁷, la presencia de resonancias entre las velocidades de precesión de los ejes de rotación de los planetas y las perturbaciones gravitatorias que sufren por parte de otros cuerpos en el sistema solar puede producir fácilmente la evolución caótica de la inclinación del eje de rotación de un planeta con respecto al plano orbital de los planetas en

¹⁹⁷ Laskar y P. Robutel, «The Chaotic Obliquity of the Planets», *Nature* 361, pp. 608-612; ver también J. D. Barrow, *The Artful Universe*, Oxford University Press, Londres, 1995, pp. 145-149.

tiempos muchos más cortos que la edad del sistema solar. Las variaciones de la temperatura superficial del planeta y de los niveles del mar son sensibles a este ángulo de inclinación, pues determina las diferencias climáticas entre lo que llamamos las «estaciones». En el caso de la Tierra, el modesto ángulo de inclinación (aproximadamente 23 grados) habría experimentado esta evolución errática de no haber sido por la presencia de la Luna. La Luna es tan grande que sus efectos gravitatorios dominan las resonancias que existen entre el movimiento de precesión del eje de rotación de la Tierra y la frecuencia de las perturbaciones gravitatorias externas debidas a los otros planetas. Como resultado, la inclinación de la Tierra oscila sólo medio grado en torno a los 23 grados durante cientos de miles de años.

Esto muestra cómo el vínculo causal entre tiempos de vida estelares y tiempos de evolución biológica puede ser un factor más bien menor en la cadena de circunstancias fortuitas que deben darse para que se formen planetas habitables y mantengan condiciones viables para la evolución de la vida durante largos períodos de tiempo.

§. Otros tipos de vida

La vida no es para todos.

MICHAEL O'DONOGHUE¹⁹⁸

¹⁹⁸ M. O'Donoghue, citado en *Playboy Magazine*, 1983.

Uno de los supuestos implícitos en pro de la inevitabilidad de un Universo grande y frío es que cualquier vida es muy parecida a la nuestra. Los biólogos parecen admitir sin problemas la posibilidad de otras formas de vida, pero no están tan seguros de que sea probable que se desarrollen espontáneamente, sin un empujón de formas de vida basadas en el carbono. La mayoría de las estimaciones de la probabilidad de que haya inteligencias extraterrestres en el Universo se centran en formas de vida similares a nosotros que habiten en planetas y necesiten agua, atmósferas gaseosas y todo lo demás. Vale la pena abrir un poco nuestra imaginación para pensar a qué podría parecerse la vida si radicara en el espacio en lugar de radicar en un planeta. El astrónomo Fred Hoyle propuso un interesante ejemplo con el que esperaba soslayar las habituales conclusiones desfavorables a las que se llegaba cuando se hablaba de la probabilidad de inteligencias extraterrestres radicadas en planetas. No contento con su exitosa carrera como astrofísico y divulgador de la ciencia, Hoyle se dedicó a la ciencia ficción con éxito notable. Su relato más famoso, *La nube negra*¹⁹⁹, fue un gran éxito editorial. Se trata de un plausible *thriller* contemporáneo que implicaba a científicos no muy diferentes del propio Hoyle. De hecho, a pesar de sus afirmaciones de que los personajes son enteramente ficticios, es difícil no identificar al héroe con él mismo. *La nube negra* fue escrita en 1957, sólo unos pocos años después del descubrimiento de coincidencias en los valores de

¹⁹⁹ F. Hoyle, *The Black Cloud*, Heinemann, Londres, 1957. [Hay traducción española: *La nube negra*, Ediciones B, Barcelona, 1988].

las constantes de la Naturaleza que tienen importantes consecuencias para la posible existencia de carbono y oxígeno, y con ello para la vida en el Universo. Había mucha polémica sobre la probabilidad de vida en otros lugares, y las dos primeras sondas espaciales soviéticas *Sputnik* fueron lanzadas en 1957. El escenario está preparado para que la Tierra se enfrente a la aproximación de una nube de gas, que abundan en el espacio interestelar, que va a pasar entre la Tierra y el Sol. Si lo hace, el calor y la luz procedentes del Sol se interrumpirán durante un cierto período, tras haber sido amplificadas durante un tiempo por reflexión desde la nube, con consecuencias potencialmente calamitosas para la Tierra. Los acontecimientos toman entonces un giro inesperado. La nube resulta ser inteligente, una forma de vida amorfa existente como un enorme sistema de complejas correlaciones moleculares que se mueve por el espacio. Tras mucha intriga y emoción la Tierra sobrevive a su breve encuentro con la nube pasajera, pero no antes de que haya establecido un diálogo con ella y haya aprendido a decodificar las señales que utiliza para hablar con nosotros. Pero el mensaje más importante que Hoyle trataba de transmitir con este relato es el posible error de suponer que la vida existe en planetas sólidos. Quizá la complejidad química necesaria para ser calificada como «vida» podría existir en enormes nubes moleculares estabilizadas por la fuerza de ligadura de la gravedad. Ni siquiera el carbono sería necesario en estas cunas nebulosas de vida. Treinta años más tarde Hoyle volvería a este tema en su trabajo científico y de ficción, al imaginar que en interiores cometarios podrían haberse

desarrollado moléculas autorreproductoras y difundido luego por las galaxias por el movimiento de los cometas.

Otros escritores de ciencia ficción habían explotado las posibilidades de alternativas a la química del carbono. Se sabía que el silicio forma cadenas moleculares parecidas a las del carbono, pero por desgracia tienden a ser, como el cuarzo y la arena, rígidas y poco interesantes como ladrillos para la biología. Irónicamente, la revolución informática ha mostrado desde entonces que es la física del silicio más que la química del silicio la que constituye la mayor promesa como alternativa para la vida. Pero tales formas artificiales de vida e inteligencia no evolucionan espontáneamente. Han requerido la ayuda de organismos basados en el carbono para reunir las configuraciones altamente organizadas, y por ello extraordinariamente improbables, necesarias para su persistencia y desarrollo. Estas alternativas más abstractas a la vida en forma de carne y sangre nos resultan ahora bastante familiares, y los escritores de ciencia ficción tienen que ser mucho más sutiles y no limitarse a imaginar alienígenas con químicas extrañas y nuevas formas corporales. Pero en 1957 la idea de Hoyle era una novedad. Desempeñó un papel importante al ampliar el espectro de posibilidades de la vida más allá de lo que tenían en mente la mayoría de los astrónomos. La probabilidad de vida no dependería sólo de la estadística de planetas habitables con atmósferas templadas y agua superficial y en órbita alrededor de estrellas amigables.

§. Preparaos para afrontar el Juicio Final

Si te matan, has perdido una parte muy importante de tu vida.

BROOKE SHIELDS²⁰⁰

Hay una curiosidad adicional sobre la coincidencia que existe entre el tiempo de evolución biológico y la astronomía. Puesto que no es sorprendente que las edades de las estrellas típicas sean similares a la edad actual del Universo, hay también una aparente coincidencia entre la edad del Universo y el tiempo que ha necesitado para desarrollar formas de vida como nosotros. Si miramos retrospectivamente cuánto tiempo han estado en escena nuestros ancestros inteligentes (*Homo sapiens*) vemos que han sido sólo unos doscientos mil años, mucho menos que la edad del Universo, trece mil millones de años. Nuestra historia humana ha durado menos que dos cienmilésimas de la historia del Universo. Pero si nuestros descendientes se prolongan indefinidamente en el futuro, la situación para ellos se convertirá en algo muy diferente. Supongamos que aún sigan pensando en estas cuestiones cuando el Universo tenga un billón de años. Entonces calcularían que sus ancestros inteligentes habían estado allí durante un billón menos 13 mil millones más 200 000 años. La respuesta, 987,2 miles de millones de años, es muy similar a un billón de años. Nuestros descendientes no pensarían que la historia de su civilización duró sólo una minúscula fracción de la historia del Universo. Brandon

²⁰⁰ Citado en el *Observer*, 20 de enero de 2002, p. 26.

Carter y Richard Gott han argumentado que esto parece hacemos bastante especiales comparados con observadores en el futuro muy lejano. Si uno cree que nuestra localización en la historia cósmica no debería ser así de especial, llegará a una conclusión espectacular. Para asegurar que nosotros y nuestros descendientes en el próximo futuro no tenemos una visión especial de la historia cósmica, pensando que nuestra propia historia es muchísimo menor que la historia total del Universo, *es necesario que no tengamos descendientes en el futuro lejano*. Si la vida sobre la Tierra desapareciera en unos pocos miles de años, entonces todos nuestros descendientes observarían aproximadamente el mismo número para la fracción de la historia cósmica que ha visto la existencia de civilización humana. Gott estimó que por este argumento deberíamos tener confianza en un 95 por 100 en que la vida en la Tierra terminará entre 5000 y 7,8 millones de años.

No hay razón para limitar este argumento a sucesos tan cataclísmicos como la extinción de la vida humana. Se basa en el simple hecho estadístico de que si uno observa algo en un tiempo aleatorio, existe un 95 por 100 de probabilidades de que lo estará observando durante el 95 por 100 del intervalo temporal en que puede ser observado²⁰¹. Para mostrar la versatilidad de este simple ejercicio de estadística, se pidió a Gott que preparase una serie de predicciones para el ejemplar del 1 de enero de 2000 del *Wall Street Journal*. Las escogidas se muestran en la figura 7.3.

²⁰¹ J. R. Gott, *Time Travel in Einstein's Universe*, Houghton Mifflin, Nueva York, 2001. [Hay traducción española: *Los viajes en el tiempo y el Universo de Einstein*, Tusquets, Barcelona, 2003].

<i>Fenómeno y su fecha de partida</i>	<i>Sobrevivirá probablemente</i>	
	<i>más de (años)</i>	<i>pero menos de (años)</i>
Stonehenge (2000 a. C.)	102,5	156 000
Panteón (126 d. C.)	48	73 086
Humanos (<i>Homo sapiens</i>) (200 000 años)	5100	7,8 millones
La muralla china (210 d. C.)	56	86 150
Internet (1969)	9 meses	1209
Microsoft (1975)	7 meses	975
General Motors (1908)	2,3	3588
La cristiandad (c. 33 d. C.)	50	76 713
Estados Unidos (1776)	5,7	8736
La bolsa de Nueva York (1792)	5,2	8112
Manhattan (comprada en 1626)	9,5	14 586
<i>Wall Street Journal</i> (1889)	2,8	4329
<i>New York Times</i> (1851)	3,8	5811
Universidad de Oxford (1249)	19	29 289

Figura 7.3. Con el 95% de fiabilidad, éstos son los tiempos más cortos y más largos que esperamos que hayan durado o duren en el futuro las siguientes estructuras y organizaciones, según las predicciones de Richard Gott²⁰² el día de Año Nuevo de 2000.

Es fácil calcular este tipo de estadísticas para los objetos precarios de nuestra elección. Si el tiempo actual tiene que ser aleatorio con respecto al tiempo total durante el que algo es observable, entonces cabe esperar que con un 95 por 100 de fiabilidad su futuro esté dentro de un intervalo de tiempo mayor que $1/39$ y 39 veces su edad pasada. Si sólo queremos un 50 por 100 de fiabilidad,

²⁰² *Ibíd.*, p. 221; publicado por primera vez en *Wall Street Journal*. Reproducido con el permiso de J. R. Gott.

entonces su futuro se extenderá entre $1/3$ y 3 veces su edad pasada.

§. De coincidencia a consecuencia

Moriarty: Todo lo que tengo que decir ya ha cruzado por su mente.

Holmes: Entonces posiblemente mi respuesta haya cruzado por la suya.

ARTHUR CONAN DOYLE²⁰³

La respuesta de Dicke al problema de los Grandes Números tuvo muchas consecuencias importantes. Demostró que las aproximaciones de Eddington y Dirac habían sido extremas e injustificadas. Ellos habían tratado de explicar las coincidencias de Grandes Números haciendo cambios importantes en nuestras teorías de la física. Eddington quería crear una nueva y ambiciosa «Teoría de Todo» fundamental de la que pensaba que fluirían nuevas ecuaciones que unirían las constantes de la Naturaleza en formas inesperadas, demostrando que las coincidencias de los Grandes Números eran consecuencias de un esquema profundo de la Naturaleza. Análogamente, Dirac respondió abandonando la constancia de una de las constantes de la Naturaleza tradicionales,

²⁰³ A. Conan Doyle, «The Final Problem», *The Memoirs of Sherlock Holmes*, Oxford University Press, Nueva York, 1993. «The Final Problem» fue publicado por primera vez en la revista *Strand* en diciembre de 1883 en Londres y Nueva York. [Hay traducción española: *Las memorias de Sherlock Holmes*, Anaya, Madrid, 1990].

G, para permitir así que las coincidencias entre Grandes Números diferentes sean consecuencias de una todavía desconocida teoría de la gravedad y los fenómenos atómicos. Dicke, por el contrario, siguió una aproximación menos iconoclasta. Reconoció que no todos los instantes de tiempo son iguales: sólo podemos pensar que contemplamos el Universo cuando éste sea lo suficientemente viejo para albergar seres vivos en su interior. Como resultado hay un sesgo ineliminable que plaga nuestras observaciones astronómicas y del que debemos ser conscientes. Este sesgo asegura que la coincidencia de Dirac entre Grandes Números diferentes será observada por seres como nosotros. La lección de Dicke para los científicos es una lección poderosa y simple y si uno no la tiene en cuenta, entonces, como Dirac y Eddington, puede estar condenado a internarse en un camino equivocado abandonando teorías bien establecidas en favor de nuevas posibilidades especulativas. Los críticos que no han entendido la contribución de Dicke objetan a veces que «no es una teoría científica» porque no hace predicciones y por ello «no puede someterse a prueba».

Se trata de un serio malentendido. El reconocimiento del sesgo del observador no es de ninguna manera una teoría científica rival que tenga que ponerse a prueba. Es un principio de metodología científica del que seguimos siendo inconscientes o que nos obstinamos en ignorar. Es sólo una versión sofisticada de un principio con el que están familiarizados los científicos experimentales: el sesgo experimental.

Cuando se realiza un experimento o se trata de extraer conclusiones de los datos observacionales, lo más importante que necesita el experimentador es el conocimiento de los posibles sesgos en el experimento. Tales sesgos hacen que sea más fácil recoger un tipo de evidencias antes que otras y producen un resultado equívoco. Un caso interesante que salió a la luz en los periódicos tenía que ver con la controvertida cuestión de los niveles de competencia matemática en tests realizados a escolares en diferentes países. Durante muchos años se había afirmado que el rendimiento medio de los alumnos en algunos países del sudeste asiático era significativamente mayor que en el Reino Unido. Entonces salió a la luz que en esos países los peores alumnos eran separados del total de los que habían sido evaluados en una etapa anterior del proceso educativo. Claramente, el efecto de su eliminación era hacer que las notas medias fueran más altas de lo que hubieran sido de no procederse así. Otro ejemplo reciente que me llamó la atención fue un estudio americano para descubrir si las personas que asistían a la iglesia también tendían a tener mejor salud. Un sesgo grave plagaba los resultados finales porque las personas que estuvieran muy enfermas serían incapaces de asistir a la iglesia.

Lo que muestran estos ejemplos es que los científicos de todo tipo deben esforzarse en advertir cualquier sesgo que pudiera inclinar sus datos para dar una conclusión que no está presente en la evidencia subyacente. Dicke advirtió algo similar en la visión del Universo por parte de los astrónomos. Ignoremos la lección de la selección del observador y se extraerán falsas conclusiones.

El desafío de los Grandes Números desempeñó un papel importante en el desarrollo de nuestros esfuerzos por comprender la estructura del Universo y el abanico de posibilidades disponible para las constantes de la Naturaleza que suministran el esqueleto sobre el que se encaman los resultados de las leyes de la Naturaleza. Impulsó un cuestionamiento serio de la constancia de las constantes de la Naturaleza tradicionales, especialmente la «constante» de Newton G , y llevó a la formulación de nuevas teorías de la gravedad que ampliaban la teoría de Einstein para incluir esta posibilidad. Esto también precipitó un amplio cambio de perspectiva. De repente, disciplinas como la biología y la geología, que tradicionalmente habían tenido muy poco que ver con la astronomía y la cosmología, se consideraban de importancia cósmica. Surgió una perspectiva ampliada para el pensamiento cosmológico. Algunas teorías cosmológicas podían ser puestas a prueba frente a la evidencia geofísica o paleontológica, o podían conducir a historias en las que la evolución de la vida por selección natural podría no haber ocurrido. Los astrónomos se acostumbraron a preguntar cuán finamente equilibrada estaba una situación en el Universo con respecto a la existencia de vida como la nuestra o de cualquier otro tipo concebible. Los valores observados de muchas de las constantes fundamentales de la Naturaleza o de las cantidades que describen las propiedades globales del Universo —su forma, su velocidad de expansión, su uniformidad— también parecían establecidos de forma muy delicada. Cambios muy pequeños del *statu quo* harían imposible cualquier complejidad

concebible. Los universos habitables llegaron a verse como un malabarismo difícil de conseguir.

§. Vida en un Universo eduardiano

Es más importante que una proposición sea interesante que verdadera... Pero por supuesto una proposición verdadera es más apta para ser interesante que una falsa.

ALFRED NORTH WHITEHEAD²⁰⁴

Para terminar este repaso de la forma de tratar las coincidencias de Grandes Números entre constantes de la Naturaleza por parte de Dicke, es interesante ojear retrospectivamente un tipo de argumento muy similar propuesto por Alfred Wallace en 1903. Wallace era un gran científico que hoy recibe mucho menos crédito del que merece. Fue él, antes que Charles Darwin, quien primero tuvo la idea de que los organismos vivos evolucionan por un proceso de selección natural. Afortunadamente para Darwin, quien, independientemente de Wallace, había estado reflexionando profundamente y reuniendo pruebas en apoyo de esta idea durante mucho tiempo, Wallace le escribió para contarle sus ideas en lugar de publicarlas directamente en la literatura científica. Pese a todo, hoy «la biología

²⁰⁴ A. N. Whitehead, *Adventures of Ideas*, Cambridge University Press, Cambridge, 1933, IV parte, capítulo 16.

evolucionista» se centra casi por completo en las contribuciones de Darwin.

Wallace tenía intereses mucho más amplios que Darwin y estaba interesado en muchas áreas de la física, la astronomía y las ciencias de la Tierra. En 1903 publicó un amplio estudio de los factores que hacen de la Tierra un lugar habitable y pasó a explorar las conclusiones filosóficas que podrían extraerse del estado del Universo. Su libro llevaba el altisonante título de *El lugar del hombre en el Universo*²⁰⁵, Esto era antes del descubrimiento de las teorías de la relatividad, la energía nuclear y el Universo en expansión²⁰⁶. La mayoría de los astrónomos del siglo XIX concebían el Universo como una única isla de materia, que ahora llamaríamos nuestra Vía Láctea. No se había establecido que existieran otras galaxias o cuál era la escala global del Universo. Sólo estaba claro que era grande.

Wallace estaba impresionado por el sencillo modelo cosmológico que lord Kelvin había desarrollado utilizando la ley de gravitación de Newton. Mostraba que si tomábamos una bola muy grande de materia, la acción de la gravedad haría que todo se precipitara hacia su centro. La única manera de evitar ser atraído hacia el centro era describir una órbita alrededor. El Universo de Kelvin contenía unos mil millones de estrellas como el Sol para que sus fuerzas

²⁰⁵ A. R. Wallace, *Man's Place in the Universe*, Chapman & Hall, Londres, 1903. Las páginas a que se hace referencia son de la 4.ª edición de 1912.

²⁰⁶ Sorprendentemente, apenas ha habido intentos de crear una descripción newtoniana del Universo. La notable excepción es el extraordinario artículo de lord Kelvin (William Thomson) «On the Clustering of Gravitational Matter in Any Part of the Universe», *Nature* 64, p. 626 (1901) y *Philosophical Magazine* 3, 1 (1902). Este artículo está reproducido en su totalidad en el artículo de E. R. Harrison, «Newton and the Infinite Universe», *Physics Today* 39, p. 24 (1986).

gravitatorias contrapesaran los movimientos a las velocidades observadas²⁰⁷.

Lo intrigante de la discusión²⁰⁸ de Wallace sobre este modelo del Universo es que adopta una actitud no copernicana porque ve cómo algunos lugares del Universo son más propicios a la presencia de vida que otros. Como resultado, sólo cabe esperar que nosotros estemos cerca, pero no en el centro, de las cosas.

Wallace da un argumento parecido al de Dicke para explicar la gran edad de cualquier Universo observado por seres humanos. Por supuesto, en la época de Wallace, mucho antes del descubrimiento de las fuentes de energía nuclear, nadie sabía cómo se alimentaba el Sol. Kelvin había argumentado a favor de la energía gravitatoria, pero ésta no podía cumplir la tarea. En la cosmología de Kelvin la gravedad atraería material hacia las regiones centrales donde estaba situada la Vía Láctea y este material caería en las estrellas que ya estaban allí, generando calor y manteniendo su potencia luminosa durante enormes períodos de tiempo. Aquí, Wallace ve una sencilla razón para explicar el vasto tamaño del Universo:

Entonces, pienso yo que aquí hemos encontrado una explicación adecuada de la capacidad de emisión continuada de calor y luz por parte nuestro Sol, y probablemente por muchos otros aproximadamente en la misma posición dentro del cúmulo solar. Esto haría que al principio se agregasen poco a poco masas

²⁰⁷ Él argumentó que si hubiera diez mil millones de estrellas las velocidades llegarían a ser demasiado grandes. En sistemas gravitantes que contienen una masa total M , radio R y velocidad de movimiento media v , estas tres cantidades están generalmente unidas por una relación $v^2 \approx 2GM/R$, donde G es la constante de Newton.

²⁰⁸ A. R. Wallace, *Man's Place in the Universe*, Chapman & Hall, Londres, 1912⁴, p. 248.

considerables a partir de la materia difusa en lento movimiento en las porciones centrales del Universo original; pero en un período posterior serían reforzadas por una caída de materia constante y continua desde sus regiones exteriores a velocidades tan altas como para producir y mantener la temperatura requerida de un sol como el nuestro, durante los largos períodos exigidos para el continuo desarrollo de la vida. Se ve así cómo la enorme extensión y masa del Universo original de materia difusa (como ha postulado lord Kelvin) es de la máxima importancia con respecto a este producto final de la evolución, porque sin ello, las regiones centrales frías y en movimiento relativamente lento no hubieran podido producir y mantener la energía requerida en forma de calor; mientras que la agregación de la mayor parte de su materia en el gran anillo en revolución de la galaxia era igualmente importante para impedir el flujo de materia demasiado grande y demasiado rápido hacia aquellas regiones favorecidas... Pues [en] aquellos [planetas en torno a estrellas] cuya evolución material ha continuado más rápida o más lenta no ha habido, o no habrá, tiempo suficiente para el desarrollo de la vida²⁰⁹.

Wallace ve claramente la conexión entre estas inusuales características globales del Universo y las condiciones necesarias para que la vida evolucione y prospere:

Podemos ver débilmente la contribución de todas las grandes características del Universo estelar al desarrollo exitoso de la vida. Estas son: sus vastas dimensiones; la forma que ha

²⁰⁹ Wallace, *ibíd.*, p. 255 y p. 261.

*adquirido en el poderoso anillo de la Vía Láctea; y nuestra posición cerca de su centro, pero no exactamente en él.*²¹⁰

También espera que este proceso de caída y generación de potencia solar a partir de la energía gravitatoria tendrá probablemente una forma discontinua con largos períodos de descenso que impulsan el calentamiento de las estrellas seguidos por períodos de quiescencia y enfriamiento, uno de los cuales hemos empezado a experimentar:

*He sugerido aquí un modo de desarrollo que llevaría a un crecimiento muy lento pero continuo de los soles más centrales; a un período excesivamente largo de potencia generadora de calor casi estacionaria; y finalmente, a un período igualmente largo de enfriamiento muy gradual; un período en el que nuestro Sol quizá acaba de entrar*²¹¹.

Wallace completa su análisis de las condiciones cósmicas necesarias para la evolución de la vida dirigiendo su atención a la geología y la historia de la Tierra. Aquí ve una situación mucho más complicada que la que existe en astronomía. Aprecia el cúmulo de accidentes históricos marcados por la vía evolutiva que ha llegado hasta nosotros, y cree «improbable en grado máximo» que el conjunto completo de características propicias para la evolución de la vida se encuentre en otros lugares. Esto le lleva a especular que el enorme tamaño del Universo podría ser necesario para dar a la

²¹⁰ Wallace, *ibíd.*, p. 256.

²¹¹ Wallace, *ibíd.*

vida una oportunidad razonable de desarrollarse en sólo un planeta, como el nuestro, independientemente de cuán propicio pudiera ser su entorno local:

Un Universo tan vasto y complejo como el que sabemos que existe a nuestro alrededor, quizá haya sido absolutamente necesario... para producir un mundo que se adaptase de forma precisa en todo detalle al desarrollo ordenado de la vida que culmina en el hombre²¹².

Hoy podríamos hacernos eco de este sentimiento. El gran tamaño del Universo observable, con sus 10^{80} átomos, permite un enorme número de lugares donde puedan tener lugar las variaciones estadísticas de combinaciones químicas.

Pero, pese a su interés por el enorme tamaño del Universo para hacer probable que nosotros evolucionásemos, Wallace era enemigo de la idea de un Universo poblado por muchos otros seres vivos. Creía que la uniformidad de las leyes de la física y de la química²¹³ aseguraría que

seres vivos organizados, donde quiera que puedan existir en el Universo, deben ser fundamentalmente, y en su Naturaleza esencial, también iguales. Las formas de vida externas, si existen en otros lugares, pueden variar, casi infinitamente, como

²¹² Wallace, *ibíd.*, pp. 256-257.

²¹³ Estaba particularmente sorprendido por el hecho de que la determinación de la velocidad de la luz mediante observaciones de eclipses en las lunas de Júpiter coincidía con el valor determinado en la Tierra, concluyendo que «estos descubrimientos nos dan la convicción cierta de que todo el material del Universo es esencialmente uno, tanto en lo que respecta a la acción de leyes físicas y químicas como a sus relaciones mecánicas de forma y estructura», Wallace, *ibíd.*, p. 154.

varían sobre la Tierra... Nosotros no decimos que la vida orgánica no pueda existir en condiciones completamente diferentes de las que conocemos o podemos concebir, condiciones que pueden prevalecer en otros universos contruidos de forma completamente diferente del nuestro, donde otras sustancias reemplacen a la materia y el éter de nuestro Universo y donde dominen otras leyes. Pero dentro del Universo que conocemos, no hay la más mínima razón para suponer que la vida orgánica sea posible, salvo en las mismas condiciones generales y leyes que dominan aquí²¹⁴.

Wallace ofrece un fascinante puente entre la forma pre-evolutiva de pensamiento y la perspectiva moderna aportada por el descubrimiento de que el Universo está cambiando. Su aproximación a la cosmología muestra cómo la consideración de condiciones necesarias para la evolución de la vida no está ligada a ninguna teoría concreta de formación y desarrollo de las estrellas, sino que debe utilizarse en cualquier contexto. En el caso de Wallace, era una nueva imagen del Universo desarrollada por Kelvin. Para los astrónomos modernos es la bien comprobada teoría del Universo en expansión en la que la generación de energía por las estrellas se entiende casi por completo. Ambas teorías eran dinámicas: el modelo de Kelvin permitía que cayera material desde grandes distancias en el centro del sistema estelar bajo la influencia de la atracción gravitatoria, mientras que en la teoría del Big Bang

²¹⁴ Wallace, *ibíd.*, pp. 154-155.

de Dicke el Universo se expande para aumentar de tamaño con el paso del tiempo. En ambos escenarios tamaño y tiempo estaban unidos y la inmensidad del Universo tenía consecuencias indirectas inusuales sobre lo que pudiera suceder en su interior, consecuencias de una importancia crucial para la posibilidad de que emerjan vida y mente en el curso del tiempo.

Capítulo 8

El principio antrópico

Vida es lo que los menos de nosotros hacen que los más de nosotros sientan que los menos sacan más provecho.

WILLARD QUINE²¹⁵

§. Argumentos antrópicos

Yo tengo mis propias opiniones — opiniones firmes—, pero no siempre estoy de acuerdo con ellas.

Presidente GEORGE W. BUSH

Desde que se empezó a entender que hay propiedades del Universo necesarias para la vida, ha habido un interés creciente por lo que ha llegado a conocerse como el «principio antrópico», y se ha generado un debate de amplio alcance entre astrónomos, físicos y filósofos acerca de su utilidad y trascendencia final. Una de las razones del despertar de este interés ha sido el descubrimiento de que hay muchas maneras en que los valores reales de las constantes de la Naturaleza ayudan a hacer de la vida una posibilidad en el Universo. Más aún, a veces parecen permitir su existencia sólo por

²¹⁵ W. V. Quine, entrevista para el *Harvard Magazine*, citada en R. Hersh, *What is Mathematics Really?*, Vintage, Nueva York, 1998, p. 170.

un estrechísimo margen. Podemos imaginar fácilmente mundos en los que las constantes de la Naturaleza toman valores numéricos ligeramente diferentes y no serían posibles seres vivos como nosotros. Aumentemos la constante de estructura fina más grande y no podrá haber átomos, hagamos la intensidad de la gravedad mayor y las estrellas agotarán su combustible muy rápidamente, reduzcamos la intensidad de las fuerzas nucleares y no podrá haber bioquímica, y así sucesivamente. Hay tres tipos de cambio a considerar. Los cambios minúsculos, infinitesimales, son posibles. Si cambiamos el valor de la constante de estructura fina sólo en la vigésima cifra decimal, no habrá ninguna consecuencia fatal para la vida que conocemos. Si lo cambiamos en una pequeña cantidad, digamos en la segunda cifra decimal, entonces los cambios se harán más importantes. Las propiedades de los átomos se alteran y procesos complicados como el plegamiento de las proteínas o la replicación del ADN pueden verse afectados de forma adversa. Sin embargo, para la complejidad química pueden abrirse nuevas posibilidades. Es difícil evaluar las consecuencias de estos cambios porque no son muy claras. En tercer lugar, están los cambios muy grandes. Estos hacen que los átomos y los núcleos dejen de existir y sean mucho más nítidos como barrera para el desarrollo de la complejidad basada en las fuerzas de la Naturaleza. Hay muchos cambios concebibles para los que no podría haber ninguna forma de vida imaginable.

Antes que nada, es importante ser muy claro sobre el modo en que Dicke introdujo su argumento antrópico, que entre los

comentaristas hay una considerable confusión²¹⁶. Hay una condición, como la existencia de estrellas o de ciertos elementos químicos, se identifica como una condición *necesaria* para la existencia de cualquier forma de complejidad química, cuyo ejemplo conocido más impresionante es la vida. Esto no significa que si se da esta condición la vida debe existir, que nunca desaparecerá si existe, o que el hecho de que esta condición sea válida en nuestro Universo signifique que «fue diseñada» pensando en la vida. Todas estas cuestiones son completamente independientes. Si nuestra condición antrópica «necesaria» es verdaderamente una condición necesaria para que existan observadores vivos en el Universo, entonces debemos encontrar que el Universo posee dicha característica, independientemente de lo poco probable que pueda parecer *a priori*.

Muchos cometen ahora el error de suponer que un argumento antrópico de este tipo es una nueva teoría científica del Universo que rivaliza con otras formas de explicación más convencionales de por qué el Universo posee la «necesaria» condición antrópica. De hecho, no es nada de esto. Es simplemente un principio metodológico que, si se ignora o se pasa por alto, nos llevará a extraer conclusiones incorrectas. Como hemos visto, la historia de Dirac y Dicke es un ejemplo. Dirac no se dio cuenta de que una coincidencia de Gran Número era una consecuencia necesaria de que hubiera un observador contemplando el Universo cuando ha

²¹⁶ H. Pagels, «A Cozy Cosmology», *The Sciences*, marzo/abril, 34 (1985); G. Kane, M. Perry y A. Zytlow, «The Beginning and the End of the Anthropic Principle», *New Astronomy* VII, pp. 45-53 (2002).

transcurrido un tiempo aproximadamente igual al tiempo requerido para que las estrellas fabriquen los elementos químicos necesarios para que la vida compleja evolucione espontáneamente. Como resultado Dirac extrajo la errónea conclusión de que son necesarios cambios enormes en las leyes de la física: cambiar la ley de la gravedad para permitir que G varíe con el tiempo. Dicke demostró que aunque tal coincidencia podría parecer poco probable *a priori*, era de hecho una característica necesaria de un Universo que contenga observadores como nosotros. Por consiguiente, es una característica del Universo no más (ni menos) sorprendente que nuestra propia existencia.

Hay muchos ejemplos interesantes de sesgo de observador en situaciones menos cósmicas que la considerada por Dicke. Mis favoritos se refieren a nuestras percepciones del flujo de tráfico. Un reciente informe sobre los conductores canadienses²¹⁷ mostraba que tienden a creer que el carril contiguo de la autopista avanza más rápidamente que el carril por el que circulan. Esto inspiró a los autores del estudio a proponer muchas razones psicológicas complejas para esta creencia de los conductores, pensando quizá que es más probable que un conductor haga comparaciones cuando se ve superado por coches más rápidos que cuando los supera o que ser adelantado deja en un conductor una impresión mayor que adelantar. Estas conclusiones no carecen de importancia porque una de las conclusiones del estudio era que se podría educar a los conductores para resistirse a la tentación constante de cambiar de

²¹⁷ D. A. Redelmeier y R. J. Tibshirani, *Nature* 401, 335 (1999) y *Chance* 13, pp. 8-14(2000).

carril en busca de un camino más rápido, lo que aceleraría el flujo de tráfico total y mejoraría la seguridad. Sin embargo, aunque muy bien podrían estar presentes las causas psicológicas, hay una explicación más sencilla para los resultados del informe: *¡el tráfico es más rápido en los otros carriles!* La razón es una forma de selección del observador. Habitualmente, los carriles más lentos se crean por sobrepoblación²¹⁸. Por ello, de promedio hay más vehículos en los carriles congestionados que se mueven lentamente que en los carriles más vacíos que se mueven más rápidos²¹⁹. Si uno selecciona un conductor al azar y le pregunta si cree que el carril contiguo es más rápido, es mucho más probable que escoja a un conductor en un carril congestionado porque es ahí donde hay más conductores. Por desgracia, debido al sesgo del observador el informe del conductor no nos dice nada sobre si es bueno o malo cambiar de carril. Quizá la hierba siempre sea más verde al otro lado.

Una vez que conocemos una característica del Universo necesaria para la existencia de complejidad química, suele ser posible demostrar que otras características del Universo que no parecen tener nada que ver con la vida son subproductos necesarios de la condición «necesaria».

²¹⁸ N. Bostrom, «Observational Selection Effects and Probability», tesis doctoral, ver www.anthropic-principle.com/phd/.

²¹⁹ Otro efecto es que el carril contiguo parece estar moviéndose más rápido en una carretera congestionada incluso cuando la velocidad media de los automóviles en ambos carriles es la misma. Esto se debe a que los automóviles que se mueven más rápido llegan a estar más espaciados, mientras que el tráfico en el carril más lento se hace más compacto.

Por ejemplo, el argumento de Dicke nos dice realmente que el Universo tiene que tener miles de millones de años para que haya tiempo suficiente para que los ladrillos de la vida sean manufacturados en las estrellas.



Figura 8.1. ¿Por qué parece que en el otro carril los automóviles van más rápido? ¡Porque así es de promedio²²⁰!

Pero las leyes de la gravitación nos dicen que la edad del Universo está directamente ligada a otras propiedades que manifiesta, como su densidad, su temperatura y el brillo del cielo. Puesto que el Universo debe expandirse durante miles de millones de años, debe

²²⁰ Traffic on Hollywood freeway, © Bettmann/Corbis.

llegar a tener una extensión visible de miles de millones de años luz. Puesto que su temperatura y densidad disminuyen a medida que se expande, necesariamente se hace frío y disperso. Como hemos visto, la densidad del Universo es hoy de poco más que un átomo por metro cúbico de espacio. Traducida en una medida de las distancias medias entre estrellas o galaxias, esta densidad tan baja muestra por qué no es sorprendente que otros sistemas estelares estén tan alejados y sea difícil el contacto con extraterrestres. Si existen en el Universo otras formas de vida avanzada, entonces, como nosotros, habrán evolucionado sin ser perturbadas por seres de otros mundos hasta alcanzar una fase tecnológica avanzada. Además, la muy baja temperatura de la radiación hace algo más que asegurar que el espacio sea un lugar frío: también garantiza la oscuridad del cielo nocturno. Durante siglos los científicos se han preguntado por esta sorprendente característica del Universo. Si ahí fuera en el espacio hubiera un número enorme de estrellas, entonces cabría pensar que mirar hacia arriba al cielo nocturno sería un poco como mirar un bosque denso (figura 8.2). Cada línea de visión debería terminar en una estrella. Sus superficies brillantes cubrirían cada parte del cielo haciéndolo parecido a la superficie del Sol. Lo que nos salva de este cielo brillante es la expansión del Universo. Para encontrar la condición necesaria que soporte la complejidad viviente hacen falta diez mil millones de años de expansión y enfriamiento. La densidad de materia ha caído hasta un valor tan bajo que aun si toda la materia se transformase repentinamente en energía radiante no advertiríamos ningún resplandor importante en el cielo nocturno. La

radiación es demasiado pequeña y el espacio a llenar demasiado grande para que el cielo parezca brillante otra vez. Hubo un tiempo, cuando el Universo era mucho más joven, menos de cien mil años, en que todo el cielo era brillante, tan brillante que ni estrellas ni átomos ni moléculas podían existir. No podrían haber existido observadores para ser testigos de ello.

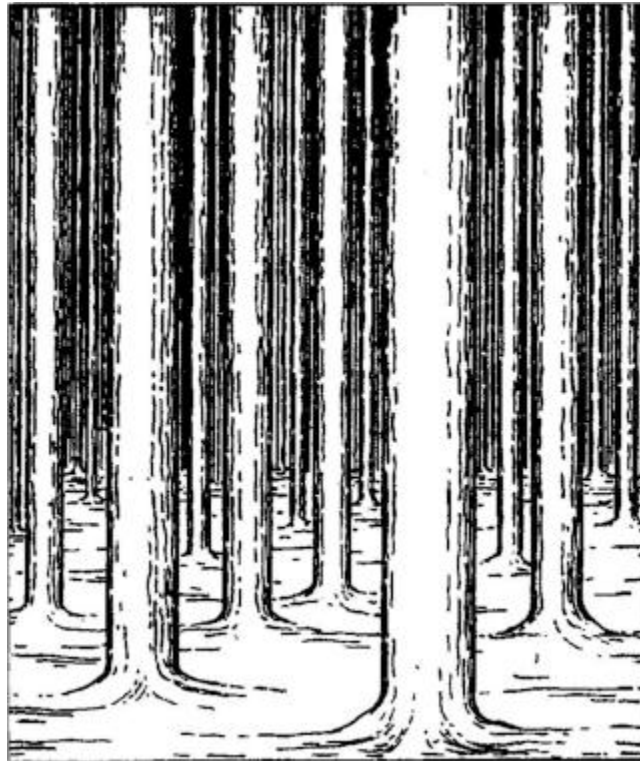


Figura 8.2. Si uno mira hacia el interior de un bosque denso, su línea de visión siempre termina en un árbol²²¹.

Estas consideraciones tienen otros resultados de una Naturaleza mucho más filosófica. El gran tamaño y la absoluta oscuridad del Universo parecen ser profundamente inhóspitos para la vida. La

²²¹ E. R. Harrison, *Darkness at Night*, Harvard University Press, Cambridge, MA, 1987, p. 87.

apariencia del cielo nocturno es responsable de muchos anhelos religiosos y estéticos surgidos de nuestra aparente pequeñez e insignificancia frente a la grandeza e inmutabilidad de las estrellas lejanas. Muchas civilizaciones rindieron culto a las estrellas o creyeron que gobernaban su futuro, mientras otras, como la nuestra, a menudo anhelan visitarlas.

George Santayana escribe en *El sentido de la belleza*²²² sobre el efecto emocional que produce la contemplación de la insignificancia de la Tierra y la inmensidad de los cielos salpicados de estrellas. En efecto,

La idea de la insignificancia de nuestra Tierra y de la inabarcable multiplicidad de mundos es tremendamente impresionante; puede ser incluso intensamente desagradable... Nuestra imaginación matemática se ve atormentada por una concepción tentativa que tiene toda la angustia de una pesadilla y probablemente, si estamos despiertos, todo su risible absurdo... el tipo de emoción producido por las estrellas con la emoción propia de ciertos momentos religiosos hace que las estrellas parezcan un objeto religioso. Llegan a ser, como la gran música, un estímulo para el culto.

Nada es objetivamente grande; las cosas son grandes sólo cuando consiguen tocar la sensibilidad del observador, encontrar los caminos a su corazón y a su cerebro. La idea de que el Universo es una multitud de esferas minúsculas

²²² G. Santayana, *The Sense of Beauty*, Dover, Nueva York, 1955, publicado por primera vez en 1896, pp. 102-103. [Hay traducción española: *El sentido de la belleza*, Tecnos, Madrid, 1999].

circulando como motas de polvo en un vacío oscuro e ilimitado, podría dejarnos fríos e indiferentes, si no aburridos y deprimidos, si no fuera porque nosotros identificamos este esquema hipotético con el esplendor visible, la intensidad conmovedora y el desconcertante número de estrellas.

... el sensual contraste del fondo oscuro —más oscuro cuanto más clara es la noche y más estrellas podemos ver— con el fuego palpitante de las propias estrellas, no podría ser superado por ningún artificio posible.

Otros han adoptado una visión más prosaica. El inglés Frank Ramsey, un «peso pesado» de las matemáticas y la filosofía (hermano de Michael Ramsey, anterior arzobispo de Canterbury), respondió de forma visceral al terror de Pascal ante «el silencio de los espacios infinitos» que nos rodean comentando que:

Donde parece que discrepo de algunos de mis amigos es en atribuir poca importancia al tamaño físico. Yo no me siento nada humilde ante la inmensidad de los cielos. Las estrellas pueden ser grandes, pero no pueden pensar ni amar; y éstas son cualidades que me impresionan mucho más que el tamaño. Yo no tengo mérito por pesar más de cien kilos. Mi imagen del mundo está dibujada en perspectiva, y no como un modelo dibujado a escala. El primer término está ocupado por seres

*humanos, y las estrellas son todas tan pequeñas como monedas de tres peniques*²²³.

Pese a todo, aunque el tamaño no lo es todo, a una escala cósmica es ciertamente algo. El vínculo entre el tiempo durante el que la expansión del Universo ha seguido su curso en apariencia (lo que normalmente llamamos la «edad» del Universo) y otras cosas que tienen que ver con la vida era algo que los cosmólogos deberían haber comprendido con más rapidez. Quizá les habría evitado seguir otra posibilidad cosmológica incorrecta durante casi veinte años. En 1948 Hermann Bondi, Thomas Gold y Fred Hoyle presentaron una teoría rival a la del Universo del Big Bang en expansión. La teoría del Big Bang²²⁴ implicaba que la expansión del Universo empezó en un momento concreto del pasado. Posteriormente, la densidad y temperatura de la materia y la radiación en el Universo decrecieron continuamente a medida que el Universo se expandía. Esta expansión puede continuar para siempre o puede un día invertirse en un estado de contracción, volviendo a pasar por condiciones de densidad y temperatura cada vez mayores hasta llegar a un Big Crunch en un tiempo finito de nuestro futuro (ver figura 8.3).

Este escenario evolutivo tiene la característica clave de que las condiciones físicas en el pasado del Universo no eran las mismas que las actuales o las futuras. Hubo épocas en que la vida no podía

²²³ E Ramsey, *The Foundations of Mathematics and Other Logical Essays*, Kegan Paul, Trench y Trubner, Londres, 1931, p. 291.

²²⁴ Este título fue inventado más tarde, de forma algo peyorativa, por Fred Hoyle en un programa de radio de 1949 para resaltar el comportamiento drástico requerido en la usual teoría del Universo en expansión, y fue publicado en 1950.

existir porque había demasiado calor para los átomos; hubo épocas previas a las estrellas y habrá un tiempo en el que todas las estrellas hayan muerto.

En este escenario hay un intervalo preferido de la historia cósmica durante el que es más probable que los observadores evolucionen por primera vez y hagan sus observaciones del Universo.

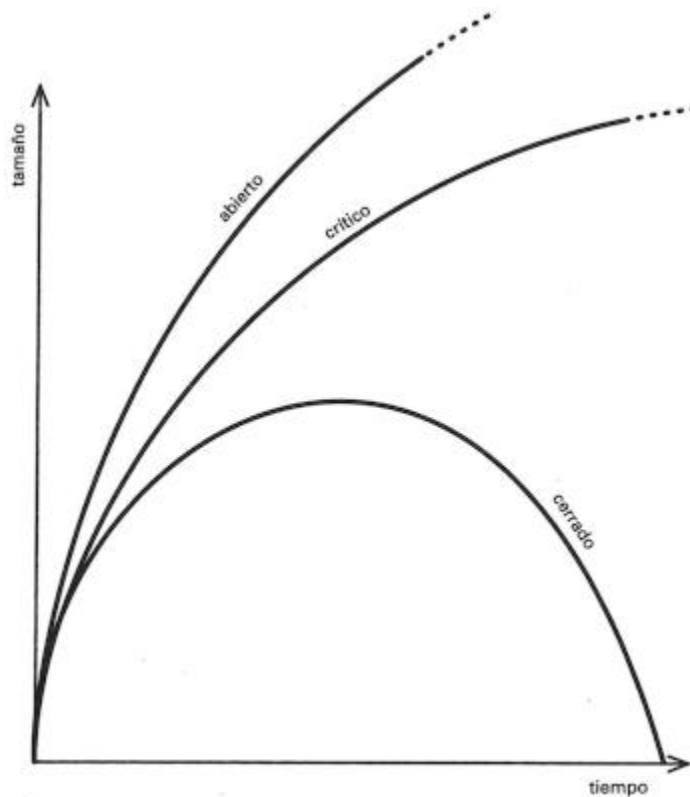


Figura 8.3. Los dos tipos de Universo en expansión: los universos «abiertos» se expanden perpetuamente; los universos «cerrados» se contraen finalmente hacia un aparente Big Crunch en un tiempo finito en el futuro. El Universo «crítico» marca la línea divisoria entre los dos y también se expande para siempre.

También implicaba que hubo un comienzo para el Universo, un tiempo pasado antes del cual éste (y quizá el propio tiempo) no

existía, pero no decía nada respecto al porqué o al dónde de este comienzo.

El escenario alternativo creado por Bondi, Gold y Hoyle estaba motivado en parte por un deseo de evitar la necesidad de un principio (o un posible final) del Universo. Su otro objetivo era crear un escenario cosmológico que pareciera de promedio siempre el mismo, de modo que no hubiera instantes privilegiados en la historia cósmica (ver figura 8.4).

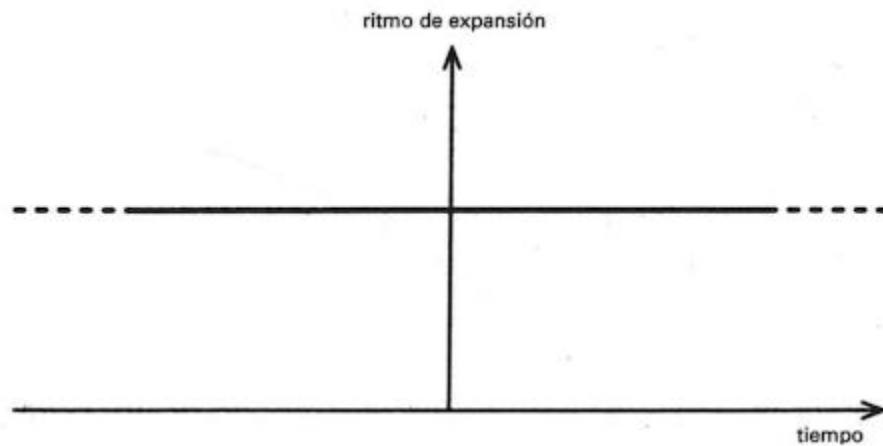


Figura 8.4. La expansión de un Universo en estado-estacionario. El ritmo de expansión es siempre el mismo. No hay comienzo ni fin, ninguna época especial en la que la vida pueda emerger por primera vez o después de la cual empiece a morir junto con las estrellas. El Universo parece igual de promedio en todos los instantes de su historia.

Al principio parece imposible de conseguir. Después de todo, el Universo se está expandiendo. Está cambiando, de modo que ¿cómo puede hacerse invariable? La visión de Hoyle era la de un río que

fluye constantemente, siempre en movimiento pero siempre igual. Para que el Universo presente la misma densidad media de materia y el mismo ritmo de expansión, independientemente de cuándo sea observado, la densidad debería ser constante. Hoyle propuso que, en lugar de nacer en un instante pasado, la materia del Universo se creaba continuamente a un ritmo que compensaba exactamente la tendencia a que la densidad sea diluida por la expansión. Este mecanismo de «creación continua» sólo tenía que ocurrir muy lentamente para conseguir una densidad constante; sólo se requería aproximadamente un átomo por metro cúbico cada diez mil millones de años y ningún experimento ni observación astronómica sería capaz de detectar un efecto tan pequeño. Esta teoría del «estado estacionario» del Universo hacía predicciones muy precisas. El Universo parecía el mismo de promedio en todo momento. No había hitos especiales en la historia cósmica: ningún «principio», ningún «final», ningún momento en que empezaran a formarse las estrellas o en el que la vida se hiciera posible por primera vez en el Universo (ver figura 8.5).

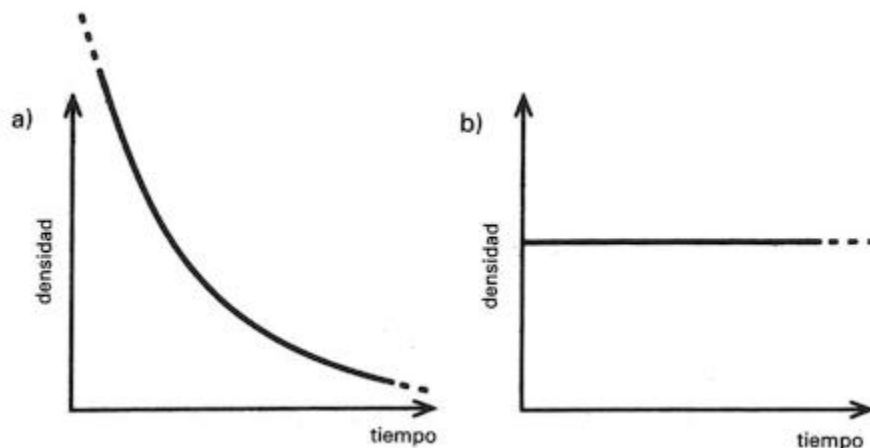


Figura 8.5. (a) Variación de la densidad media de materia en un Universo Big Bang en expansión, (b) La densidad media de materia en un Universo en estado estacionario es siempre la misma.

Finalmente esta teoría quedó descartada por una serie de observaciones iniciadas a mediados de la década de 1950 que mostraban en primer lugar que la población de galaxias que eran emisores profusos de radioondas variaba significativamente a medida que el Universo envejecía, y culminó con el descubrimiento en 1965 de la radiación térmica residual del comienzo caliente predicho por los modelos de Big Bang. Esta radiación de fondo de microondas no tenía lugar en el Universo en estado estacionario.

Durante veinte años los astrónomos trataron de encontrar pruebas que nos dijeran si el Universo estaba realmente en el estado estacionario que Bondi, Gold y Hoyle proponían. Un sencillo argumento antrópico podría haber demostrado lo poco probable que sería ese estado de cosas. Si uno mide el ritmo de expansión del Universo, da un tiempo durante el que el Universo parece haber estado expandiéndose²²⁵. En un Universo Big Bang éste es realmente el tiempo transcurrido desde que empezó la expansión: la edad del Universo. En la teoría de estado estacionario no hay principio y el ritmo de expansión es tan sólo el ritmo de expansión y nada más. Esto se ilustra en la imagen de la figura 8.4.

²²⁵ El ritmo de expansión del Universo tiene unidades de la inversa de un tiempo. Por lo tanto la inversa de la expansión da un tiempo que es aproximadamente igual a la edad del Universo en un modelo Big Bang. En el Universo en estado estacionario la inversa del ritmo de expansión tiene unidades de tiempo pero no corresponde a la verdadera edad del Universo en estado estacionario, que es infinita.

En una teoría Big Bang, el hecho de que la edad de expansión sea sólo ligeramente mayor que la edad de las estrellas es una situación natural. Las estrellas se formaron en nuestro pasado y por ello deberíamos esperar encontrar en la escena cósmica una vez formadas. Pero en un Universo en estado estacionario la «edad» es infinita y no está ligada al ritmo de expansión. Por consiguiente, en un Universo en estado estacionario es una completa coincidencia el que el inverso del ritmo de expansión dé un tiempo aproximadamente igual al tiempo requerido para que las estrellas produzcan elementos como el carbono. De la misma forma que la coincidencia entre el inverso del ritmo de expansión del Universo y el tiempo requerido para que las estrellas produzcan elementos bioquímicos descartaba la necesidad de la G variable de Dirac, también debería haber generado alguna duda sobre la necesidad de un Universo en estado estacionario.

§. Un equilibrio delicado

Un banquero es un hombre que te presta un paraguas cuando hace buen tiempo y te lo quita cuando llueve.

MARK TWAIN

Hemos visto que se necesita mucho tiempo para que las estrellas fabriquen carbono a partir de gases inertes como el hidrógeno y el helio. Pero no basta con tiempo. La reacción nuclear específica que

se necesita para hacer carbono es una reacción bastante improbable. Requiere que se junten tres núcleos de helio para fusionarse en un único núcleo de carbono. Los núcleos de helio se llaman partículas alfa, y esta reacción clave para formar carbono ha sido bautizada como el proceso «triple alfa». El físico norteamericano Ed Salpeter reconoció por primera vez su importancia en 1952. Sin embargo, pocos meses más tarde, estando de visita en Caltech, en Pasadena, Fred Hoyle se dio cuenta de que hacer carbono en las estrellas mediante este proceso era doblemente difícil. En primer lugar, era difícil hacer que se juntasen tres partículas alfa, e incluso si se conseguía, los frutos de su enlace podían ser efímeros. Pues si uno buscaba un poco más abajo en la cadena de reacciones nucleares parecía que todo el carbono podía ser rápidamente consumido al interactuar con otra partícula alfa para crear oxígeno.

Hoyle se dio cuenta de que la única forma de explicar por qué había una cantidad importante de carbono en el Universo era que la producción de carbono era mucho más rápida y eficiente de lo que la había imaginado, de modo que el consumo posterior para generar oxígeno no tenía tiempo de destruirlo. Había sólo una manera de conseguir este aumento de carbono. Las reacciones nucleares experimentan ocasionalmente situaciones especiales en las que sus ritmos aumentan espectacularmente. Se dice que son «resonantes» si la suma de las energías de las partículas reactantes iniciales está muy próxima a un nivel energético natural de un nuevo núcleo más

pesado. Cuando esto sucede, el ritmo de la reacción nuclear se hace especialmente rápido, a menudo multiplicado por un factor enorme. Hoyle vio que la presencia de una cantidad importante de carbono en el Universo sería posible solamente si el núcleo de carbono poseía un nivel energético natural a aproximadamente 7,65 MeV por encima del nivel fundamental. Sólo en ese caso podía explicarse la abundancia de carbono cósmico, razonó Hoyle. Por desgracia no se conocía ningún nivel energético del núcleo de carbono en el lugar requerido²²⁶.

Pasadena era un buen lugar para reflexionar sobre los niveles energéticos de los núcleos. Willy Fowler dirigía un equipo de destacados físicos nucleares y era una persona extraordinariamente afable y entusiasta. Hoyle no dudó en hacerle una visita. Y Fowler pronto se convenció de que todos los experimentos anteriores podían haber pasado por alto el nivel energético que Hoyle proponía. A los pocos días Fowler había atraído a otros físicos nucleares del Kellogg Radiation Lab y planearon un experimento. El resultado fue espectacular²²⁷. Había un nuevo nivel energético en el núcleo de carbono a 7,656 MeV, justo donde Hoyle había predicho que estaría. La secuencia completa de sucesos para que las estrellas produjeran carbono parecía entonces un equilibrio de tanta precisión que, como

²²⁶ De hecho, Holloway y Moore habían presentado pruebas a favor de un estado excitado de carbono cerca de 7 MeV en 1940 (*Phys. Rev.* 58, p. 847 [1940]), y aparece en las tablas de datos nucleares publicadas en *Rev. Mod. Phys.* 20, 23 por un equipo del que Fowler formaba parte, pero esto no fue confirmado por estudios posteriores de Malm y Buechner, *Phys. Rev.* 81, p. 519 (1951) y parece haber sido eliminado de las tablas posteriores. Doy las gracias a Virginia Trimble por esta información.

²²⁷ F. Hoyle, D. N. F. Dunbar, W. A. Wensel y W. Whaling, *Phys. Rev.* 92, p. 649 (1953). C. W. Cook, W. A. Fowler y Lauritsen, *Phys. Rev.* 107, p. 508 (1957).

un Universo de ciencia ficción, habría parecido artificial. En primer lugar, tres núcleos de helio (partículas alfa) tienen que interactuar en un lugar. Se las arreglan para hacerlo en un proceso de dos pasos. Primero, dos núcleos de helio se combinan para crear un núcleo de berilio



Afortunadamente, el berilio tiene una vida media peculiarmente larga²²⁸, diez mil veces más larga que el tiempo requerido para que dos núcleos de helio interactúen, y por ello dura lo suficiente para que haya una buena probabilidad de combinación con otro núcleo de helio y se produzca un núcleo de carbono:



El nivel energético a 7,656 MeV en el núcleo de carbono está *justo* por encima de las energías del berilio más helio (7,3667 MeV), de modo que cuando la energía térmica del interior de la estrella se suma a la reacción nuclear, ésta se hace resonante y se producen montones de carbono. Pero aquí no se acaba la historia. La siguiente reacción que espera para consumir todo el carbono es



²²⁸ Esto fue observado por E. Salpeter, *Astrophysical Journal* 115, p. 326 (1952), y G. K. Öpik, *Proc. Roy. Irish Acad.* A54, p. 49 (1951).

¿Qué pasa si esta reacción también resultara ser resonante? Entonces todo el carbono rápidamente producido desaparecería y el nivel de resonancia del carbono no serviría de nada. Es llamativo que a esta última reacción le falte poco para ser resonante. El núcleo de oxígeno tiene un nivel energético de 7,1187 MeV, que está justo por debajo de la energía total del carbono más helio, 7,1616 MeV. De modo que cuando se añade la energía térmica extra de la estrella, esta reacción nunca puede ser resonante y el carbono sobrevive (ver figura 8.7). Hoyle reconoció que era su secuencia, en un equilibrio tan preciso, de coincidencias aparentes, lo que hacía de la vida basada en el carbono una posibilidad en el Universo²²⁹.

La posición de los niveles energéticos nucleares en el carbono y el oxígeno es el resultado de una interacción muy complicada entre las fuerzas nucleares y electromagnéticas que no podía calcularse fácilmente cuando se descubrió el nivel resonante del carbono. Hoy es posible hacer estimaciones muy buenas de las contribuciones de las fuerzas electromagnéticas y nucleares a los niveles implicados. Se puede ver que sus posiciones son una consecuencia de que la constante de estructura fina y la constante de la fuerza nuclear fuerte tengan los valores que tienen con alta precisión. Si la constante de estructura fina, que gobierna la intensidad de las fuerzas electromagnéticas, cambiara en más de un 4 por 100 o la fuerza fuerte cambiara en más de un 0,4 por 100, entonces la

²²⁹ F. Hoyle, *Astronomy and Cosmology: A Modern Course*, W. H. Freeman, San Francisco, 1975, p. 402.

producción de carbono u oxígeno se reduciría en factores de entre 30 y 1000. Cálculos más detallados del destino de las estrellas cuando estas constantes de la Naturaleza cambian ligeramente han sido realizados recientemente por Heinz Oberhummer, Attila Csótó y Helmut Schlattl²³⁰. Sus resultados pueden verse en la figura 8.6.

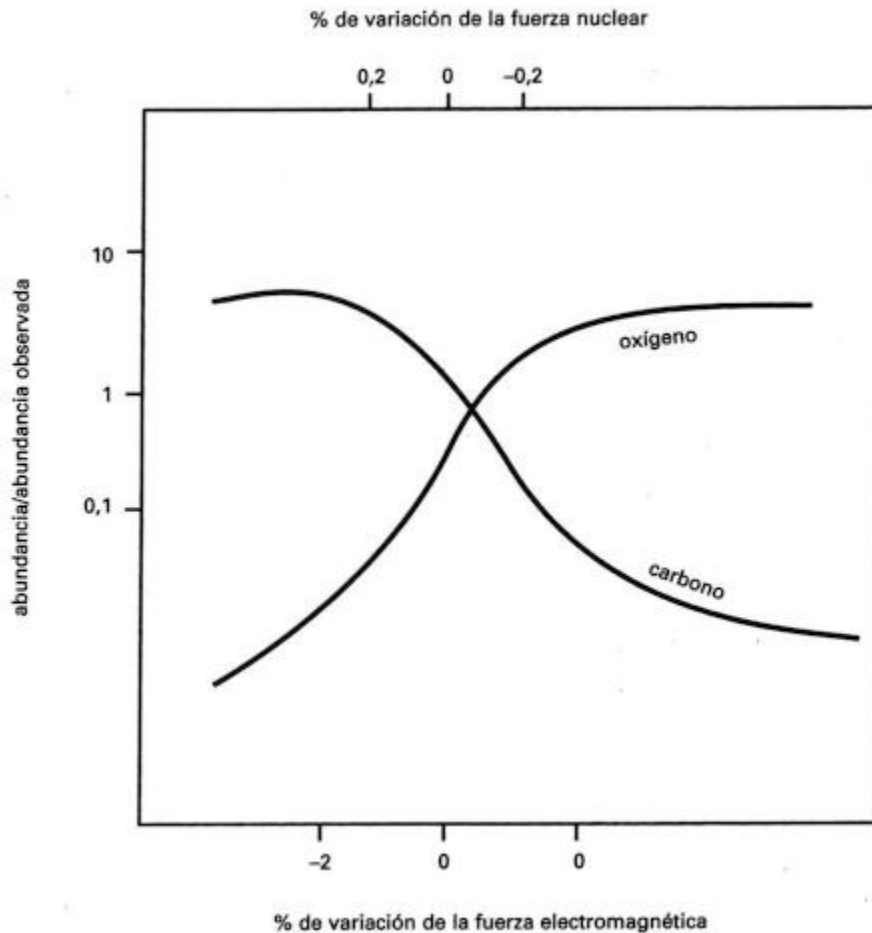


Figura 8.6. Producción de carbono y oxígeno por las estrellas cuando las constantes de la Naturaleza que gobiernan las intensidades de las fuerzas electromagnética y nuclear cambian en las cantidades indicadas.

²³⁰ H. Oberhummer, A. Csótó, y H. Schlattl, *Science* 289, p. 88 (2000).

Vemos que los niveles de carbono y oxígeno varían sistemáticamente cuando cambian las constantes de la Naturaleza que gobiernan la posición de los niveles resonantes. Si son alteradas respecto a sus valores reales terminamos con grandes cantidades de carbono o grandes cantidades de oxígeno, pero nunca de ambos. Un cambio de más de un 0,4 por 100 en las constantes que gobiernan la intensidad de la fuerza nuclear fuerte o de más de un 4 por 100 en la constante de estructura fina destruiría casi todo el carbono o casi todo el oxígeno de todas las estrellas.

Hoyle había quedado muy impresionado por la coincidencia del nivel resonante del carbono y sus implicaciones para las constantes de la física. Al final de un trabajo sobre el origen astrofísico de los elementos, escribió²³¹

Pero creo que uno debe tener una mínima curiosidad por los extraños números [constantes] adimensionales que aparecen en la física, y de los que, en último análisis, deben depender las posiciones precisas de los niveles en núcleos tales como el de C^{12} u O^{16} . ¿Son estos números inmutables, como los átomos del físico del siglo XIX? ¿Podría haber una física consistente con diferentes valores de los números.

Hoyle ve dos alternativas: o bien debemos tratar de demostrar que todos los valores reales de las constantes de la Naturaleza «son completamente necesarios para la consistencia lógica de la física», o bien adoptamos el punto de vista de que «algunos, si no todos, los

²³¹ F. Hoyle, *Galaxies, Nuclei and Quasars*, Heinemann, Londres, 1965, p. 160.

números en cuestión son fluctuaciones; en otros lugares del Universo sus valores serían diferentes».

Al principio, Hoyle favorecía la segunda idea de «fluctuación»: que las constantes de la Naturaleza podrían estar variando, posiblemente de forma aleatoria, a lo largo del espacio de modo que sólo en algunos lugares se daría el equilibrio entre la constante de estructura fina y la constante de fuerza fuerte, equilibrio «preciso» para permitir una abundancia de carbono y oxígeno. Así, si se adopta esta imagen²³²,

La curiosa colocación de los niveles en el C^{12} y el O^{16} ya no necesita tener la apariencia de accidentes sorprendentes. Podría ser el caso simplemente de que puesto que criaturas como nosotros dependen de un equilibrio entre carbono y oxígeno, sólo podemos existir en las regiones del Universo donde estos niveles resultan estar correctamente colocados. En otros lugares el nivel de O^{16} podría ser un poco más alto, de modo que la suma de partículas-a para dar C^{12} fuera altamente resonante. En un lugar semejante... no podrían existir criaturas como nosotros.

En los años siguientes Hoyle adoptó poco a poco una visión más determinista de las coincidencias del nivel resonante, viéndolas como prueba de alguna forma de pre-planificación del Universo para hacer posible la vida²³³:

²³² F. Hoyle, *ibid.*, pp. 159-160.

²³³ F. Hoyle, *Religion and the Scientists*, SCM, Londres, 1959.

No creo que ningún científico que examinara la prueba dejara de extraer la conclusión de que las leyes de la física nuclear han sido deliberadamente diseñadas con respecto a las consecuencias que producen en el interior de las estrellas. Si es así, entonces mis ocurrencias aparentemente aleatorias han llegado a ser parte de un esquema profundamente establecido. Si no lo es, entonces volvemos a una monstruosa secuencia de accidentes.

La predicción acertada de Hoyle desencadenó un resurgimiento del interés por los viejos argumentos del diseño, tan queridos por los teólogos naturales de los siglos XVIII y XIX, pero con un matiz nuevo. Desde tiempos antiguos, el hecho de que los seres vivos parecieran estar hechos a medida para su función era un fuerte apoyo en favor de la existencia de Dios (o «los dioses»). Los animales parecían estar perfectamente camuflados dentro de sus entornos; las partes de nuestros cuerpos estaban específicamente planeadas para proporcionarnos (a la mayoría de nosotros) facilidad de movimiento, buena visión, buen oído y todo lo demás²³⁴; los movimientos de los planetas estaban dispuestos para favorecer un clima terrestre propicio para la continuidad de la vida. Existían muchas coincidencias aparentes entre cosas y convencieron a muchos teólogos, filósofos y científicos anteriores de que ninguna de ellas era un accidente. El Universo estaba diseñado con un fin a la

²³⁴ Los aspectos mal diseñados fueron convenientemente pasados por alto. Para una interesante discusión ver George Williams, *Plan and Purpose in Nature*, Weinfeld & Nicolson, Londres, 1996.

vista. Este fin implicaba la existencia de vida —quizá incluso la de nosotros mismos—, y la claridad de la evidencia de tal diseño significaba que tenía que haber un Diseñador.

Tal como se plantea, este antiguo argumento era difícil de refutar con hechos científicos. Y siempre era convincente para aquellos que no eran científicos. Después de todo, en todo el mundo natural *hay* adaptaciones extraordinarias entre seres vivos y sus entornos. Es mucho más fácil de derribar por medio de argumentos lógicos o filosóficos. Pero los científicos nunca quedan impresionados por tales argumentos a menos que ellos puedan ofrecer una explicación mejor. Y eso sucedía con el argumento del diseño. A pesar de su ciega actitud respecto a muchas de las realidades del mundo, sólo se descartó como explicación seria de la existencia de complejidad en la Naturaleza cuando hubo otra explicación mejor²³⁵. Ésta llegó por medio de la evolución por selección natural, que demostraba que los seres vivos podían llegar a adaptarse bien a sus entornos en el curso del tiempo en un abanico muy amplio de circunstancias, siempre que el entorno no cambiara demasiado rápido. La complejidad podía desarrollarse a partir de la simplicidad sin intervención divina directa.

Es importante ver en qué se centraba este tipo de argumento del diseño. Es un argumento sobre las interrelaciones entre diferentes *productos* de las leyes de la Naturaleza. Están sólo parcialmente

²³⁵ Charles Darwin estaba muy influido por la colección de argumentos de diseño biológicos utilizados por autores como William Paley, porque decía que servían para alinear toda la evidencia que pedía una explicación alternativa; ver J. D. Barrow y F. J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, Oxford, 1986, para un vasta discusión de estos desarrollos.

determinados por la forma de las leyes. Su forma viene también determinada por las constantes de la Naturaleza, las condiciones de partida y todo tipo de accidentes estadísticos diferentes²³⁶.

A finales del siglo XVII Isaac Newton descubrió las leyes del movimiento, la gravitación y la óptica que nos permitieron entender con notable detalle el funcionamiento del mundo inanimado que nos rodea y los movimientos de los cuerpos celestes. El éxito de Newton fue captado por teólogos naturales y apologetas religiosos que vieron el comienzo de otro estilo de argumento del diseño: no se basaba en los productos de las leyes de la Naturaleza sino en la forma de las propias leyes. Con el apoyo de Newton levantaron un argumento del diseño fundamentado en la evidente inteligencia, elegancia matemática y efectividad de las leyes de Newton de la Naturaleza. Una forma típica del razonamiento consistiría en demostrar que la famosa ley de la inversa del cuadrado de la gravitación era óptima para la existencia de un sistema solar. Si hubiera sido una inversa del cubo o cualquier otra potencia inversa de la distancia distinta de dos, entonces no podrían existir órbitas planetarias periódicas estables. Todos los planetas seguirían una trayectoria espiral hacia el Sol o escaparían al infinito. Este tipo de argumento es muy diferente de la forma teleológica basada en productos fortuitos y adaptaciones. Identifica como la base más profunda para el «orden» del Universo el hecho de que pueda ser tan amplia y exactamente

²³⁶ Todas estas diferentes influencias están analizadas sistemáticamente en mi anterior libro *Theories of Everything*, Oxford University Press, Oxford, 1990 y Vintage, Nueva York, 1992.

descrito por leyes matemáticas simples. Entonces presume que el orden necesita un «ordenador».

El contraste entre estas dos formas del argumento del diseño —a partir de leyes y a partir de productos— se manifiesta claramente en los efectos del descubrimiento de la evolución de los organismos por selección natural. Esto acababa rápidamente con el argumento a partir de productos como una explicación útil de algo²³⁷. Pero el argumento del diseño basado en leyes no se veía afectado en nada. La selección natural no actuaba sobre leyes de movimiento o fuerzas de la Naturaleza ni, como a Maxwell le gustaba resaltar, la selección podía alterar las propiedades de átomos y moléculas.

Visto en retrospectiva, está claro que es posible crear una forma adicional y distinta de argumento del diseño que apela a los valores concretos tomados por las constantes fundamentales de la Naturaleza. Es este conjunto de números el que distingue a nuestro Universo de otros, y fija los niveles resonantes en los núcleos de carbono y oxígeno. Sería posible que las leyes de la Naturaleza que conocemos tomen la misma forma aun cuando las constantes de la Naturaleza cambien sus valores. Los productos serían entonces muy diferentes.

El hecho de que podamos cambiar los valores de las constantes de la Naturaleza en tantas de nuestras leyes de la Naturaleza puede ser

²³⁷ Es importante reconocer que esta versión del argumento del diseño desempeñó un papel importante para alinear innumerables ejemplos de diseño aparente en el mundo natural. Fue esto lo que motivó a Wallace y Darwin para buscar otra explicación. Sin el paradigma de la evidencia de diseño aparente no hubiera llamado la atención en tanto que problema necesitado de un mecanismo explicatorio; ver J. D. Barrow y F. J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, Oxford, 1986, cap. 2.

un reflejo de nuestra ignorancia. Muchos físicos creen, como Eddington, que en última instancia se demostrará que los valores de las constantes de la Naturaleza son inevitables y seremos capaces de calcularlos en términos de números puros. Sin embargo, se ha hecho cada vez más evidente, como veremos en capítulos posteriores, que no todas las constantes estarán determinadas de esta manera. Además, la Naturaleza de la determinación para las demás puede tener un componente estadístico importante. Lo que puede predecirse no es *el* valor, sino una distribución de probabilidad de que las constantes tomen cualquier valor. Habría sin duda un valor más probable pero quizá no el que vemos, aunque sólo sea porque pueda caracterizar un Universo en el que no pueden existir observadores.

§. Los principios de Brandon Carter

Yo no me siento como un extraño en este Universo. Cuanto más examino el Universo y estudio los detalles de su arquitectura, más pruebas encuentro de que el Universo en cierto sentido debe haber sabido que íbamos a venir.

FREEMAN DYSON²³⁸

²³⁸ F. Dyson, *Disturbing the Universe*, Harper & Rowe, Nueva York, 1919 [Hay traducción española: *Trastornando el Universo*, Fondo de Cultura Económica, México, 1983].

La importancia general de la aproximación de Dicke a la comprensión de los Grandes Números de la cosmología fue captada en primer lugar por Brandon Carter, entonces un astrofísico de Cambridge pero que ahora trabaja en Meudon, en París. Carter había aprendido las coincidencias de los Grandes Números leyendo el libro de texto de cosmología de Bondi²³⁹, pero no había sucumbido al hechizo de la teoría del estado estacionario, que era la pieza central de la presentación de Bondi. A Bondi le gustaba suponer que puesto que las leyes de la Naturaleza deben ser siempre las mismas, todos los demás aspectos del Universo deberían mostrar la misma uniformidad en el espacio y el tiempo²⁴⁰. La teoría del estado estacionario estaba basada precisamente en esta premisa: que la estructura del Universo es siempre la misma en promedio. Bondi confesaba no haber sido capaz de seguir los cálculos de Eddington en sus intentos de explicar los Grandes Números por medio de su teoría fundamental. Por el contrario, él se muestra más franco a propósito del esquema de Dirac para hacer de la constante de gravitación una variable en el tiempo, viéndola como una negación más del principio del estado estacionario:

Dirac... se opone a los argumentos básicos de la teoría del estado estacionario, puesto que ésta supone que no sólo el Universo cambia, sino que con él lo hacen las constantes de la

²³⁹ H. Bondi, *Cosmology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1952, capítulo 13, está dedicado a los Grandes Números y las constantes variables. [Hay traducción española: *Cosmología*, Labor, Barcelona, 1977].

²⁴⁰ Esto no se sigue. Sabemos que los resultados de las leyes de la Naturaleza no tienen que poseer las mismas simetrías que las propias leyes. Los resultados son mucho más complicados, y mucho menos simétricos que las leyes.

*física atómica. En cierto modo casi puede decirse que refuerza los argumentos del estado estacionario al mostrar cuán ilimitadas son las variaciones que cabe imaginar que aparecen en un Universo cambiante*²⁴¹.

Como resultado de considerar la explicación de Dicke acerca de la inevitabilidad de nuestra observación de algunas de las coincidencias de Grandes Números, Carter vio que era importante resaltar las limitaciones de las grandes hipótesis filosóficas sobre la uniformidad del Universo. Desde que Copérnico demostró que la Tierra no debería estar situada en el centro del mundo astronómico conocido, los astrónomos habían utilizado el término «principio copernicano» para subrayar la hipótesis de que no debemos suponer nada especial en nuestra posición en el Universo. Einstein había supuesto esto implícitamente cuando buscó por primera vez descripciones matemáticas del Universo ensayando soluciones de sus ecuaciones que garantizaran que cualquier lugar del Universo era igual: la misma densidad, el mismo ritmo de expansión y la misma temperatura. Los hombres del estado estacionario fueron un paso más lejos buscando universos que fueran iguales *en todo instante* de la historia cósmica. Por supuesto, el Universo real no puede ser *exactamente* igual en todas partes aunque, cuando se promedia sobre regiones del espacio suficientemente grandes, parece que es así con una precisión de aproximadamente una parte en cien mil.

²⁴¹ Bondi, *ibíd.*, p. 160.

Carter rechazó el uso indiscriminado del principio copernicano en situaciones más específicas porque claramente existen restricciones sobre dónde y cuándo podrían estar presentes los observadores en el Universo:

Copérnico nos enseñó la utilísima lección de que no debemos suponer gratuitamente que ocupamos una posición central privilegiada en el Universo. Por desgracia ha habido una fuerte tendencia (no siempre subconsciente) a transformarla en un dogma cuestionable según el cual nuestra situación no puede ser privilegiada en ningún sentido²⁴².

El énfasis de Carter en el papel del principio copernicano se vio ampliado por el hecho de que su presentación tomó la forma de una conferencia en una reunión internacional de astronomía celebrada en Cracovia para conmemorar el quinientos aniversario del nacimiento de Copérnico.

El argumento de Dicke demostraba que había una buena razón para esperar que la vida entrase en escena tras varios miles de millones de años de expansión a partir de un Big Bang. Esto demostraba que una de las coincidencias de Grandes Números era una observación inevitable para tales observadores. Era una aplicación de lo que Carter llamó *principio antrópico débil*,

²⁴² B. Carter, «Large Number Coincidences and the Anthropic Principle in Cosmology», en M. S. Longair (ed.), *Confrontation of Cosmological Theories with Observational Data*, Reidel, Dordrecht, 1974, pp. 291-298.

*que lo que esperamos observar debe estar restringido por la condición necesaria para nuestra presencia como observadores*²⁴³.

Más tarde, Carter lamentó haber utilizado el término «principio antrópico». El adjetivo «antrópico» ha sido fuente de mucha confusión porque implica que algo en este argumento se centra en el *Homo sapiens*. Evidentemente no es así. Se aplica a todos los observadores con independencia de su forma y bioquímica. Pero si éstos no estuvieran bioquímicamente contruidos a partir de los elementos que se fabrican en las estrellas, entonces la característica específica del Universo inevitable para ellos podría diferir de la que es inevitable para nosotros. Sin embargo, el argumento no cambia realmente si los seres están basados en la química o la física del silicio. Todos los elementos más pesados que los gases químicamente inertes de hidrógeno, deuterio y helio se forman, como el carbono, en las estrellas, y se requieren miles de millones de años para ser creados y distribuidos. Más tarde, Carter prefirió el término «principio de autoselección» para resaltar el modo en que las condiciones necesarias para la existencia de observadores seleccionan, de entre todos los universos posibles, un subconjunto que permite que existan observadores. Si uno no es consciente de que ser un observador en el Universo ya limita el tipo de Universo que cabe observar, entonces será proclive a introducir grandes principios innecesarios o cambios innecesarios en las leyes de la

²⁴³ Carter, *ibíd.*, p. 292.

física para explicar aspectos inusuales del Universo. Los ejemplos arquetípicos son la discusión de Gerald Whitrow sobre la edad y densidad del Universo²⁴⁴ y la explicación de Robert Dicke de los Grandes Números.

La consideración de Carter de la influencia autoselectiva de nuestra existencia en el tipo de observaciones astronómicas que hacemos se inspiró en la lectura sobre las coincidencias de Grandes Números en el libro de Bondi. Sin conocer los argumentos de Dicke de 1957 y 1961, también advirtió la importancia de considerar la inevitabilidad de nuestra observación del Universo en un momento cercano a la vida media típica de una estrella típica que consume hidrógeno. Le sorprendía la innecesaria introducción por parte de Dirac de la hipótesis de constantes que variaban para explicar estas coincidencias²⁴⁵:

Fue completamente erróneo por su parte haber utilizado esta coincidencia como un motivo para separarse de forma radical de la teoría estándar.

En la época en que yo empecé a advertir el error de Dirac, supuse simplemente que se debía a una visión emocionalmente neutra, fácilmente explicable por el estado rudimentario de la comprensión general de la evolución estelar en la era pionera de la década de 1930, y que por consiguiente era probable que hubiera sido ya reconocida y corregida por su autor. Mi

²⁴⁴ Whitrow utilizó este argumento inicialmente para entender por qué encontramos que el espacio tiene tres dimensiones, como veremos en un capítulo posterior.

²⁴⁵ Carter fue estudiante y luego profesor en el Departamento de Matemática Aplicada y Física Teórica de Cambridge en la época en que Dirac era profesor Lucasiano.

motivación para molestarme en formular algo tan obvio (pensaba yo) como el principio antrópico en la forma de un precepto explícito, venía dada en parte por mi posterior comprensión de que la fuente de errores (patentes) tales como el de Dirac no se limitaba a la falta de información, sino que también estaba enraizada en un sesgo emocional más profundamente asentado, semejante al que fue responsable de la primera resistencia a las ideas darwinistas en la época de los debates «monos o ángeles» del siglo pasado. Fui consciente de esto en el propio caso de Dirac al conocer su reacción cuando centró su atención en la línea de razonamiento «antrópico» [sobre las coincidencias de Grandes Números]... cuando fue señalada por primera vez por Dicke. Esta reacción equivalía a negar la línea de razonamiento que lleva a la conclusión (en mi opinión inatacable) de Dicke según la cual «a la cosmología de Dirac le falta apoyo estadístico». La razón ofrecida por Dirac es bastante sorprendente en el contexto de un debate científico moderno: después de hacer la afirmación infundada (e inverosímil a primera vista) de que en su propia teoría «la vida no necesita terminar nunca», su argumento queda resumido en el sorprendente enunciado de que, al escoger entre su propia teoría y la habitual... «yo prefiero la que admite la posibilidad de vida sin fin». Lo que yo encontraba aquí sorprendente era por supuesto la sugerencia de que una preferencia como esa pudiera ser relevante en semejante argumento... El error de Dirac supone para nosotros una advertencia saludable que

*aporta la motivación para formular con cuidado el principio antrópico y otros principios relacionados*²⁴⁶.

El principio antrópico débil se aplica de forma natural para ayudarnos a entender por qué cantidades variables toman la gama de valores que encontramos en nuestra vecindad en el espacio y el tiempo. Pero existen «coincidencias» entre combinaciones de cantidades que se cree que son verdaderas constantes de la Naturaleza. No seremos capaces de explicar estas coincidencias por el hecho de que vivimos cuando el Universo tiene varios miles de millones de años, en condiciones de densidad y temperatura relativamente bajas. La respuesta que Carter apuntó era más especulativa. Si las constantes de la Naturaleza no pueden cambiar y están programadas en la estructura global del Universo de una única manera, entonces quizá haya alguna razón todavía desconocida por la que tiene que haber observadores en el Universo en alguna etapa de su historia. Carter lo bautizó como *principio antrópico fuerte*, que afirma

que el Universo (y con él los parámetros fundamentales de los que depende) debe ser tal que admita la creación de observadores dentro de él en alguna etapa.

La introducción de una conjetura semejante necesita una evidencia que la apoye. En este caso se trata de que existen varias

²⁴⁶ B. Carter, «The Anthropic Principle: Self-selection as an Adjunct to Natural Selection», en S. K. Biswas et al (eds.), *Cosmic Perspectives*, Cambridge University Press, Cambridge, 1988, pp. 187-188.

coincidencias aparentemente inusuales entre constantes de la Naturaleza no relacionadas en un nivel superficial que parecen ser cruciales para nuestra propia existencia o la de cualquier otra forma de vida concebible. Los inusuales niveles resonantes del carbono y el oxígeno de Hoyle son ejemplos arquetípicos. Hay muchos otros. Cambios pequeños en las intensidades de las diferentes fuerzas de la Naturaleza y en las masas de las diferentes partículas elementales destruyen muchos de los equilibrios delicados que hacen posible la vida. Por el contrario, si se encuentra que las condiciones para que la vida se desarrolle y persista dependen sólo muy débilmente de todas las constantes de la Naturaleza, entonces no habría motivo para pensar en un principio antrópico de este tipo más fuerte. En los capítulos siguientes veremos cómo esta idea generó serias consideraciones a propósito de la existencia de otros «universos» que poseen propiedades diferentes y diferentes constantes de la Naturaleza, de modo que podríamos concluir que habitamos uno de los posibles universos en los que las constantes y las condiciones cósmicas han caído en un modelo que permite que la vida exista y persista, pues de otra manera nosotros no lo podríamos encontrar.

§. Un objeto muy reñido

¿Osaré

Perturbar el Universo?

*T. S. ELIOT*²⁴⁷

Hemos estado diciendo que los valores de las constantes de la Naturaleza están «escogidos» de forma bastante fortuita cuando se trata de permitir que la vida evolucione y persista. Echemos una mirada a unos pocos ejemplos más. La estructura de los átomos y las moléculas está controlada casi por completo por dos números que ya vimos en el capítulo 5: la razón entre las masas del electrón y el protón, β , que es aproximadamente igual a $1/1836$, y la constante de estructura fina α , que es aproximadamente igual a $1/137$. Supongamos que permitimos que estas dos constantes cambien su valor de forma independiente y supongamos también (para hacerlo más sencillo) que ninguna otra constante de la Naturaleza cambie. ¿Qué le sucede al mundo si las leyes de la Naturaleza siguen siendo las mismas?

Si deducimos las consecuencias pronto encontramos que no hay mucho espacio para maniobrar. Incrementemos β demasiado y no puede haber estructuras moleculares ordenadas porque es el pequeño valor de β el que asegura que los electrones ocupen posiciones bien definidas alrededor de un núcleo atómico y no se agiten demasiado. Si lo hicieran, entonces fallarían procesos muy bien ajustados como la replicación del ADN. El número β también desempeña un papel en los procesos de generación de energía que alimentan las estrellas. Aquí se une con α para hacer los centros de

²⁴⁷ S. Eliot, «The Love Song of J. Alfred Prufrock», *Selected Poems*, Faber and Faber, Londres, 1994. [Hay traducción española: *Poesías reunidas*, Alianza, Madrid, 2004].

las estrellas suficientemente calientes como para iniciar reacciones nucleares. Si β fuera mayor que aproximadamente $0,005 \alpha^2$ entonces no habría estrellas. Si las modernas teorías gauge de gran unificación están en la vía correcta, entonces α debe estar en el estrecho intervalo entre aproximadamente $1/180$ y $1/85$; de lo contrario los protones se desintegrarían mucho antes de que las estrellas pudieran formarse. La condición de Carter se muestra también con rayas (---) en la figura. Su línea distingue mundos en donde las estrellas tienen regiones externas convectivas que parecen ser necesarias para formar algunos sistemas de planetas. Las regiones de α y β que están permitidas y prohibidas se muestran en la figura 8.7.

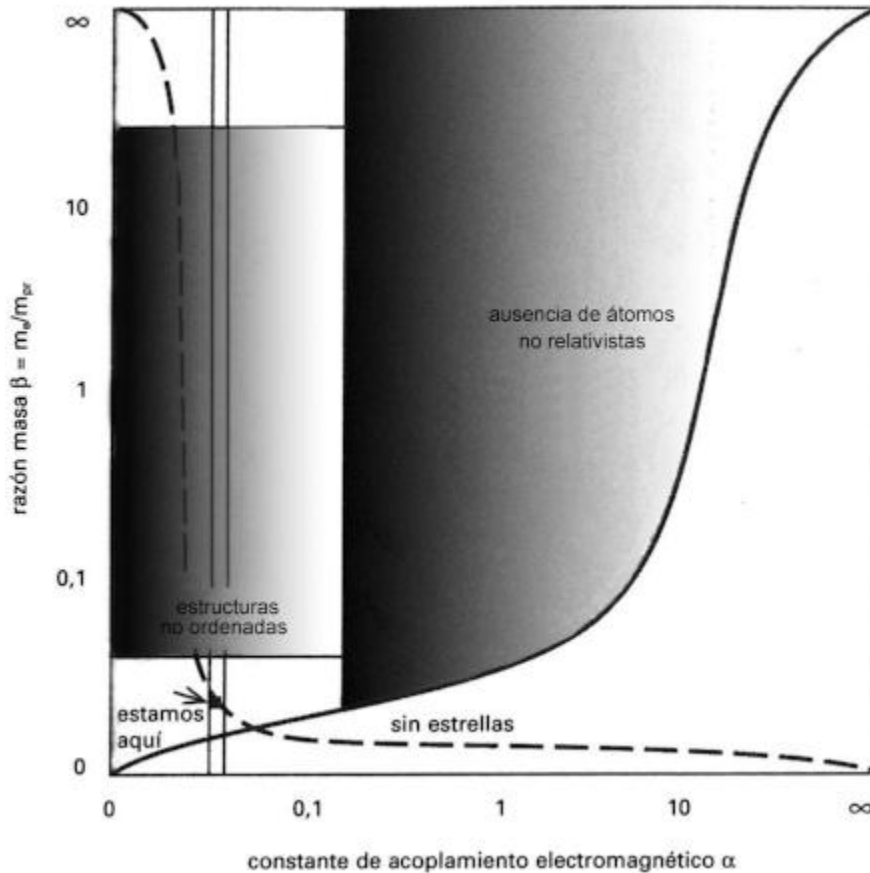


Figura 8.7. Zona habitable donde la complejidad que sustenta la vida puede existir si se permite que los valores de β y α varíen independientemente. En la zona inferior derecha no puede haber estrellas. En la zona superior derecha no hay átomos no relativistas. En la zona superior izquierda los electrones están insuficientemente localizados para que existan moléculas autoreproductoras altamente ordenadas. Las estrechas «vías de tranvía» distinguen la región que puede ser necesaria para que la materia permanezca estable el tiempo suficiente para que evolucionen las estrellas y la vida²⁴⁸.

²⁴⁸ Adaptado de M. Tegmark, *Annals of Physics* 270, pp. 1-51 (1998), utilizando ligaduras procedentes de Barrow y Tipler, *op. cit.*

Si en lugar de α versus β , jugamos a cambiar la intensidad de la fuerza nuclear fuerte α_F , junto con la de α , entonces, a menos que $\alpha_F > 0,3 \alpha^{1/2}$, los elementos biológicamente vitales como el carbono no existirían y no habría químicos orgánicos. No podrían mantenerse unidos. Si aumentamos α_F en sólo un 4 por 100, aparece un desastre potencial porque ahora puede existir²⁴⁹ un nuevo núcleo, el helio-2, hecho de dos protones y ningún neutrón, que permite reacciones nucleares directas y muy rápidas de



Las estrellas agotarían rápidamente su combustible y se hundirían en estados degenerados o en agujeros negros. Por el contrario, si α_F decreciera en aproximadamente un 10 por 100, el núcleo de deuterio dejaría de estar ligado y se bloquearían los caminos astrofísicos nucleares hacia los elementos bioquímicos. Una vez más, encontramos una región bastante pequeña en el espacio de parámetros en la que pueden existir los ladrillos básicos de la complejidad química. La ventana habitable se muestra en la figura 8.8.

²⁴⁹ En la práctica sólo deja de estar acotado en unos 70 KeV. La importancia de esto fue señalada por primera vez por Freeman Dyson.

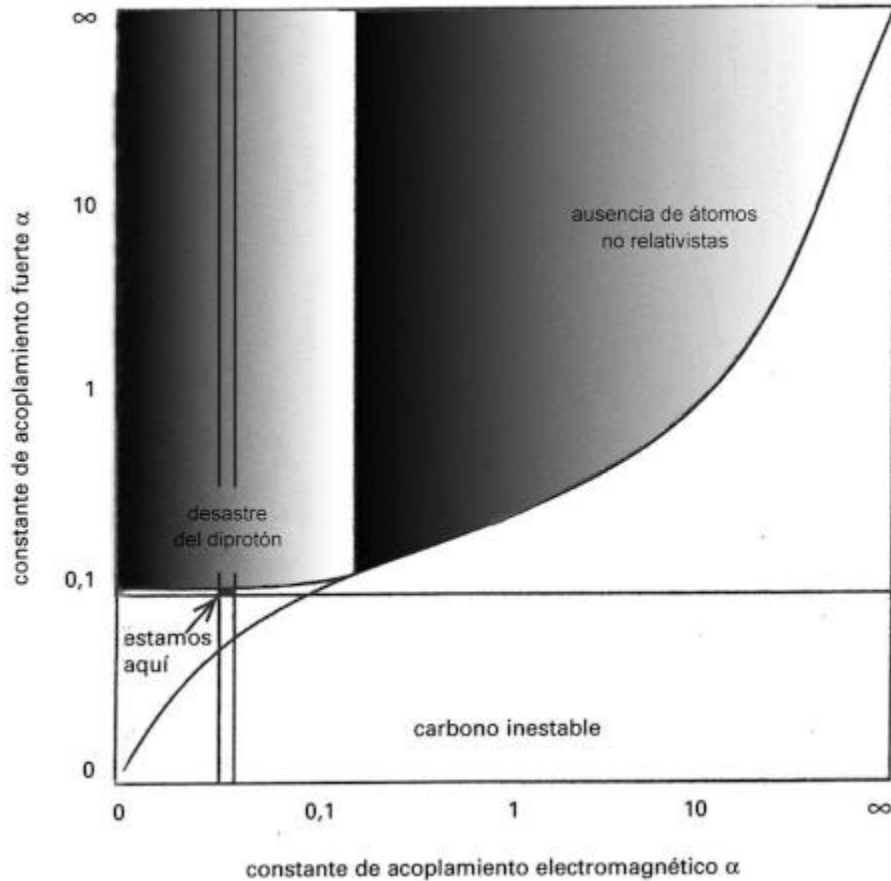


Figura 8.8. La zona habitable en donde puede existir la complejidad que sustenta la vida si los valores de α_F y α cambian de forma independiente. La zona inferior derecha no permite que existan elementos bioquímicos esenciales como carbono, oxígeno y nitrógeno. La zona superior izquierda permite que exista un nuevo núcleo, el helio-2, llamado diprotón. Éste proporciona una ruta para un consumo muy rápido de hidrógeno en las estrellas que probablemente les llevaría a agotar su combustible mucho antes de que se dieran condiciones propicias para la formación de planetas o la evolución biológica de la complejidad²⁵⁰.

²⁵⁰ Adaptado de M. Tegmark, *Annals of Physics* 270, pp. 1-51 (1998), utilizando ligaduras procedentes de Barrow y Tipler, *op. cit.*

Cuanto más variaciones simultáneas de otras constantes se incluyan en estas consideraciones, más restringida es la región donde la vida, tal como la conocemos, puede existir. Es muy probable que si pueden hacerse variaciones, no todas sean independientes. Más bien, hacer un pequeño cambio en una constante podría alterar también una o más de las otras. Esto tendería a hacer que las restricciones sobre la mayoría de las variaciones sean aún más rígidamente limitadas.

Estos ejemplos deberían considerarse como simples indicios de que los valores de las constantes de la Naturaleza son bastante más bio-amigables. Si se cambian siquiera en una pequeña cantidad, el mundo se vacía de vida y se vuelve estéril en lugar de ser sede de una interesante complejidad. Fue este estado de cosas inusual lo que impulsó inicialmente a Brandon Carter a ver qué tipo de explicaciones «antrópicas fuertes» podrían ofrecerse para los valores de las constantes de la Naturaleza.

§. Algunos otros principios antrópicos

*Yo no quiero alcanzar la
inmortalidad a través de mi obra.
Quiero alcanzar la inmortalidad
por no morir. No quiero vivir en los
corazones de mis paisanos.
Preferiría vivir en mi apartamento.
WOODY ALLEN²⁵¹*

²⁵¹ Woody Allen, citado en el periódico *Observer*, 27 de mayo de 2001, p. 30.

Otros investigadores han sugerido otros principios antrópicos más especulativos. John Wheeler, el científico de Princeton que acuñó el término «agujero negro» y desempeñó un papel principal en su investigación, propuso lo que él denominó el *principio antrópico participatorio*. Éste no tiene que ver especialmente con las constantes de la Naturaleza sino que está motivado por la precisión de las coincidencias que permiten que exista vida en el cosmos. ¿Es posible, pregunta Wheeler, que la vida sea en algún sentido esencial para la coherencia del Universo? Pero por supuesto nosotros no somos de interés para las galaxias remotas ni para la existencia del Universo en el pasado lejano antes de que pudiera existir la vida. Wheeler se sentía tentado a preguntar si la importancia de los observadores al traer a la plena existencia la realidad cuántica podía estar tratando de decirnos que los «observadores», definidos de forma adecuada, pueden ser en cierto sentido necesarios para hacer nacer al Universo. Es muy difícil darle a esto un sentido correcto porque en teoría cuántica la noción de observador carece de una definición nítida. Es algo que registra información. Una placa fotográfica valdría tanto como un vigilante nocturno.

Un cuarto principio antrópico, introducido por Frank Tipler y por mí mismo, es algo diferente. Es sólo una hipótesis que debería poder ser demostrada verdadera o falsa utilizando las leyes de la física y el estado observado del Universo. Se denomina *principio (o conjetura) antrópico final* y propone que una vez que la vida emerge en el Universo, no desaparecerá. Una vez que hemos dado con una

definición de vida adecuadamente amplia, digamos como procesamiento de información («pensamiento») con la capacidad de almacenar información («memoria»), podemos investigar si esto podría ser cierto. Nótese que no se afirma que la vida tenga que aparecer o que deba persistir. Evidentemente, si la vida va a durar para siempre deberá tener una base distinta de la vida que conocemos. Nuestro conocimiento de la astrofísica nos dice que el Sol sufrirá con el tiempo una crisis de energía irreversible, se expandirá y engullirá la Tierra y el resto del sistema solar interno. Para entonces tendremos que habernos ido de la Tierra, o haber transmitido la información necesaria para recrear miembros de nuestra especie (si aún pueden ser llamados así) en otro lugar. Pensando en millones de años en el futuro también podríamos imaginar que la vida existirá en formas que hoy llamaríamos «artificiales». Tales formas podrían ser poco más que procesadores de información con capacidad para almacenar información para uso futuro. Como todas las formas de vida, estarían sometidas a evolución por selección natural²⁵². Con mucha probabilidad será minúscula. Ya vemos en nuestras propias sociedades tecnológicas una tendencia a la fabricación de máquinas cada vez más pequeñas que consumen cada vez menos energía y casi no producen residuos. Llevado esto a su conclusión lógica, esperamos que las formas de vida avanzada sean tan pequeñas como lo permitan las leyes de la física.

²⁵² Algunos biólogos definirían realmente la vida como algo que evoluciona por selección natural.

De paso podríamos mencionar que con ello se explicaría por qué no hay pruebas de vida extraterrestre en el Universo. Si está verdaderamente avanzada, incluso para nuestros niveles, lo más probable es que sea muy pequeña, reducida a la escala molecular. Entonces se juntan todo tipo de ventajas. Hay mucho sitio allí: pueden mantenerse poblaciones enormes. Se puede sacar partido de la potente computación intrínsecamente cuántica. Se requiere poca materia prima y el viaje espacial es más fácil. También puede evitarse el ser detectado por civilizaciones de bípedos patosos que viven en planetas brillantes y emiten constantemente ruido de ondas de radio al espacio interplanetario.

Ahora podemos preguntarnos si el Universo permite que el procesamiento de información continúe para siempre. Incluso si uno no quiere equiparar procesamiento de información con vida, por futurista que sea, ciertamente su existencia debería ser necesaria. Es una pregunta cuya respuesta puede estar cerca. Si el Universo empezó a acelerarse hace algunos miles de millones de años, como indican observaciones recientes, entonces es probable que siga acelerándose para siempre²⁵³. Nunca se frenará y se contraerá de nuevo hasta un Big Crunch. Si es así, entonces sabemos que el procesamiento de información llegará a detenerse. Sólo un número finito de bits de información pueden ser procesados en un futuro

²⁵³ Éste será el caso si la aceleración es debida a la presencia de la denominada «constante cosmológica», que representa la energía de vacío del Universo. Es posible que otras formas de materia puedan imitar la presencia de una constante cosmológica durante un período finito de la historia cósmica antes de desintegrarse en formas ordinarias de materia que no producen expansión acelerada (ver J. D. Barrow, R. Bean, y J. Magueijo, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 316, L41-4 [2000]). Si esto sucede suficientemente pronto entonces el procesamiento de información no tiene por qué desaparecer con el tiempo.

sin fin. Esto son malas noticias. Ocurre porque la expansión es tan rápida que la calidad de la información se degrada muy rápidamente²⁵⁴. Y lo que es peor, la expansión acelerada es tan rápida que las señales luminosas enviadas por cualquier civilización tendrán un horizonte más allá del cual no pueden verse. El Universo quedará compartimentado en regiones limitadas dentro de las cuales es posible la comunicación, pero no entre unas y otras.

Junto con la propuesta original del principio antrópico final se hizo una observación interesante. Nosotros señalamos²⁵⁵ que si se descubriera que la expansión del Universo estaba acelerándose, entonces el procesamiento de información debería desaparecer con el tiempo. Recientemente, varios grupos de investigación han reunido importantes pruebas observacionales que demuestran que la expansión del Universo empezó a acelerarse hace sólo algunos miles de millones de años. Pero supongamos que estas pruebas observacionales a favor de la aceleración actual del Universo resultaran ser incorrectas²⁵⁶. ¿Qué pasaría entonces? Lo más probable es que el Universo siga expandiéndose para siempre pero

²⁵⁴ Un lazo circular que podría explotarse en el tipo correcto de Universo es la posibilidad de que la aceleración esté producida por la presencia de una nueva forma de materia que podría utilizarse como una nueva forma de fuente de energía. Esto probablemente sólo daría como resultado la producción de energía utilizable más otra fuente de energía en aceleración constante de la que no se podría extraer energía. Finalmente esa nueva fuente llegaría a impulsar la expansión y comenzaría una vez más una imparable degradación de la información.

²⁵⁵ Barrow y Tipler, *op. cit.*, p. 668. Discusiones adicionales han sido ofrecidas por L. Krauss y G. D. Starkman, *Astrophys. J.* 531, pp. 22-30 (2000).

²⁵⁶ Esta aceleración puede estar formada por una constante cosmológica positiva, propuesta inicialmente por Einstein en su anuncio original de la teoría de la relatividad general. Es como una parte adicional de la ley de la gravedad. A diferencia de la familiar ley de la inversa del cuadrado de Newton, esta contribución aumenta linealmente con la distancia. Tiene una interpretación natural como la energía de vacío del Universo pero su valor es muy misterioso: 10^{120} veces mayor que su valor en unidades «naturales» de Planck.

se decelere continuamente a medida que se expande. La vida sigue enfrentándose a una batalla cuesta arriba por sobrevivir indefinidamente. Necesita encontrar diferencias de temperatura, o de densidad, o de expansión en el Universo de las que pueda extraer energía útil haciéndolas uniformes. Si se basa en recursos minerales de energía que existen localmente —estrellas muertas, agujeros negros que se evaporan, partículas elementales que se desintegran—, entonces con el tiempo se encara al problema al que se enfrentan inevitablemente las minas de carbón muy explotadas: cuesta más extraer la energía que lo que puede ganarse de ello. Los seres del futuro lejano se verán en la necesidad de economizar en el uso energético: ¡economizar en vida, de hecho! Pueden reducir su consumo de energía libre pasando largos períodos de hibernación, despertándose para procesar información durante un tiempo antes de volver a su estado inactivo. Hay un problema potencial con esta existencia a lo Rip van Winkle²⁵⁷. Uno necesita un despertador. Hay que preparar algunos procesos físicos que proporcionen un despertador infalible sin utilizar tanta energía que se pierda el interés general del período de hibernación. Hasta ahora no está claro si puede hacerse para siempre. Parece que con el tiempo los gradientes de energía extraída que pueden utilizarse para impulsar el procesamiento de información se hacen ineficaces. Entonces la vida debe empezar a desaparecer.

²⁵⁷ Protagonista de un célebre cuento de Washington Irving; tras despertarse de una siesta y volver a su casa, Rip van Winkle comprobó que habían pasado veinte años. (*N. del t.*)

Por el contrario, si la vida no limita su atención a fuentes de energías locales en minas, la predicción a largo plazo parece mucho más brillante. El Universo no se expande exactamente al mismo ritmo en todas direcciones. Existen pequeñas diferencias de velocidad entre una dirección y otra que son atribuibles a ondas gravitatorias de longitud de onda muy larga, probablemente infinita, que atraviesan el espacio. El desafío para las formas de vida superavanzadas consiste en encontrar una manera de aprovechar este suministro de energía potencialmente ilimitado. Lo extraordinario en esto es que su densidad decrece mucho más lentamente que la de todas las formas ordinarias de materia a medida que el Universo se expande. Explotando las diferencias de temperatura creadas por radiación que se mueve paralela a la dirección de la expansión a ritmos diferentes, la vida puede encontrar una manera de mantener en marcha su procesamiento de información.

Finalmente, si el Universo se hunde de nuevo en un Big Crunch futuro en un tiempo finito, entonces no hay esperanza a primera vista. Con el tiempo, el Universo en proceso de hundimiento se contraerá lo suficiente para que se fundan galaxias y estrellas. Las temperaturas crecerán tanto que moléculas y átomos se disgregarán. Una vez más, como en el futuro lejano, la vida tiene que existir en alguna forma incorpórea abstracta, quizá entretrejida en la fábrica del espacio y el tiempo. Resulta, sorprendentemente, que esta supervivencia indefinida no está descartada mientras el tiempo se defina de forma adecuada. Si el tiempo verdadero al que

marcha el Universo es un tiempo creado por la propia expansión, entonces es posible que un número infinito de «tics» de este reloj ocurra en la cantidad finita de tiempo que parece estar disponible en nuestros relojes antes de que se alcance el Big Crunch.

Hay un último truco que podrían tener guardado en su manga esos supervivientes superavanzados en universos que parecen condenados a expandirse para siempre. En 1949 el lógico Kurt Gödel, amigo y colega de Einstein en Princeton, le dio una sorpresa al demostrar que el viaje en el tiempo estaba permitido por la teoría de la gravedad de Einstein²⁵⁸. Incluso encontró una solución a las ecuaciones de Einstein para un Universo en el que esto ocurría. Por desgracia, el Universo de Gödel no se parece en nada al Universo en que vivimos. Gira muy rápidamente y está en desacuerdo con casi todas las observaciones astronómicas que se hagan. Sin embargo, puede haber otras posibilidades más complicadas que se parezcan a nuestro Universo en todos los aspectos necesarios pero que aún permitan el viaje en el tiempo. Los físicos han pasado mucho tiempo explorando cómo se podrían crear las distorsiones de espacio y tiempo necesarias para que se dé el viaje en el tiempo. Si es posible preparar las condiciones necesarias para enviar información hacia atrás en el tiempo, entonces se presenta una estrategia para escapar de un futuro sin vida hacia formas de «vida» adecuadamente etéreas definidas por procesamiento y almacenamiento de información. No hay que invertir los esfuerzos

²⁵⁸ K. Gödel, «An example of a new type of cosmological solution of Einstein's Field Equations of Gravitation», *Review of Modern Physics* 21, pp. 447-450 (1949).

en perfeccionar medios de extraer energía utilizable de un entorno que se acerca cada vez más a un equilibrio sin vida. En lugar de ello, basta con viajar hacia atrás en el tiempo a una era en que las condiciones sean mucho más hospitalarias. De hecho, viajar no es estrictamente necesario, sólo hay que transmitir las instrucciones necesarias para la reemergencia.

Con frecuencia la gente se preocupa por las aparentes paradojas fácticas que pueden surgir de ser posible el viaje hacia atrás en el tiempo. ¿Puede uno matarse o matar a sus padres en la infancia de modo que no pueda existir? Todas estas paradojas son imposibilidades. Aparecen porque uno está introduciendo a mano una imposibilidad física y lógica. Para discutir las es útil pensar el espacio y el tiempo como Einstein nos enseñó: como un único bloque de espacio-tiempo (ver figura 8.9).

Salgamos ahora fuera del espacio-tiempo y miremos lo que sucede allí. Las historias de los individuos son trayectorias a través del bloque. Si se curvan sobre sí mismas para formar lazos cerrados entonces juzgaríamos que se ha producido un viaje en el tiempo. Pero las trayectorias son las que son. No hay ninguna historia que «cambie» al hacerlo.

El viaje en el tiempo nos permite ser parte del pasado pero no cambiar el pasado. Las únicas historias de viaje en el tiempo posibles son las trayectorias autoconsistentes.

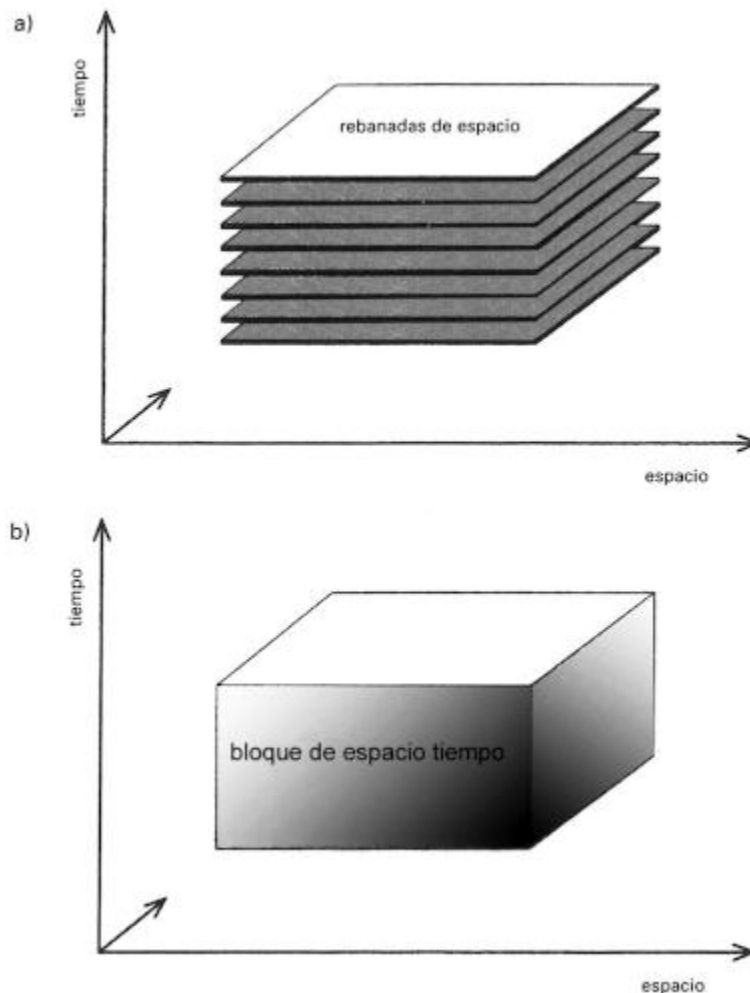


Figura 8.9. (a) Una pila de rebanadas de espacio tomadas en tiempos diferentes; (b) un bloque de espacio-tiempo construido a partir de todas las rebanadas de espacio. Este bloque podría rebanarse de muchas formas diferentes a la escogida en (a).

En cualquier trayectoria cerrada no hay una división bien definida entre el futuro y el pasado. Es como tener una tropa de soldados marchando uno detrás de otro en fila india. Si marchan en línea recta está claro quién está delante de quién. Pero hagámosles marchar en círculo de modo que el que antes era líder sigue al que

antes era farolillo rojo y ya no hay ningún sentido de orden bien definido en la línea, como se representa en la figura 8.10.

Si este tipo de viaje hacia atrás en el tiempo es una vía de escape del final termodinámico del Universo, y nuestro Universo parece encaminar, hacia semejante borrado termodinámico de todas las posibilidades de procesamiento de información, entonces quizá seres superavanzados en nuestro futuro estén ya viajando hacia atrás, al ambiente cósmico benigno que proporciona el Universo actual. Se han presentado muchos argumentos en contra de la llegada de turistas desde el futuro, pero tienen en mente un propósito más bien antropocéntrico. Se ha alegado que grandes sucesos de la historia de la Tierra (sucesos en torno a Belén en el 4 a. C., la crucifixión, la muerte de Sócrates, y así sucesivamente) se hubieran convertido en imanes para los viajeros del tiempo, que atraerían una enorme audiencia acumulativa que evidentemente no estaba presente cuando ocurrieron. Pero no hay ninguna razón por la que los que escapan de la muerte térmica del Universo debieran visitarnos *a nosotros*, y mucho menos provocar problemas de control de multitudes en puntos críticos de nuestra historia.

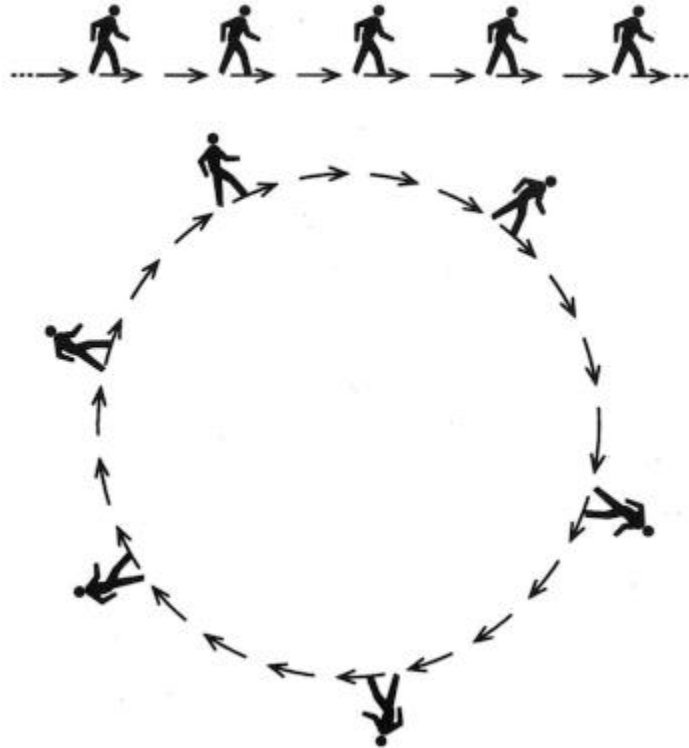


Figura 8.10. Si se marcha en línea recta está claro quién va delante de quién. Si se marcha en círculo cualquiera está delante y detrás de cualquier otro.

Mi argumento favorito²⁵⁹ contra el viaje hacia atrás en el tiempo es un argumento financiero. Se basa en el hecho de que las tasas de interés en los mercados de valores no son inútiles para explicar que ningún viajero, ni los que van hacia atrás ni hacia adelante en el tiempo, se está aprovechando de su posición para acabar con los mercados financieros. Si pudieran invertir en el pasado, basándose en el conocimiento de dónde aumentarían las bolsas en el futuro, entonces el resultado a largo plazo sería llevar las tasas de interés a cero. Una vez más, es fácil evitar la aplicación de este argumento

²⁵⁹ M. R. Reinganum, «Is Time Travel Possible? A Financial Proof», *Journal of Portfolio Management* 13, pp. 10-12 (1986).

para descartar a los viajeros en el tiempo que escapan de la muerte térmica del Universo. Uno sospecha que las inversiones financieras serían la última de sus preocupaciones.

Capítulo 9

Alterar las constantes y reescribir la historia

Lo primero que hay que comprender sobre los universos paralelos... es que no son paralelos. Es importante comprender que ni siquiera son, estrictamente hablando, universos, pero es más fácil si uno lo intenta y lo comprende un poco más tarde, después de haber comprendido que todo lo que ha comprendido hasta ese momento no es verdadero.

DOUGLAS ADAMS²⁶⁰

§. Mundos rígidos frente a mundos flexibles

Mañana verá siete águilas, aparecerá un gran cometa y hablarán voces desde los torbellinos prediciendo monstruos y cosas terribles. Este Universo nunca tendría sentido; sospecho que fue construido con un contrato del gobierno.

²⁶⁰ D. Adams, *Mostly Harmless*, Heinemann, Londres, 1992, p. 25.

*ROBERT HEINLEIN*²⁶¹

¿Qué vamos a hacer con esta idea antrópica fuerte? ¿Puede ser algo más que una nueva presentación del aserto de que nuestra forma de vida compleja es muy sensible a cambios pequeños en los valores de las constantes de la Naturaleza? ¿Y cuáles son estos «cambios»? ¿Cuáles son estos «otros mundos» en donde las constantes son diferentes y la vida no puede existir?

Una visión plausible del Universo es que hay una y sólo una forma para las constantes y leyes de la Naturaleza. Los universos son trucos difíciles de hacer, y cuanto más complicados son, más piezas hay que encajar. Los valores de las constantes de la Naturaleza son así un rompecabezas con una única solución, y esta solución está completamente especificada por la teoría de la Naturaleza verdadera. Si esto fuera cierto, hablar de otros universos hipotéticos en los que las constantes de la Naturaleza toman diferentes valores tendría tanto sentido como hablar de círculos cuadrados. Simplemente no podría haber otros mundos²⁶². El hecho de que el único Universo posible sea aquel que permita el desarrollo y la

²⁶¹ R. A. Heinlein, *The Number of the Beast*, New English Library, Londres, 1980, p. 14. [Hay traducción española: *El número de la bestia*, Martínez Roca, Madrid, 1982].

²⁶² Ésta es una situación algo hipotética. Cabría esperar entender por qué nuestra teoría final no puede cambiarse en ninguna manera sin destruir su coherencia lógica, pero es difícil imaginar cómo podríamos saber alguna vez que no había una teoría autoconsistente completamente diferente que no estuviera en ningún sentido próxima a nuestra supuesta teoría final.

persistencia de la vida resultaría simplemente un hecho bruto sobre el mundo, aunque un hecho extraordinariamente agradable²⁶³.

Montados en esta visión de un «mundo rígido» seríamos incapaces de decir algo más sobre los valores aparentemente fortuitos de las constantes de la Naturaleza. En el futuro sólo podríamos esperar y observar cómo una secuencia de experimentadores comprobaban cada vez con más cifras decimales que los valores de todas las constantes de la Naturaleza eran precisamente los predichos. Un mundo rígido no ofrece lugar para que las cosas sean distintas de lo que son; cuando se llega a las leyes, fuerzas y constantes de la Naturaleza básicas²⁶⁴, no hay alternativas.

Por el contrario, la visión de «mundo flexible» sí ofrece lugar para la variación. Si hay (o puede haber) «otros» universos, si algunas de las constantes de la Naturaleza no están rígidamente especificadas por la teoría final, o si nuestro propio Universo muestra estructuras, muy diferentes más allá de nuestro horizonte, entonces el principio antrópico fuerte tiene un claro significado.

Supongamos que existen universos en los que las constantes de la Naturaleza ocupan un amplio abanico de valores diferentes. Habría una colección de posibilidades diferentes frente a las que juzgar la posición de nuestro conjunto de constantes observado. Esto es lo

²⁶³ A primera vista podría parecer que este punto final es similar al de la biología anterior al descubrimiento de la evolución por selección natural. Sin embargo, es bastante diferente. Se trata del descubrimiento de una forma completa para las leyes y constantes verdaderas de la Naturaleza. Pero incluso si las conociéramos no podríamos predecir todos los estados que podrían salir de ellas.

²⁶⁴ Esto no significa que el Universo entero tenga que ser como es en cualquier aspecto. Dos universos con las mismas leyes y constantes de la Naturaleza, e incluso las mismas condiciones iniciales, mostrarán diferentes resultados para dichas leyes y diferente evolución detallada debido a la ruptura de simetría y la incertidumbre cuántica.

que Carter concibió como un modo de transformar una aplicación del principio antrópico fuerte en otra que equivalía a una simple aplicación del principio débil. Pues si en cierto sentido «existen» muchos de los universos posibles (o incluso todos), entonces en algún lugar dentro de la constelación completa de posibles combinaciones de los valores de las constantes habrá situaciones que permitan que evolucionen observadores. Inevitablemente vivimos en uno de estos universos, con independencia de cuán especiales pudieran parecer sus propiedades cuando se vieran en todo el espectro de posibilidades. Así, Carter propone que:

Por supuesto, siempre es filosóficamente posible —como un último recurso, cuando no se dispone de un argumento físico más fuerte— elevar una predicción basada en el principio antrópico fuerte al estatus de una explicación pensando en términos de un «conjunto de mundos». Por esto entiendo un conjunto de universos caracterizado por todas las combinaciones imaginables de condiciones iniciales y constantes fundamentales... La existencia de cualquier organismo describible como un observador sólo será posible para ciertas combinaciones restringidas de los parámetros. Una predicción basada en el principio antrópico fuerte puede considerarse como una demostración de que la característica bajo consideración es común a todos los miembros del subconjunto²⁶⁵.

²⁶⁵ Carter, «Large number coincidences and the anthropic principle», en *Confrontation of Cosmological Theories with Observational Data*, ed. M. S. Longair Reidel, Dordrecht, 1974.

La idea de que haya otros universos no es nueva. En los siglos XVIII y XIX se especuló sobre esta posibilidad como parte del debate sobre la vida en otros mundos. También hubo una discusión importante en un contexto muy similar al del principio antrópico fuerte. Hacía tiempo que se conocían coincidencias similares en apoyo de la vida que implicaban a la forma de las leyes de la gravedad y el movimiento, la constitución de la Tierra y el sistema solar, y la biología humana. Los teólogos naturales argumentaban que daban pruebas del propósito divino en la estructura de nuestro Universo. Otros, empezando con Leibniz, alegaban que vivíamos en el mejor de los mundos posibles; una idea parodiada de forma inmisericorde por Voltaire en el *Cándido*. Sin embargo, la perspectiva cambió cuando Maupertuis demostró, con considerable ayuda del gran matemático suizo Leonard Euler, que las leyes del movimiento conocidas y propuestas por Newton podían deducirse a partir de un nuevo principio matemático. El principio permitía considerar movimientos reales que tomaban todas las trayectorias posibles entre dos puntos. Si se evaluaba una magnitud concreta, llamada «acción», para cada trayectoria, y se exigía que la trayectoria realmente seguida tuviera el mínimo valor para la acción, entonces se garantizaba que la trayectoria era idéntica a la predicha por las leyes de Newton. Con el tiempo, los físicos descubrieron que todas las leyes de la física podían deducirse a partir de «principios de acción» de esta forma. Maupertuis anunció orgullosamente que podía decir qué significaba el «mejor» de los mundos posibles y

cuáles eran los otros mundos: «mejor» significaba mínima acción y los otros mundos inferiores son aquellos en los que el movimiento no sigue trayectorias de mínima acción. De hecho, durante el siglo XIX hubo incluso un intento de explicar los fósiles como reliquias de estos mundos fallidos de acción no mínima. Hacia el final del siglo XIX la evidente inmensidad del Universo astronómico hacía fácil especular que en otros lugares debería haber mundos gobernados por leyes naturales diferentes de las del nuestro. Wallace, escribiendo en 1903, aduce que

*no hay dos estrellas, no hay dos cúmulos, no hay dos nebulosas que sean iguales. ¿Por qué entonces debería haber otros universos de la misma materia y sometidos a las mismas leyes?... Por supuesto, puede haber, y probablemente los hay, otros universos, quizá de otros tipos de materia y sometidos a otras leyes*²⁶⁶.

La física moderna se construye en torno a la deducción de las leyes de la Naturaleza a partir de principios de acción. Es la forma más eficiente de encontrarlas y permite generalizaciones mucho mayores y la unificación de leyes diferentes. Max Born, uno de los pioneros de la mecánica cuántica, predijo que la búsqueda de una teoría de todo se convertiría en una búsqueda de la trayectoria de mínima acción apropiada a través del espacio de todas las posibilidades:

Podemos estar convencidos de que [la fórmula universal] tendrá la forma de un principio extremal, no porque la Naturaleza tenga

²⁶⁶ A. R. Wallace, *Man's Place in the Universe*, Chapman & Hall, Londres, 1903, p. 267.

*una voluntad o propósito o economía, sino porque el mecanismo de nuestro pensamiento no tiene otra forma de condensar una estructura de leyes complicada en una expresión corta*²⁶⁷.

Hoy, a medida que los físicos han seguido este camino hacia teorías más profundas y más universales de las fuerzas de la Naturaleza, se han movido sistemáticamente hacia la visión del mundo flexible. Parece haber constantes de la Naturaleza que no están absolutamente determinadas por una Teoría de Todo completamente general. Algunas aparecen en ella pero se les permite tomar todo un rango continuo de valores. Otras no aparecen explícitamente en la Teoría de Todo pero emergen en etapas concretas de la evolución del Universo por un proceso aleatorio, como una aguja equilibrada que cae en una dirección concreta. Estas constantes toman valores que ponen de manifiesto que los resultados de las leyes de la Naturaleza no tienen por qué poseer las simetrías de las propias leyes: son mucho más complicados y azarosos.

Una de las grandes preguntas a las que hoy se enfrentan los físicos es la determinación de cuántas de las constantes definitorias de la Naturaleza estarán unívoca y completamente especificadas por una Teoría de Todo como la teoría de supercuerdas preferida actualmente, llamada «teoría M». Las que estén omitidas en esta determinación podrán tomar todo tipo de valores diferentes sin afectar a la lógica interna y a la autoconsistencia de la Teoría de

²⁶⁷ M. Born, *Physics in My Generation*, Pergamon, Londres, 1956, p. 77.

Todo. Podrían haber sido diferentes si secuencias particulares de sucesos que hubieran llevado a su aparición en las etapas tempranas del Universo se hubieran desarrollado de forma distinta. Lo más cerca que podíamos llegar alguna vez de una explicación de sus valores sería por aplicación de un argumento antrópico. Quizá todos los valores disponibles para estas constantes sean igualmente probables. De todas formas, nosotros no estaríamos observando a menos que caigan dentro de la estrecha banda de valores que permita la existencia de observadores.

§. Universos inflacionarios

El gobierno admitió ayer por primera vez que las cosechas genéticamente modificadas contaminan las cosechas normales por muy separadas que estén.

SARAH SCHAEFER²⁶⁸

Hay varias propiedades sorprendentes del Universo astronómico que parecen ser cruciales para el desarrollo de la vida en el Universo. Estas no son constantes de la Naturaleza en el sentido de la constante de estructura fina o la masa del electrón. Incluyen magnitudes que especifican cuán agregado está el Universo, con qué rapidez se está expandiendo y cuánta materia y radiación contiene. En última instancia, a los cosmólogos les gustaría explicar los

²⁶⁸ S. Schaefer, *Independent*, 4 de junio de 2000, p. 6.

números que describen estas magnitudes. Incluso podrían ser capaces de demostrar que estas «constantes astronómicas» están completamente determinadas por los valores de las constantes de la Naturaleza como la constante de estructura fina.

Las características distintivas del Universo que están especificadas por estas «constantes» astronómicas desempeñan un papel clave en la generación de las condiciones para la evolución de la complejidad bioquímica. Ahora vamos a considerar dos de ellas con más detalle porque la forma en que pueden explicarse sus inusuales valores crea una perspectiva enteramente nueva sobre el Universo que ofrece una plétora de «otros mundos» en donde el principio antrópico encuentra una aplicación natural e inevitable.

Cuando miramos más de cerca la expansión del Universo descubrimos que está equilibrada con enorme precisión. Está muy cerca de la línea divisoria crítica que separa los universos que se expanden con suficiente rapidez para superar la atracción de la gravedad y continuar así para siempre de aquellos otros universos en los que la expansión finalmente se invertirá en un estado de contracción global y se dirigirán hacia un Big Crunch cataclísmico en algún tiempo finito en el futuro.

Algunos números que definen nuestro Universo

- El número de fotones por protón
- La razón entre densidades de materia oscura y luminosa
- La anisotropía de la expansión
- La falta de homogeneidad del Universo
- La constante cosmológica
- La desviación de la expansión respecto al valor «crítico»

Figura 9.1. Algunas constantes clave que describen nuestro Universo y lo distinguen de otros que podemos imaginar que obedecen a las mismas leyes.

De hecho, estamos tan cerca de esta divisoria crítica que nuestras observaciones no pueden decirnos con seguridad cuál es la predicción válida a largo plazo. En realidad, es la estrecha proximidad de la expansión a la línea divisoria lo que constituye el gran misterio: *a priori* parece altamente poco probable que se deba al azar. Una vez más, no es totalmente inesperado. Los universos que se expanden demasiado rápidamente son incapaces de agregar material en forma de galaxias y estrellas, de modo que no pueden formarse los bloques constituyentes de la vida compleja. Por el contrario, los universos que se expanden demasiado lentamente terminan hundiéndose antes de los miles de millones de años necesarios para que se formen las estrellas.

Sólo los universos que están muy cerca de la divisoria crítica pueden vivir el tiempo suficiente y expandirse con bastante suavidad para que se formen las estrellas y los planetas.

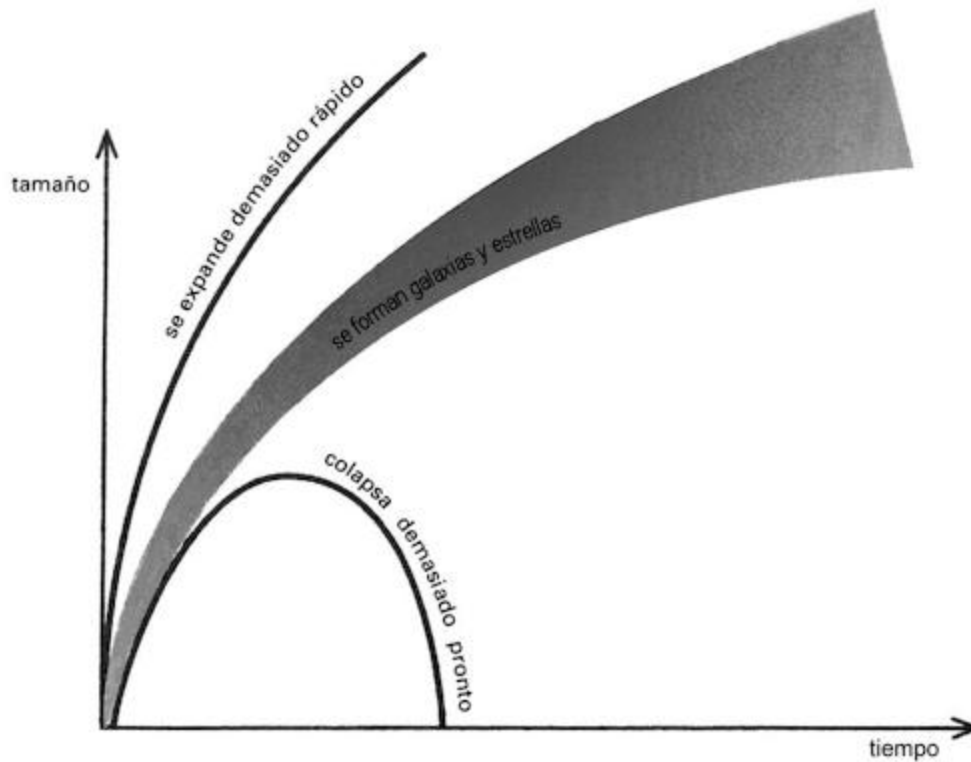


Figura 9.2. Un Universo debe expandirse cerca de la divisoria crítica para que la vida evolucione. Los universos que se expanden más lentamente colapsarán antes de que las estrellas tengan tiempo de formarse. Los universos que se expanden mucho más rápidamente no permitirán que su material se condense en islas de materia como galaxias y estrellas. En ninguna de estas dos situaciones podrán formarse los ladrillos de la complejidad bioquímica.

No es un accidente que nos encontremos viviendo miles de millones de años después del comienzo aparente de la expansión del

Universo y siendo testigos de un estado de expansión que está próximo a la divisoria crítica (ver figura 9.2).

Una segunda característica distintiva de nuestro Universo es su uniformidad. El nivel de agregación por encima de la escala de las galaxias es muy pequeño: sólo una parte en cien mil, de promedio. Esto es importante porque si fuera significativamente mayor, las galaxias habrían degenerado rápidamente en grumos densos y los agujeros negros se hubieran formado mucho antes de que pudieran establecerse ambientes que sustentan la vida. Incluso si pudieran, la intensidad de la gravedad dentro de las galaxias sería suficientemente grande para destruir las órbitas de los planetas en torno a estrellas como el Sol. Por el contrario, si la agregación fuera mucho menor que la observada, entonces las no-uniformidades en la densidad de materia habrían sido demasiado débiles para que llegaran a formarse galaxias y estrellas. Una vez más, el Universo carecería de los ladrillos bioquímicos de la vida; sería un lugar más simple y menos interesante.

Desde 1980 la teoría cosmológica preferida ha ofrecido una explicación de por qué el Universo muestra una proximidad a la planitud, su pequeño (pero no demasiado pequeño) nivel de agregación y su enorme tamaño²⁶⁹. Parece que estas características pueden explicarse ahora por una secuencia de sucesos que pueden ser muy probables en cualquier tipo de Universo, independientemente de cómo empiece a expandirse.

²⁶⁹ A. Guth, «The Inflationary Universe», *Phys. Rev. D* 23, p. 347 (1981); A. Guth, *The Inflationary Universe*, Addison Wesley, Reading, 1997. [Hay traducción española: *El Universo inflacionario*, Debate, Barcelona, 1999].

Esta teoría del Universo tan primitivo introduce un interludio histórico llamado «inflación». Da un ligero matiz a la imagen simple de un Universo en expansión. Pero este matiz tiene consecuencias enormes. La imagen Big Bang estándar del Universo en expansión, que nos había acompañado desde la década de 1920, tiene una propiedad concreta: la expansión se está decelerando. Independientemente de si el Universo está destinado a expandirse para siempre o a plegarse sobre sí mismo hacia un Big Crunch, la expansión está siempre decelerada por la atracción gravitatoria ejercida por todo el material del Universo. La deceleración es simplemente una consecuencia del carácter atractivo de la fuerza de la gravedad.

Siempre se había supuesto que la gravedad garantizaría que materia y energía atraerían a otras formas de materia y energía. Pero en la década de 1970 los físicos de partículas empezaron a ver que sus teorías del comportamiento de la materia a altas temperaturas contenían nuevas formas de materia, llamadas *campos escalares*, cuyo efecto gravitatorio mutuo podía ser repulsivo²⁷⁰. Si llegaran a convertirse en las mayores contribuciones a la densidad del Universo durante alguna etapa de su historia muy temprana, entonces la deceleración del Universo sería reemplazada por un brote de aceleración. De forma notable, parecía que si existen tales campos escalares, entonces invariablemente llegan a ser los constituyentes más influyentes del Universo muy poco

²⁷⁰ Ver J. D. Barrow, *The Origin of the Universe*, Orion, Londres, 1994 para una exposición de estos desarrollos.

después de que empiece a expandirse, y su influencia puede ser muy breve pero decisiva. Inmediatamente después de esto deberían decaer sin dejar huella en el mar cósmico de materia y radiación ordinaria.

La teoría del Universo inflacionario propone que en una etapa muy temprana de la historia del Universo se da un breve período de expansión acelerada (ver figura 9.3). Esto pudo haber ocurrido porque uno de los ubicuos campos escalares llegó a dominar la densidad de materia del Universo. Más adelante este campo tiene que decaer con gran rapidez. Cuando lo hace, su energía calienta el Universo de una manera complicada, mientras el Universo retoma su expansión decelerada normal.

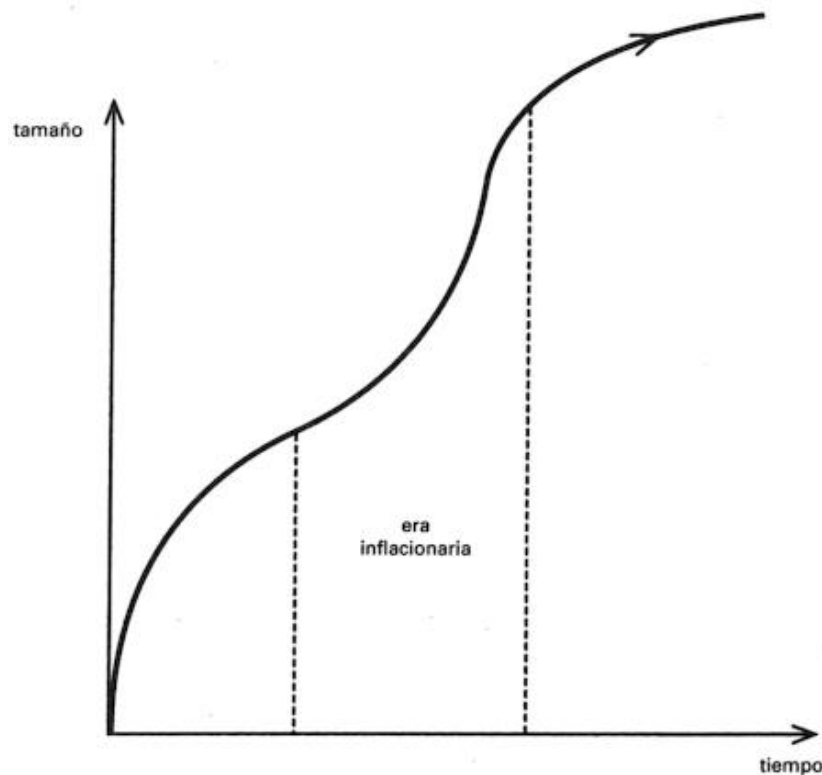


Figura 9.3. La «inflación» es un breve período de expansión acelerada durante las primeras etapas de la historia del Universo.

Este breve episodio inflacionario suena inocuo. Pero no es así: un período muy corto de expansión acelerada puede resolver muchos de nuestros grandes problemas cosmológicos. La primera consecuencia de un corto período de expansión acelerada en nuestro pasado es que nos permite entender por qué nuestro Universo visible se está expandiendo tan cerca de la divisoria crítica que separa universos abiertos de universos cerrados. El hecho de que aún estemos tan próximos a esta divisoria, después de unos trece mil millones de años de expansión, es completamente fantástico. Puesto que cualquier desviación respecto de la divisoria crítica crece continuamente con el paso del tiempo, la expansión debe haber empezado extraordinariamente próxima a la divisoria para seguir hoy tan cerca (no podemos estar exactamente sobre ella)²⁷¹.

Pero la tendencia de la expansión a separarse de la divisoria crítica es tan sólo otra consecuencia del carácter atractivo de la fuerza gravitatoria. Es obvio con sólo mirar la figura 9.2 que los universos abiertos y cerrados se alejan más y más de la divisoria crítica a medida que avanzamos en el tiempo. Si la gravedad es repulsiva y la expansión se acelera, esto hará, mientras dure, que la expansión se acerque cada vez más a la divisoria crítica. Si la inflación duró el

²⁷¹ Esto se debe a que el Universo contiene irregularidades.

tiempo suficiente²⁷², podría explicar por qué nuestro Universo visible está aún tan sorprendentemente próximo a la divisoria crítica. Este rasgo del Universo que apoya la vida debería aparecer en el Big Bang sin necesidad de condiciones de partida especiales.

Otro subproducto de un corto estallido de aceleración cósmica es que cualesquiera irregularidades de la expansión del Universo se alisan y la expansión procede muy rápidamente al mismo ritmo en todas direcciones, que es precisamente lo que vemos hoy. Esto ofrece una explicación del carácter extraordinariamente simétrico de la expansión del Universo, rasgo que siempre ha chocado a los cosmólogos como algo misterioso y poco probable. Hay tantas formas más de ser desordenado que de ser ordenado que cabría esperar que un Universo sacado de la chistera al azar fuera un Universo muy asimétrico y desordenado²⁷³.

Si hubo inflación, todo el Universo visible que hoy nos rodea se habrá expandido a partir de una región mucho *más pequeña* de lo que sería si la expansión fuera siempre decelerada, como sucede en la teoría del Big Bang convencional (no-inflacionaria). La pequeñez de nuestros inicios inflacionarios tiene la bonita característica de ofrecer una explicación tanto del alto grado de uniformidad que existe en la expansión global del Universo como de las muy pequeñas no-uniformidades vistas por el satélite COBE de la NASA.

²⁷² La aceleración es tan rápida que sólo se requiere un período muy breve, desde 10^{-35} a 10^{-33} segundos, para hacerlo.

²⁷³ Para una exposición más detallada de este problema ver J. D. Barrow y J. Silk, *The Left Hand of Creation*, Basic Books, Nueva York, 1983 y Penguin Books, Londres, 1995².

Éstas son las semillas que posteriormente se desarrollaron para generar las galaxias y los cúmulos (ver figura 9.4).

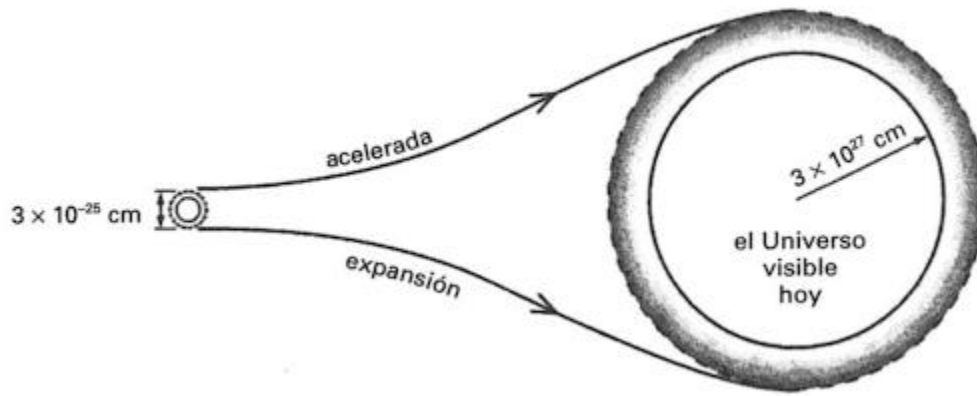


Figura 9.4. Si hubo inflación, todo el Universo visible que hoy nos rodea se habrá expandido a partir de una región más pequeña que la región de la que se hubiera originado si la expansión fuera siempre decelerada, como en la teoría del Big Bang convencional (no inflacionaria).

Si el Universo se acelera, la totalidad de nuestro Universo visible puede surgir de la expansión de una región lo bastante pequeña para que las señales luminosas la atraviesen por completo en épocas muy primitivas. Esta travesía de la luz permite que las condiciones dentro de dicha región primordial se mantengan suaves. Cualesquiera irregularidades se suavizarán rápidamente. En la vieja y no-inflacionaria teoría del Big Bang la situación era muy diferente. Nuestra parte visible del Universo tenía que surgir de una región enormemente superior a otra región que los rayos luminosos puedan coordinar y suavizar. Por lo tanto, era un completo misterio por qué nuestro Universo visible se ve tan similar

en todas las regiones del cielo con diferencias menores de una parte en cien mil, como han mostrado las observaciones. Una parte del Universo visible no hubiera tenido tiempo de recibir rayos luminosos de otra parte alejada.

La minúscula región que creció para dar origen a nuestro Universo visible no podía haber empezado perfectamente suave. Eso es imposible. Siempre debe haber presente algún nivel minúsculo de fluctuaciones aleatorias. La granulación cuántica de materia y energía lo requiere. De forma notable, un período de inflación estira estas fluctuaciones básicas de modo que se extienden sobre escalas astronómicas muy grandes, donde al parecer han sido vistas por el satélite COBE²⁷⁴. El próximo año serán sometidas a un escrutinio minucioso por otro satélite (MAP) lanzado en julio de 2001. Si hubo inflación, las señales que reciba deberán tener formas muy concretas. Hasta ahora, los datos tomados por COBE van muy acordes con las predicciones, pero las características realmente decisivas de la señal observable aparecen al comparar diferencias de temperatura en separaciones en el cielo mucho menores que las que COBE puede ver. Se espera que el MAP realice las nuevas observaciones en 2001 y 2002, y cinco años después lo haga la Planck Surveyor Mission de la Agencia Europea del Espacio. Estas serán completadas por observaciones cada vez más precisas de porciones menores del cielo desde la superficie de la Tierra²⁷⁵.

²⁷⁴ G. Smoot y K. Davidson, *Wringles in Time*, Morrow, Nueva York, 1994. [Hay traducción española: *Arrugas en el tiempo*, Plaza y Janés, Barcelona, 1994]. J. C. Mather y J. Boslough, *The Very First Light*, Basic Books, Nueva York, 1996.

²⁷⁵ Los primeros resultados del análisis de los datos enviados por WMAP (la W se añadió al nombre inicial de la misión en homenaje a David Wilkinson, uno de sus promotores, fallecido

En la figura 9.5 podemos ver una predicción típica de un modelo de Universo inflacionario para la forma de la variación de las fluctuaciones con la escala angular, junto con los datos observacionales tomados por Boomerang cerca de la superficie de la Tierra. Las observaciones desde satélites harán las incertidumbres experimentales menores que el grosor de la curva predicha y deberían ofrecer una poderosa e inevitable prueba de los modelos cosmológicos inflacionarios concretos del Universo muy primitivo. Es notable que estas observaciones nos estén proporcionando una sonda experimental directa de sucesos que ocurrieron cuando el Universo tenía solamente unos 10^{-35} segundos.

en septiembre de 2002) se publicaron en febrero de 2003. Estos resultados muestran un espectro de fluctuaciones gaussiano y (aproximadamente) invariante frente a escala que coincide con las predicciones de los modelos inflacionarios más generales. El Universo estaría compuesto de un 4 por 100 de materia bariónica, un 23 por 100 de materia oscura no bariónica y un 73 por 100 de energía oscura. Además, los datos dan una edad para el Universo de $13,7 \pm 0,2 \times 10^9$ años, y un tiempo de $379 + 8 \times 10^3$ años para el instante en que se liberó la radiación cósmica de fondo. Otro resultado importante es que las primeras estrellas se formaron sólo 200 millones de años después del Big Bang, mucho antes de lo que se pensaba hasta ahora. Todavía no se han hecho públicos los resultados del análisis de una segunda serie de datos, pese a que su aparición estaba prevista para la primavera de 2004. (Para más detalles, ver <http://lambda.gsfc.nasa.gov>.) (*N. del t.*)

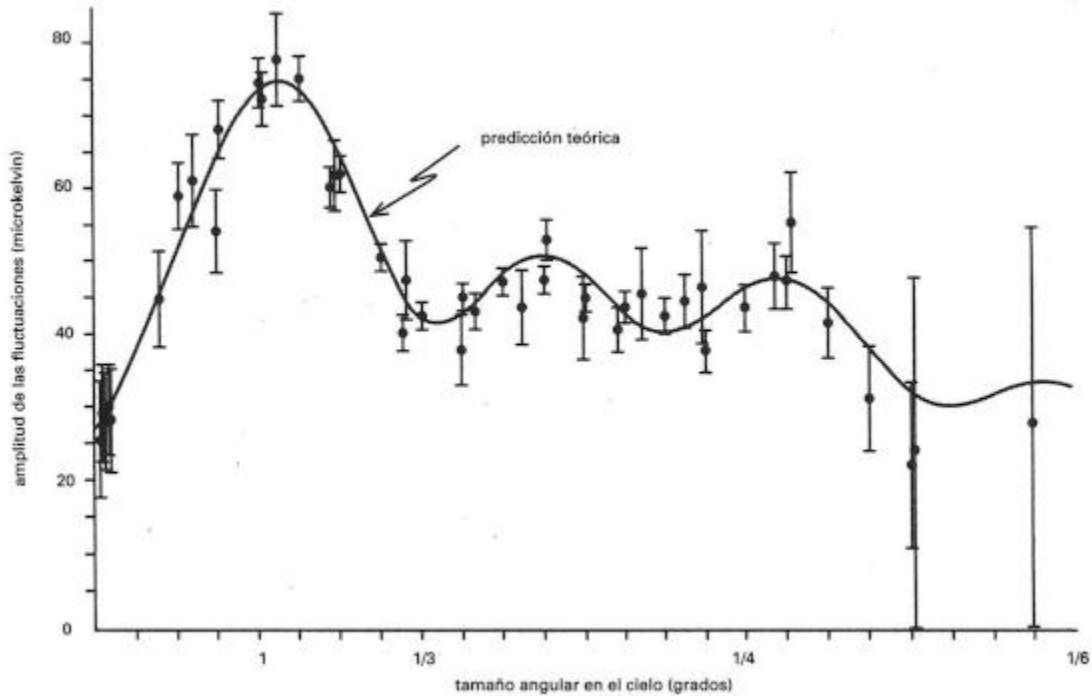


Figura 9.5. Predicción típica de un modelo de Universo inflacionario para la magnitud y variación de las fluctuaciones con separación angular en el cielo, junto con los datos de observación tomados por satélites y globos cerca de la superficie de la Tierra²⁷⁶.

La inflación implica que todo el Universo visible es la imagen expandida de una región suficientemente pequeña para permitir que las señales luminosas la atravesaran en épocas muy tempranas de la historia del Universo. Sin embargo, nuestra parte visible del Universo es sólo la imagen expandida de una región causalmente conectada de aproximadamente 10^{-25} centímetros de diámetro.

Más allá de la frontera de esa pequeña región hay otras muchas (quizá infinitas) regiones semejantes causalmente conectadas, todas las cuales experimentarán cantidades variables de inflación para

²⁷⁶ Preparado para el autor por Rob Crittenden.

producir regiones extendidas de nuestro Universo que están más allá de nuestro horizonte visible actual. Esto nos lleva a esperar que nuestro Universo posea una geografía altamente compleja y es poco probable que las condiciones que podemos ver dentro de nuestro horizonte visible, a unos quince mil millones de años luz, sean condiciones típicas de las que hay mucho más allá de esto. Esta imagen complicada se denomina «inflación caótica²⁷⁷».

Siempre se ha pensado que el Universo podría tener una estructura diferente más allá de nuestro horizonte visible. Sin embargo, antes de la investigación de modelos de Universo inflacionario se consideraba siempre una posibilidad positivista, a menudo sugerida por filósofos pesimistas, pero que no tenía ninguna evidencia positiva a su favor. La situación ha cambiado: los modelos de Universo inflacionario caótico dan la primera razón positiva para esperar que el Universo más allá de nuestro horizonte difiera en estructura de la parte que podemos ver.

Luego, dos científicos rusos emigrados a Estados Unidos, Alex Vilenkin y André Linde, advirtieron que es probable que la situación sea aún más complicada. Si una región se infla, necesariamente crea en su interior las condiciones para que se den más inflaciones a partir de muchas subregiones interiores. Este proceso puede continuar en el futuro infinito con regiones infladas que producen más subregiones que se inflan, que a su vez producen más subregiones que se inflan, y así sucesivamente... *ad infinitum*. El

²⁷⁷ J. D. Barrow y F. J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, Oxford, 1986.

proceso no tiene fin. Se le ha llamado Universo inflacionario «eterno» o «autorreproductor²⁷⁸» (ver figura 9.6).

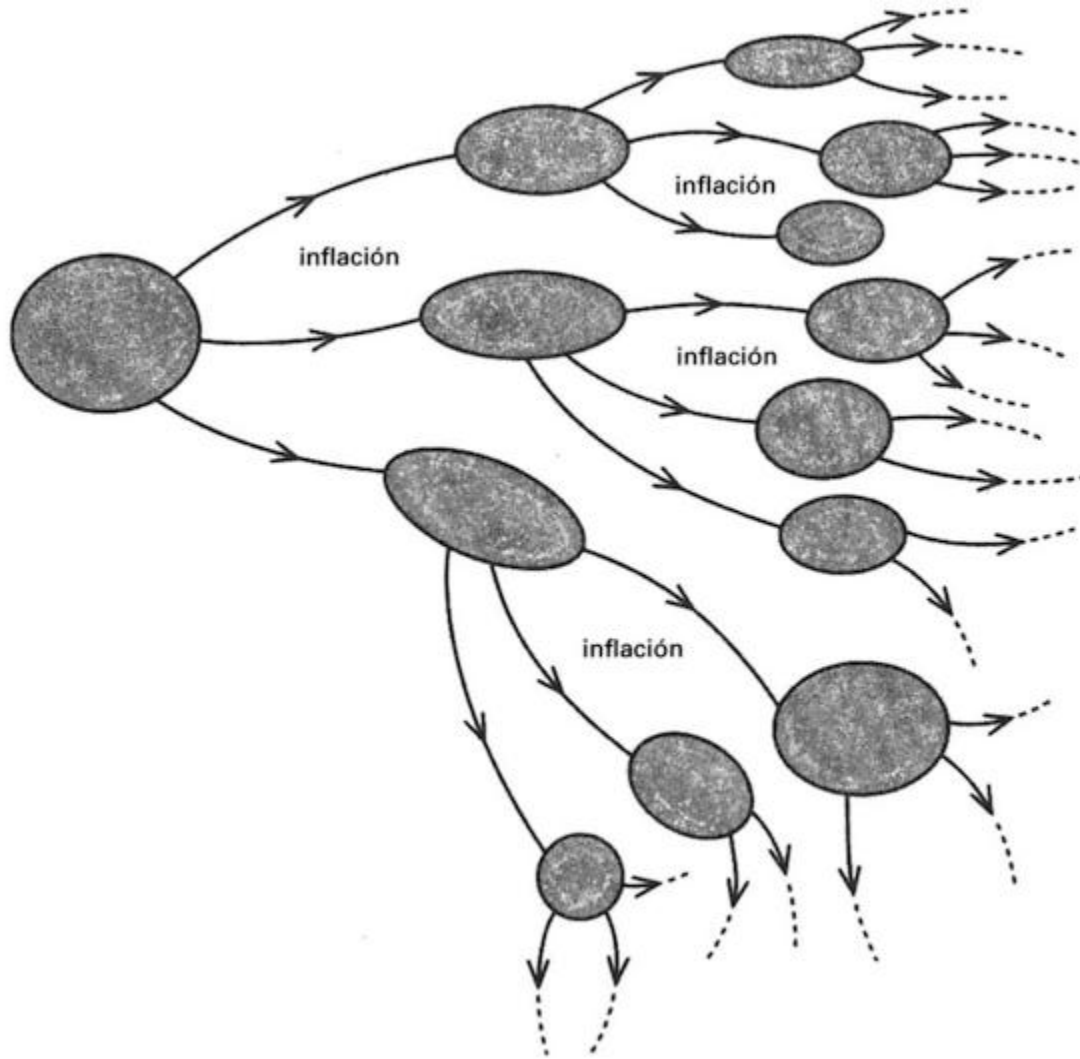


Figura 9.6. Inflación eternamente autorreproductora.

Esta concepción ampliada del modelo inflacionario no se proponía dar una imagen tan elaborada del Universo. El carácter autorreproductor del Universo inflacionario eterno parece ser un

²⁷⁸ A. Linde, «The Self-Reproducing Inflationary Universe», *Sci. American* n.º 5, vol. 32 (1994).

subproducto inevitable de la sensibilidad de la evolución de un Universo frente a pequeñas fluctuaciones cuánticas de la densidad de un lugar a otro cuando es muy joven.

La estructura inflacionaria caótica y eterna del Universo crea un nuevo contexto para la consideración antrópica. En cada una de las burbujas infladas más allá de nuestro horizonte visible y durante todo el pasado y el futuro las cosas habrían resultado muy diferentes. Cada una tendrá niveles diferentes de agregación y estará más cerca o más lejos del estado de expansión crítica. Es como tomar diferentes universos de una muestra casi aleatoria, aunque no son realmente universos sino simples regiones extremadamente grandes mucho mayores que la totalidad de nuestro Universo observable: «mini-universos».

A medida que se ha ido explorando este escenario, se ha encontrado que en cada uno de estos mini-universos burbuja inflados puede haber muchas más cosas diferentes. Pueden terminar con diferente número de dimensiones espaciales o diferentes constantes y fuerzas de la Naturaleza. Unos no podrán sustentar ningún tipo de complejidad viviente, otros, podrán sustentar complejidad viviente de nuestro tipo y otros más podrían soportar vida de un tipo completamente diferente. Así pues, es aquí, dentro de nuestro Universo enorme y posiblemente infinito, donde está la colección de otros mundos a los que debe aplicarse el principio antrópico.

El reto que queda para los cosmólogos es calcular las probabilidades de que emerjan diferentes mini-universos a partir de esta complejidad inflacionaria. ¿Son comunes o son raros los mini-

universos como el nuestro? ¿Tiene el término «probabilidad» un significado inequívoco en esta situación? Y si los universos que sustentan vida son muy raros, ¿qué cabe concluir de ello?

Una vez más, el hecho de que sólo un subconjunto de todas las posibilidades pueda contener observadores es una consideración importante cuando se hace una comparación entre las predicciones teóricas y el mini-Universo observado. Por muy improbables que pudieran ser los mini-universos que sustentan vida, tendríamos que encontrarlos dentro de uno.

Estas consideraciones influyen en la interpretación de cualquier teoría cosmológica cuántica futura. Una teoría semejante, por su Naturaleza cuántica, prediría que es «muy probable» que descubramos que el Universo (o sus fuerzas y constantes) tiene valores concretos. Pese a todo, no está claro que los valores más probables fueran los que observamos. Puesto que sólo una cantidad limitada de los valores permitidos por la constante de estructura fina, por poner un ejemplo, permitirían la existencia de observadores en el Universo, debemos contarnos entre la cantidad limitada de posibilidades que los permiten, por muy improbables que sean. Debemos buscar la probabilidad condicional de observar que las constantes tomen valores en rangos concretos, dado que otras características del Universo, como su edad, satisfacen condiciones necesarias para la vida. La tendencia a la unificación de constantes aparentemente independientes hará las ligaduras antrópicas cada vez más severas. Para poner a prueba tales teorías de todo tendremos que entender todas las formas en que la posible

existencia de observadores está limitada por variaciones de la estructura del Universo, de los valores de las constantes que definen sus propiedades y del número de dimensiones que posee.

§. Historia virtual: una pequeña digresión

Rusia es un país con un pasado impredecible.

YURI AFANASIEV

El pequeño juego mental de «cambiar» las constantes de la Naturaleza a que nos invita el principio antrópico tiene una contrapartida hasta ahora inadvertida en el estudio de la historia. Hay dos aspectos del estudio de la historia que nos sonarán incluso en su versión escolar gracias a los recuerdos infantiles. Primero la necesidad de descubrir los «hechos»: qué sucedió y cuándo. A continuación está la necesidad de entender por qué se produjeron secuencias de acontecimientos: para evitar, sugieren algunos, la repetición de los errores del pasado²⁷⁹. Una respuesta a este doble imperativo de la reconstrucción histórica ha sido la creación de una historia «virtual» o «contrafáctica». Un nombre mejor sería el planteamiento «¿Qué hubiera pasado si?» de los sucesos históricos. La historia virtual²⁸⁰ trata de predecir lo que podría haber sucedido si algunos sucesos centrales no hubieran ocurrido en el pasado o

²⁷⁹ Debo confesar que siempre he estado intrigado por esta justificación para el estudio de la historia. Parece que la mayoría de los problemas importantes en el mundo, desde Irlanda del Norte al Oriente Medio, han surgido porque la gente sabe demasiada historia.

²⁸⁰ N. Ferguson, ed., *Virtual History*, Perseus Books, Nueva York, 1997.

hubieran sido ligeramente alterados. ¿Qué hubiera pasado si en 1914 el coche del Archiduque no hubiese tomado en Sarajevo un camino equivocado? ¿Qué hubiera pasado si Lincoln no hubiera ido al teatro la última tarde de su vida, si los votos de Gore y Bush hubieran sido perfectamente emitidos y exactamente contados, o si Adolf Hitler hubiese sido víctima de un complot?

Esto suena un poco a juego de salón, pero despierta una crítica sorprendentemente fuerte por parte de muchos historiadores debido a que se basa en la hipótesis de un tipo de determinismo histórico que a ellos nos les gusta admitir. Cuando se examina la cuestión resulta sorprendente cuántos puntos de similitud hay entre el debate de la historia virtual y la discusión del impacto antrópico de las constantes variables. Para contemplar las consecuencias de cambiar ligeramente las constantes de la Naturaleza hay que inventar diferentes historias pasadas para el Universo, algunas de las cuales presentan la novedad de que no nos contienen a nosotros ni a cualesquiera otros seres sensibles. Los cosmólogos, aunque carecen de una teoría completa que permita incorporar todos estos cambios de forma coherente, suelen suponer que los acontecimientos estarían gobernados por las mismas leyes de cambio.

Aunque la base de los cambios de las constantes o incluso de las «condiciones iniciales» del Universo es especulativa, el cálculo de las consecuencias puede ser muy directo; algo parecido a ejecutar un programa de ordenador con diferentes valores de partida. Por el contrario, retocar un suceso histórico no requiere ningún cambio de

las leyes de la Naturaleza, mientras que predecir su resultado normalmente es demasiado complicado para que uno tenga fe en los resultados, a menos que se cuente con la convicción de un novelista.

Las secuencias de sucesos históricos son ejemplos clásicos de sistemas complejos. Muestran sensibilidad a cambios pequeños que hacen imposible predecir el futuro con certeza aunque fuéramos capaces de entender lo sucedido en el pasado. Esta asimetría es una característica de cualquier comportamiento caótico, pero la historia es mucho más impredecible que un proceso caótico. Normalmente los procesos caóticos permiten predecir la pauta estadística de sucesos futuros de manera definida. Los sucesos históricos tienen una sensibilidad añadida que los hace impredecibles tanto *en principio* como en la práctica porque involucran a participantes con libre albedrío, o al menos con la ilusión de ello.

El tiempo meteorológico es difícil de predecir porque es caóticamente sensible a las incertidumbres en su estado presente. Pero la predicción del clima no tiene efecto directo sobre él. Quienes hacen predicciones económicas y sociales no tienen tanta suerte. Si un ministro predice públicamente lo que hará la economía, o si un encuestador predice el resultado de unas elecciones, dichas predicciones alterarán el resultado de lo que se está prediciendo de una forma que es lógicamente imposible de incluir en la predicción original²⁸¹. Esto no quiere decir que tales sucesos estén de alguna

²⁸¹ D. Mackay, ver J. D. Barrow, *Impossibility*, Oxford University Press, Londres, 1998 para una discusión más amplia.

manera más allá de la regla de la lógica y sean intrínsecamente impredecibles. Pueden predecirse de forma aproximada, pero dicha aproximación sólo puede estar absolutamente garantizada si las predicciones no son conocidas por los individuos cuyas acciones se predicen. Si llegan a conocerse, esos individuos siempre podrán actuar para falsear las predicciones. Estos sucesos se hacen entonces impredecibles en principio, y no sólo en la práctica.

Las historias virtuales se han convertido en la base de muchas fantasías y películas de Hollywood, como *¡Qué bello es vivir!*, en que se muestra al suicida James Stewart cuánto peor hubieran sido las cosas si nunca hubiera vivido. Resultados alternativos de la segunda guerra mundial son el argumento favorito de novelas históricas virtuales, en especial *The Alteration* de Kingsley Amis²⁸², *SS-GB* de Len Deighton²⁸³ o *Patria* de Robert Harris²⁸⁴. A menudo películas como *Regreso al futuro* han utilizado argumentos de ciencia ficción de viajes en el tiempo o universos paralelos para presentar historias alternativas e incluso ponerlas en conflicto con la nuestra. Los argumentos de ciencia ficción se alimentan de la idea científicamente posible de que todas las historias posibles existen. Cambiar el pasado simplemente traslada al héroe, como el paseante de *El jardín de senderos que se bifurcan* de Jorge Luis

²⁸² K. Amis, *The Alteration*, Penguin, Londres, 1988, que imagina las consecuencias de que nunca se hubiera producido la reforma inglesa.

²⁸³ L. Deighton, *SS-GB*, Jonathan Cape, Londres, 1978, en donde, en febrero de 1941, los británicos se han rendido, Churchill ha sido ejecutado, el rey Jorge VI está prisionero en la Torre de Londres y las SS gobiernan Gran Bretaña desde Whitehall. [Hay traducción española: *SS-GB*, Bruguera, Barcelona, 1981].

²⁸⁴ R. Harris, *Fatherland*, Hutchinson, Londres 1992. [Hay traducción española: *Patria*, Ediciones B, Barcelona, 1993].

Borges²⁸⁵, a una u otra de las muchas trayectorias históricas que se cruzan o se acercan al camino que, de no ser por esto, se hubiera seguido.

El rechazo visceral de las historias virtuales por parte de muchos historiadores es muy interesante. Es ferviente pero no muy convincente. El filósofo Michael Oakeshott afirma que cuando el historiador

considera en una especie de experimento ideal lo que podría haber sucedido tanto como lo que la evidencia le obliga a creer que sucedió [da un paso]... fuera de la corriente del pensamiento histórico... Es posible que si san Pablo hubiese sido capturado y muerto cuando sus amigos le bajaban desde las murallas de Damasco, la religión cristiana nunca hubiera llegado a ser el centro de nuestra civilización. Y por ello se atribuiría a la fuga de san Pablo la difusión de la cristiandad... Pero cuando los sucesos se tratan de esta manera, dejan de ser inmediatamente sucesos históricos. El resultado no es meramente historia mala o dudosa, sino rechazo completo de la historia... La distinción... entre sucesos esenciales y accidentales en modo alguno corresponde al pensamiento histórico; es una monstruosa incursión de la ciencia en el mundo de la historia... El historiador nunca se ve llamado a considerar lo que podría haber sucedido si las circunstancias hubieran sido diferentes²⁸⁶.

²⁸⁵ J. L. Borges, *Labyrinths*, New Directions, Nueva York, 1964, p. 19. [Hay traducción española: *Ficciones*, Alianza, Madrid, 2005].

²⁸⁶ M. Oakeshott, citado en N. Ferguson (ed.), *Virtual History*, Perseus Books, Nueva York, 1997, pp. 6-7.

La «monstruosa incursión de la ciencia» es presumiblemente la del determinismo rígido, pero es un extraño elemento al que oponerse. No hay duda de que la historia fue por supuesto una secuencia determinista de sucesos, aunque la secuencia puede ser de tal complejidad que cualquier esperanza de conectar todas las causas con sus consecuencias está condenada al fracaso. Pero comentaristas como Oakeshott también están preocupados porque las historias virtuales nos tientan a escoger algunos hechos arbitrariamente y hacer central su importancia, mientras que otros se ven como meros «accidentes». Benedetto Croce piensa que la historia contrafáctica es desastrosa²⁸⁷ precisamente por esta razón:

La necesidad histórica tiene que ser afirmada y continuamente reafirmada a fin de excluir de la historia el «condicional», que no tiene allí un lugar legítimo... Lo prohibido es... el «si» anti-histórico e ilógico. Semejante «si» divide arbitrariamente el curso de la historia en hechos necesarios y hechos accidentales... y los segundos son eliminados mentalmente para percibir cómo se habrían desarrollado los primeros bajo sus propias líneas si no hubieran sido perturbados por los segundos. Se trata de un juego que todos nos permitimos en momentos de distracción o de ocio, cuando meditamos sobre el curso que hubiera tomado nuestra vida si no hubiéramos encontrado a una cierta persona... [pero] si siguiéramos hasta el final esta exploración de la realidad, el juego terminaría pronto.

²⁸⁷ Ferguson, *ibid.*, p. 6.

Para estos escritores, todo lo que puede hacer el historiador para mejorar nuestra comprensión de lo que sucedió en el pasado es proporcionar una exposición aún más detallada de los sucesos. Estos críticos lamentan la división de sucesos en significativos e insignificantes, pero sólo por la impresión subjetiva pueden decir cuáles son unos y cuáles otros.

Tampoco hay una buena razón por la que las preguntas contrafácticas no debieran desempeñar un papel al interrogar la reconstrucción acabada de sucesos que finalmente se etiqueta como «historia». Este sesgo es muy evidente en una exposición reveladora de los objetivos de los historiadores que figura en el influyente librito *¿Qué es la historia?* del historiador social y determinista histórico inglés Edward Hallet Carr:

De la multiplicidad de secuencias de causas y efectos [el historiador] extrae aquellos, y sólo aquellos, que son históricamente importantes; y el criterio de importancia histórica es su capacidad para encajarlos en su pauta de explicación e interpretación racional. Otras secuencias de causa y efecto tienen que rechazarse como accidentales, no porque la relación entre causa y efecto sea diferente, sino porque la secuencia misma es irrelevante. El historiador no puede hacer nada con ella; no es susceptible de interpretación racional, y no tiene ningún significado para el pasado ni para el presente.

Sin embargo, pese a esta estridente oposición a la reescritura contrafáctica de la historia, ha habido señalados historiadores propensos a desarrollar historias virtuales.

Gibbon se preguntaba sobre el curso posterior de la historia europea si los sarracenos no hubieran sido derrotados en el siglo VIII. En el año 1907 G. Macaulay Trevelyan escribió un ensayo titulado «Si Napoleón hubiera ganado la batalla de Waterloo» y han habido muchas fantasías similares desde entonces, alimentando una forma de causalidad selectiva bien patente en un ejemplo de Bertrand Russell:

El industrialismo se debe a la ciencia moderna, la ciencia moderna se debe a Galileo, Galileo se debe a la caída de Constantinopla, la caída de Constantinopla se debe a la migración de los turcos, la migración de los turcos se debe a la desecación de Asia central. Por consiguiente, el estudio fundamental en la búsqueda de causas históricas es la hidrografía.

Un periodista contemporáneo, Raymond Burke, actualmente columnista científico de *Scientific American*, presentó durante una temporada en Gran Bretaña una serie de televisión titulada «Connections» («Conexiones») que seguía cadenas causales de sucesos similarmente extrañas.

Se han encontrado usos más serios para la historia contrafáctica. Algunos analistas han intentado predecir la marcha de las economías si ciertas industrias no se hubieran desarrollado o si los

ferrocarriles no hubieran existido, en un intento de descubrir cuánto beneficio sacó la economía global de industrias específicas. Para el físico moderno los argumentos de idealistas como Oakeshott, que niegan la accesibilidad real a la causa y el efecto, y parece que sólo protegen sus temas de estudio del ataque por parte de otros con métodos más rigurosos, parecen muy equivocados. Lo mismo sucede con las ideas de los deterministas recalcitrantes que ven la historia como una marcha inexorable hacia un objetivo inevitable de utopía marxista o capitalista. Entendemos lo suficiente sobre las secuencias complejas de sucesos para apreciar que es común que sus historias sean predecibles en principio pero impredecibles en la práctica debido a su sensibilidad a cambios pequeños, algunos de los cuales pueden haber pasado inadvertidos y no registrados. Así pues, algunos cambios pasados en la historia habrían sido neutros en sus efectos, y otros espectaculares. También hemos aprendido que los sistemas complejos pueden exhibir propiedades estadísticas predecibles, dependiendo de su carácter detallado. También pueden tender a organizarse en «estados» críticos particulares que muestran un máximo grado de sensibilidad a cambios pequeños, y es este estado de cosas lo que permite que persista un equilibrio global. Sorprendentemente, cuando esto ocurre no es posible seguir una cadena de causa y efecto.

Hay un área de la vida en donde está implícita la teoría virtual de la historia. En los tribunales a menudo es importante juzgar si una acción dio como resultado una lesión. Al tratar de establecer o

arrojar dudas razonables sobre la fiabilidad, un abogado necesitará persuadir al jurado argumentando qué hubiera ocurrido si su defendido no hubiera actuado como lo hizo. El fiscal creará una historia alternativa en la que el acusado no actuó como lo hizo y tratará de argumentar que la secuencia de sucesos hubiera dado inevitablemente un resultado sin ningún daño. El defensor podría exponer que hay otra historia virtual en la que la víctima hubiera sufrido el daño incluso si su cliente no hubiera actuado como lo hizo y, por lo tanto, no se le puede echar la culpa. Tales estrategias testimonian una creencia en la importancia de historias virtuales como un modo de poner a prueba la estabilidad de exposiciones concretas de la historia. Por supuesto, identificar las historias alternativas no es una garantía de que aparezca la verdad. A veces causa y efecto están entretreídos de forma muy complicada. He aquí un ejemplo real de la ambigüedad de las causas tristemente famoso²⁸⁸:

Hay una vieja historia sobre un hombre que va a cruzar un desierto. Tiene dos enemigos. Por la noche el primer enemigo se desliza en su campamento y pone estricnina en su cantimplora. Esa misma noche, más tarde, el segundo enemigo, sin saber lo ocurrido, se cuelga en su campamento y practica un minúsculo agujero en su cantimplora. El hombre parte para atravesar el desierto; cuando llega el momento de beber no hay nada en la cantimplora y se muere de sed.

²⁸⁸ S. Blackburn, *Being Good*, Oxford University Press, Londres, 2001, pp. 72-73.

¿Quién le mató? El defensor del primer hombre tiene un férreo argumento: es cierto que mi cliente intentó envenenar al hombre. Pero fracasó, pues la víctima no tomó el veneno. El defensor del segundo hombre tiene un argumento similarmente poderoso: es cierto que mi cliente intentó privar al hombre de agua. Pero fracasó, pues sólo privó a la víctima de estricnina, y no se puede matar a nadie haciendo eso.

Historiadores como Niall Ferguson afirman que las historias virtuales son importantes. Sus críticos responden que hay un número ilimitado de alternativas a considerar, lo que hace inútil la reconstrucción. En respuesta, Ferguson dice que sólo hay que considerar seriamente unos pocos escenarios alternativos: «sólo aquellas alternativas que podamos demostrar sobre la base de la evidencia contemporánea que los contemporáneos consideraron realmente²⁸⁹».

Obviamente, las alternativas razonables tuvieron un papel en el pensamiento del protagonista. Hubieran sido sus hipotéticos futuros. El modo en que se presentaron tuvo que ser un factor importante en la elección de la forma de actuar, y por consiguiente esencial para nuestra exposición si queremos entender perfectamente por qué se hizo esa elección.

Esta excursión por la filosofía de la historia pretende demostrar que está inmersa en un vivo debate curiosamente análogo al que se da dentro de la cosmología sobre la utilidad de formular hipótesis sobre

²⁸⁹ Ferguson, ed., *Virtual History*, Perseus Books, Nueva York, 1997, p. 86.

universos (u otras partes de nuestro Universo) en los que las constantes de la Naturaleza fueran diferentes de las que encontramos aquí y ahora. La historia natural virtual es una parte esencial de la cosmología moderna.

Capítulo 10

Nuevas dimensiones

Supongamos que se visualizan las tres dimensiones del espacio del modo acostumbrado y que se representa la cuarta dimensión mediante un color. Todo objeto físico es susceptible de cambios de color tanto como de posición. Un objeto podría, por ejemplo, ser capaz de recorrer todos los matices del rojo al azul pasando por el violeta. Una interacción física entre los objetos es posible sólo si están próximos unos a otros en el espacio tanto como en el color. Cuerpos de colores diferentes se penetrarán mutuamente sin interferencia... Si encerramos varias moscas en un globo de cristal rojo, todavía pueden escapar: pueden cambiar su color a azul y ser entonces capaces de atravesar el globo rojo.

HANS REICHENBACH²⁹⁰

²⁹⁰ H. Reichenbach, *The Philosophy of Space and Time*, Dover, Nueva York, 1958, pp. 281-282.

§. Vivir en cien dimensiones

Soy matemático hasta el punto de poder seguir integrales triples si las formula lentamente un amigo personal en una gran pizarra.

J. W. MCREYNOLDS²⁹¹

Concierte una cita con alguien en un complejo comercial y tendrá que darle cuatro elementos de información para estar seguro de encontrarse con él en un momento y lugar dados. Debe especificar la hora a la que quiere encontrarle, la planta y dos pasillos que se crucen en esa planta; un elemento de información temporal y tres elementos de información espacial. Con menos quizá no se encuentren nunca; con más, parte de la información será redundante. Estos números muestran lo que significa vivir en un Universo que tiene una dimensión temporal y tres espaciales. Los escritores de ciencia ficción se han ganado la vida especulando sobre dimensiones extra que nos permiten hacer cosas mágicas en nuestro mundo tridimensional saliendo y entrando del mundo visible. En el siglo XIX hubo un famoso vidente que afirmaba tener acceso a otras dimensiones de modo que podía realizar hazañas «imposibles»: deshacer lazos, convertir espirales levóginas en espirales dextróginas, sacar un objeto del interior de una campana de vidrio esférica sin romperla.

²⁹¹ J. W. M. McReynolds, «George's Problem», *Scripta Mathematica* 15, (Junio de 1949).

Para ver cómo entrar en la cuarta dimensión podría ayudarle a realizar estos trucos, piense en el salto de dos a tres dimensiones. Coloque un lazo de cuerda formando una circunferencia alrededor de un terrón de azúcar sobre una mesa plana. No hay forma de sacar el terrón de azúcar del lazo sin tocar la cuerda si debe permanecer en contacto con la superficie bidimensional plana de la mesa. Pero si el terrón de azúcar puede pasar a la tercera dimensión del espacio, no hay ningún problema. Sólo hay que levantarlo y volverlo a posar fuera del círculo de cuerda. Análogamente, si coloca un alambre espiral dextrógiro plano en la mesa, no hay forma de transformarlo en un alambre espiral levógiro sólo desplazándolo por el mundo bidimensional de la superficie de la mesa. Pero si lo levantamos en la tercera dimensión y le damos la vuelta, es posible cambiar la quiralidad de la espiral (ver figura 10.1).

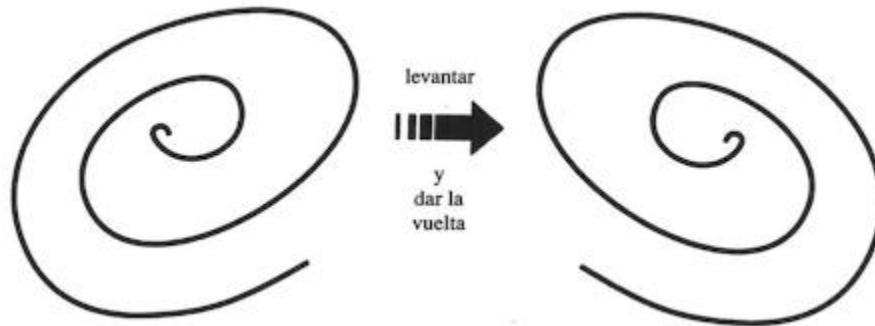


Figura 10.1. Cambio de la quiralidad de una espiral plana rotándola en la tercera dimensión del espacio.

Pese a esta fascinación por los dominios invisibles de la materia y el espíritu, los científicos de los siglos XVIII y XIX tenían pocos motivos para pensar en la dimensionalidad del espacio. Sólo un pensador

profundo parece haber reparado en la profunda conexión que existe entre el número de dimensiones del espacio y las formas de las leyes de la Naturaleza y las constantes que aparecen en ellas.

Durante su carrera inicial en Königsberg, el gran filósofo alemán Immanuel Kant estuvo mucho más interesado en la ciencia que en la filosofía (ver figura 10.2). Era un gran admirador de Newton y de sus leyes de la gravedad y el movimiento y se dedicó a entenderlas y aplicarlas a grandes problemas astronómicos, como el del origen del sistema solar. Mientras Kant sopesaba la importancia de la forma especial de la ley de la gravedad de Newton llegó a plantearse una pregunta que nunca antes había sido formulada²⁹²: «¿Por qué el espacio tiene tres dimensiones?».



²⁹² I. Kant, «Thoughts on the True Estimation of Living Forces», en *Kant's Inaugural Dissertation and Early Writings on Space*, trad. de J. Handyside, University of Chicago Press, Chicago, 1929.

*Figura 10.2. Immanuel Kant (1724-1804)*²⁹³.

Kant había advertido algo muy profundo: que la famosa ley de la inversa del cuadrado para la gravedad que había propuesto Newton²⁹⁴ estaba íntimamente relacionada con el hecho de que el espacio tiene tres dimensiones. Si el espacio tuviera cuatro dimensiones, entonces la gravedad variaría como la inversa del cubo de la distancia; si tuviera cien dimensiones, lo haría como una inversa de la potencia 99 de la distancia. En general, un mundo N -dimensional exhibe una ley de fuerzas para la gravedad²⁹⁵ que disminuye como la $(N-1)$ -ésima potencia de la distancia²⁹⁶. Por la misma razón, las constantes de la Naturaleza que aparecen como constantes de proporcionalidad en dichas leyes tendrán un valor que está determinado en parte por el número de dimensiones del espacio.

Kant utilizó esta observación para «demostrarse» a sí mismo que el espacio debe tener tres dimensiones debido a la existencia de la ley de fuerza gravitatoria de la inversa del cuadrado propuesta por Newton. Sugirió que si Dios hubiera escogido para la gravedad una ley inversa del cubo en lugar de inversa del cuadrado de la

²⁹³ Retrato de Immanuel Kant, © AKG Londres.

²⁹⁴ La fuerza gravitatoria entre dos masas puntuales es proporcional a r^{-2} , donde r es su separación espacial.

²⁹⁵ Esto también es verdadero para las fuerzas eléctricas o magnéticas.

²⁹⁶ Para ver esto, consideremos una masa localizada en un punto. Rodeémosla ahora de una superficie esférica. Las líneas de fuerza que atraen hacia la masa puntual en todas direcciones cortan a todo punto de la superficie esférica. Es el área de esta superficie lo que nos dice que la fuerza obedece a la potencia inversa de la distancia. En el espacio tridimensional la superficie esférica es bidimensional y tiene un área proporcional al cuadrado de su radio. Análogamente, en el espacio N dimensional la esfera tiene un área superficial atravesada por líneas de fuerza que es proporcional a su radio elevado a la $(N - 1)$ -ésima potencia.

distancia, entonces hubiera resultado un Universo de dimensiones diferentes: cuatro. Hoy consideraríamos esto poniendo la conclusión al principio: es la tridimensionalidad del espacio la que explica por qué vemos leyes de fuerza de la inversa del cuadrado en la Naturaleza, y no viceversa.

La intuición de Kant mostraba por primera vez que hay una conexión entre el número de dimensiones del espacio y la forma de las leyes de la Naturaleza y las constantes de la Naturaleza que viven dentro de ellas.

Kant pasó a especular sobre algunos de los aspectos teológicos y geométricos de las dimensiones extra, y vio que sería posible estudiar las propiedades de estos espacios hipotéticos por medios matemáticos.

Una ciencia de todos estos posibles tipos de espacios sería indudablemente la más alta empresa que una inteligencia finita podía emprender en el campo de la geometría... Si es posible que pueda haber regiones con otras dimensiones, es muy probable que Dios las haya creado en alguna parte. Tales espacios superiores no pertenecerían a nuestro mundo, sino que formarían mundos separados²⁹⁷.

Su especulación era correcta. Durante el siglo XIX los matemáticos «descubrieron» otras geometrías que describían líneas y formas sobre superficies curvas²⁹⁸. Fue una suerte que lo hicieran. Ello

²⁹⁷ I. Kant, citado en C. Pickover, *Surfing through Hyperspace*, Oxford University Press, Nueva York, 1999, p. 9.

²⁹⁸ Quizá deberían haber hecho estos descubrimientos mucho antes. Imaginemos que estamos viendo triángulos, líneas y relaciones geométricas en una superficie plana utilizando un espejo curvo. La geometría euclídea quedará distorsionada en la de una superficie curva. Pero seguirá

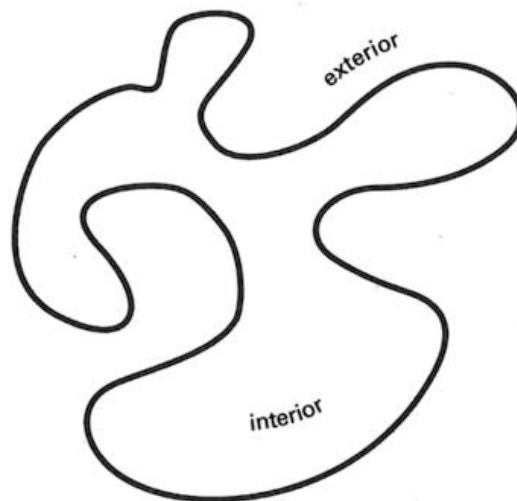
aseguró que Einstein dispusiera de sus matemáticas «puras» al desarrollar su nueva teoría de la gravitación, la teoría de la relatividad general, entre 1905 y 1915.

§. Caminando con planisaurios

Los matemáticos pueden explorar la cuarta dimensión y el mundo de lo que es posible, pero el zar sólo puede gobernar en la tercera dimensión.

VLADIMIR ILICH LENIN²⁹⁹

Las dimensiones son importantes. Existen grandes diferencias entre mundos con dimensiones diferentes.



habiendo una correspondencia uno-a-uno entre las reglas que gobiernan la geometría plana y las del espacio distorsionado, garantizada por las leyes de reflexión de la luz.

²⁹⁹ Criticando el estudio de Mach de las geometrías n-dimensionales.

Figura 10.3. En dos dimensiones una curva cerrada divide el espacio en un interior y un exterior.

Una de las más sencillas es que en dos dimensiones las curvas cerradas dividen el mundo en un interior y un exterior. Este simple resultado interior-exterior es muy importante. Hace la vida bastante difícil para un ser bidimensional con un sistema digestivo tubular. Si un planilandés le dice que su vida se está deshaciendo, tiene que tomarle en serio, como podemos ver en la figura 10.4.



Figura 10.4. Un ser bidimensional con un sistema digestivo está expuesto a romperse.

Pasar de dos a tres dimensiones también hace mucho más interesantes las vidas de los matemáticos. Los caminos pueden serpentear de formas muy complicadas en más de dos dimensiones sin cortarse (ver figura 10.5). Juguemos al Monopoly en

dimensiones más altas, cambiando a otro tablero cuando caemos en las estaciones, o juguemos al ajedrez tridimensional, como el señor Spock, y las opciones aumentan espectacularmente.

De hecho, tres dimensiones es el mínimo número en el que uno puede perderse. Si usted camina al azar en dos dimensiones, dando pasos del mismo tamaño en direcciones aleatoriamente escogidas, como un borracho, regresará con el tiempo a su punto de partida. Pero si camina al azar en tres (o más) dimensiones espaciales, nunca regresará a su punto de partida. Se perderá en el espacio. Hay demasiados giros falsos que pueden ser tomados por el caminante aleatorio.



Figura 10.5. Las trayectorias en más de dos dimensiones pueden retorcerse de formas muy complicadas sin cortarse.

Estos ejemplos sugieren que las cosas siempre se complican cuando pasamos de dos a tres y más dimensiones. Pero no es necesariamente así. A veces las dimensiones extra simplemente

hacen más difícil encajar las cosas. Desde Platón los geómetras han reconocido que algo extraño sucede cuando pasamos de dos a tres dimensiones. Hay un número infinito de polígonos regulares (de lados iguales) en dos dimensiones pero solamente cinco poliedros regulares tridimensionales: los famosos sólidos platónicos (ver figura 10.6). La simetría requerida para crear tales sólidos es muy exigente y muy pocas formas pueden encajar en el espacio tridimensional. Con más de tres dimensiones, las cosas se hacen aún más restrictivas.

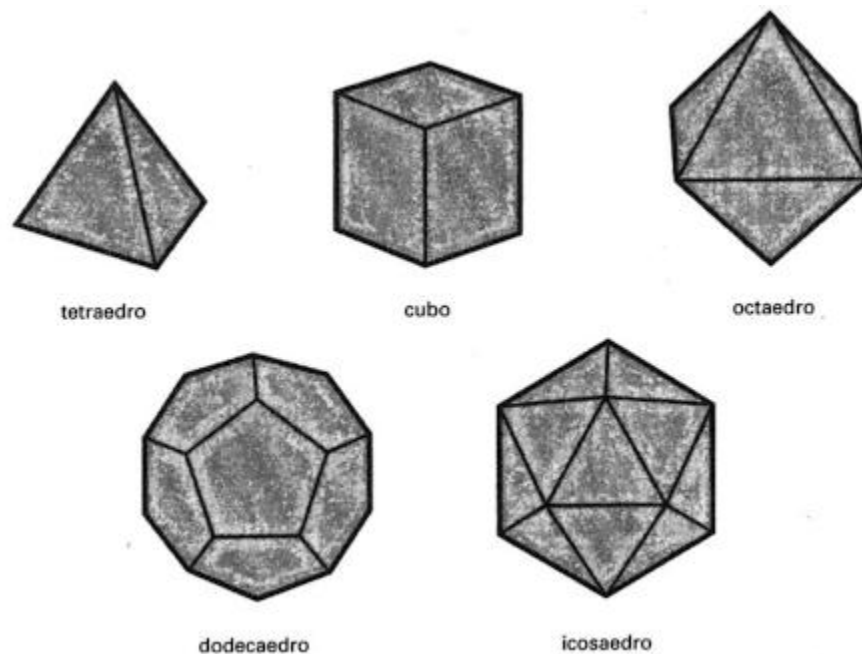


Figura 10.6. Los cinco sólidos platónicos.

Los Victorianos estuvieron extrañamente cautivados por otras dimensiones. Veían las fantasías sobre la vida en menos o más dimensiones como parábolas a través de las que comentar nuestra existencia tridimensional. Aunque a menudo estas fábulas tienen

un interés geométrico, pocas veces era éste su auténtico propósito. ¿Qué mejor manera para un apologeta religioso de combatir el escepticismo sobre el reino espiritual que mostrar cuán ignorantes pueden ser los planilandeses acerca de la tercera dimensión que es tan evidente para nosotros? ¿Qué mejor manera para el ilusionista de «explicar» sus trucos que invocar otra dimensión?

La más famosa de las fábulas fantásticas, *Planilandia: una novela de muchas dimensiones*, fue escrita en 1884 por Edwin Abbott, director de la London City School. Era un comentario social tenuemente velado. Los planilandeses³⁰⁰ y sus sumos sacerdotes persiguen a quien mencione la invisible tercera dimensión. Cuantos más lados tienen las personas, mayor es su rango social. Así, las mujeres son líneas, los nobles son polígonos y los altos sacerdotes son círculos (ver figura 10.7).

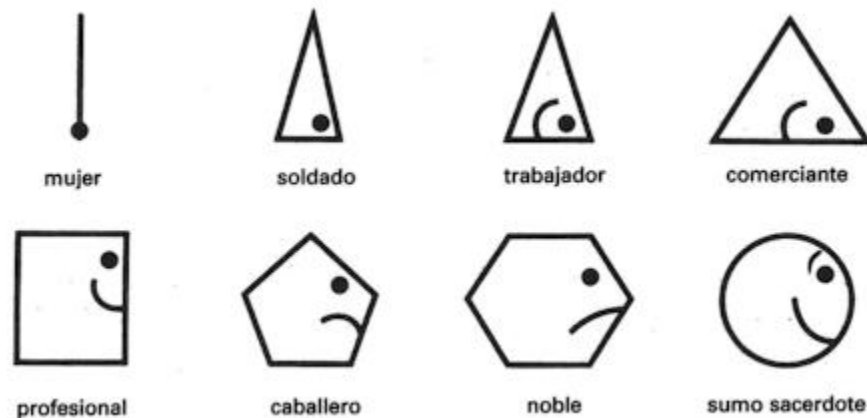


Figura 10.7. Algunos de los planilandeses de Edwin Abbott.

³⁰⁰ El reto de imaginar vida en dos dimensiones vino antes del reto de reflexionar sobre cuatro dimensiones. Gauss imaginó criaturas bidimensionales, que él llamó «gusanos de libro», que vivían en hojas infinitas de papel. Helmholtz (1881) puso los gusanos de libro sobre la superficie de una bola, dándoles así un mundo que era finito en extensión pero sin ninguna frontera.

El héroe es don Cuadrado, que se atiene a la rígida estructura de la sociedad hasta que recibe una visita de lord Esfera, procedente de la tercera dimensión, que le lleva a esa tercera dimensión para ofrecerle una perspectiva más completa de la Naturaleza de la realidad³⁰¹.

No todo el mundo pensaba en menos dimensiones. Tan sólo unos pocos años antes de que apareciera el libro de Abbott, la sociedad de Londres había quedado conmovida por el juicio en 1877 del tristemente famoso médium Henry Slade, quien finalmente fue declarado culpable de fraude. Algunos científicos habían salido en su defensa cuando afirmó estar en contacto con la cuarta dimensión³⁰² y consideraron sus afirmaciones de sacar objetos de ella³⁰³. Lo oculto era una idea de moda en la Inglaterra victoriana. Incluso Arthur Conan Doyle parece haber creído en hadas³⁰⁴. Dudo de que Sherlock Holmes lo hiciera³⁰⁵.

³⁰¹ Esta idea ha sido reformulada por varios autores periódicamente desde entonces, añadiendo cada vez más sofisticación geométrica y topológica; por ejemplo, *Sphereland* (1964) de Dionys Burger, *Planiverse* de Dewdney (Pan, Londres, 1984) y *Flatterland* (2001) de Ian Stewart.

³⁰² En especial Johann Zollner y miembros de la Sociedad Física, que fueron ridiculizados en *El fantasma de Canterville* de Oscar Wilde.

³⁰³ J. C. F. Zollner, «On Space of Four Dimensions», *Quarterly Journal of Science* (serie nueva) 8, p. 227 (1878).

³⁰⁴ B. Stewart y P. Tait, *The Unseen Universe*, Macmillan, Londres, 1884. Fue el fundador de la teoría de nudos y reconoció que nudos en tres dimensiones podrían desanudarse en una cuarta dimensión.

³⁰⁵ Para un interesante ensayo sobre la relación entre Conan Doyle y Holmes, ver Martin Gardner, «The Irrelevance of Conan Doyle», *Beyond Baker Street*, ed. M. Harrison, Bobbs-Merrill, Nueva York, 1976; reimpresso en M. Gardner, *Science: Good, Bad and Bogus*, Prometheus Books, Nueva York, 1981, capítulo 9. [Hay traducción española: *La ciencia: lo bueno, lo malo y lo falso*, Alianza Editorial, Madrid, 1988].

En 1877 se montaron varios experimentos controlados para poner a prueba las afirmaciones de Slade acerca de su capacidad para introducir o sacar objetos de la cuarta dimensión:

- Ensartar dos anillos de madera intactos sin romperlos.
- Transformar una concha de caracol en forma de espiral dextrógira en una levógira.
- Hacer un nudo en un lazo cerrado de cuerda sin cortarlo.
- Desatar una cuerda atada con un nudo dextrógiro, en el interior de un recipiente sellado, y volver a atarla como un nudo levógiro sin romper el sello.
- Vaciar el contenido de una botella sellada sin romperla.

Todas estas pruebas fueron ideadas utilizando propiedades matemáticas de dos o tres dimensiones. La única forma de eliminar el contenido de la botella o de desanudar el nudo es pasar a una dimensión superior. Como puede verse, Slade era una especie de Uri Geller del siglo XIX. Pero, ¡ay!, no logró realizar estas hazañas que desafían a la topología en condiciones controladas y finalmente fue declarado culpable de fraude por los tribunales.

§. Polígonos y poligamia

Me parece que el tema del espacio superior está empezando a tomarse en serio... Parece también que cuando empezamos a sentir la seriedad de cualquier tema

*perdemos parcialmente nuestra
capacidad de tratarlo.*

*CHARLES HINTON*³⁰⁶

El curioso matemático inglés Charles Hinton trabajaba en la oficina de patentes de Estados Unidos en Washington D.C. en la misma época en que Einstein trabajaba en la oficina de patentes suiza. El padre de Charles, James, había sido progresista, cirujano³⁰⁷ y un carismático filósofo religioso que predicaba el amor libre y la poligamia abierta, lo que en la Inglaterra victoriana no era precisamente una receta para prosperar. Pero el joven Charles parecía más interesado en los polígonos que en la poligamia. Después de estudiar en la Rugby School y en Oxford llegó a ser profesor de matemáticas en el Cheltenham Ladies' College y luego en la Uppingham School. El primer ensayo que publicó, «¿Qué es la cuarta dimensión?», apareció en 1880³⁰⁸. Desde entonces su vida fue excitante. Había prestado atención al consejo de su padre, pues en 1885 fue detenido por bigamia. Se había casado con Mary Boole,

³⁰⁶ C. Hinton, *A Picture of Our Universe* (1884), ver *Speculations on the Fourth Dimension: Selected Writings of Charles Hinton*, ed. R. Rucker, Dover, Nueva York, 1980, p. 41.

³⁰⁷ James Hinton tenía incluso ideas médicas poco comunes. Escribió un libro titulado *El misterio del dolor* en el que propone la teoría de que «todo lo que sentimos como doloroso está realmente dando; algo en lo que nuestros colegas son mejor, incluso si no podemos seguirlo». Su hijo Charles trató más tarde de crear una formulación matemática de esta idea utilizando geometría en dimensiones más altas y series infinitas.

³⁰⁸ C. Hinton, *Dublin University Magazine* 1880. Fue reimpreso como un panfleto con el título «What is the Fourth Dimension: Ghosts Explained» por Swann Sonnenschein & Co. en 1884. Mr. Sonnenschein era un devoto de las ideas de Hinton y publicó otros nueve de sus panfletos en los dos años siguientes. Luego fueron reunidos y publicados como una colección en dos volúmenes titulada *Scientific Romances*. Los que presentan dimensiones extra están reimpresos en C. Hinton, *Speculations on the Fourth Dimension: Selected Writings of Charles Hinton*, ed. R. Rucker, Dover, Nueva York, 1980.

viuda de George Boole, uno de los creadores de la lógica y la teoría de conjuntos, pero luego se casó también con Maude Weldon. Preso durante tres días, una vez puesto en libertad se fue a Estados Unidos con Mary, fue contratado como instructor en Princeton e inventó la máquina automática de lanzamiento de bolas de béisbol³⁰⁹. Tras su despido, se trasladó a la Academia Naval durante un tiempo antes de ir a parar a la oficina de patentes de Estados Unidos.

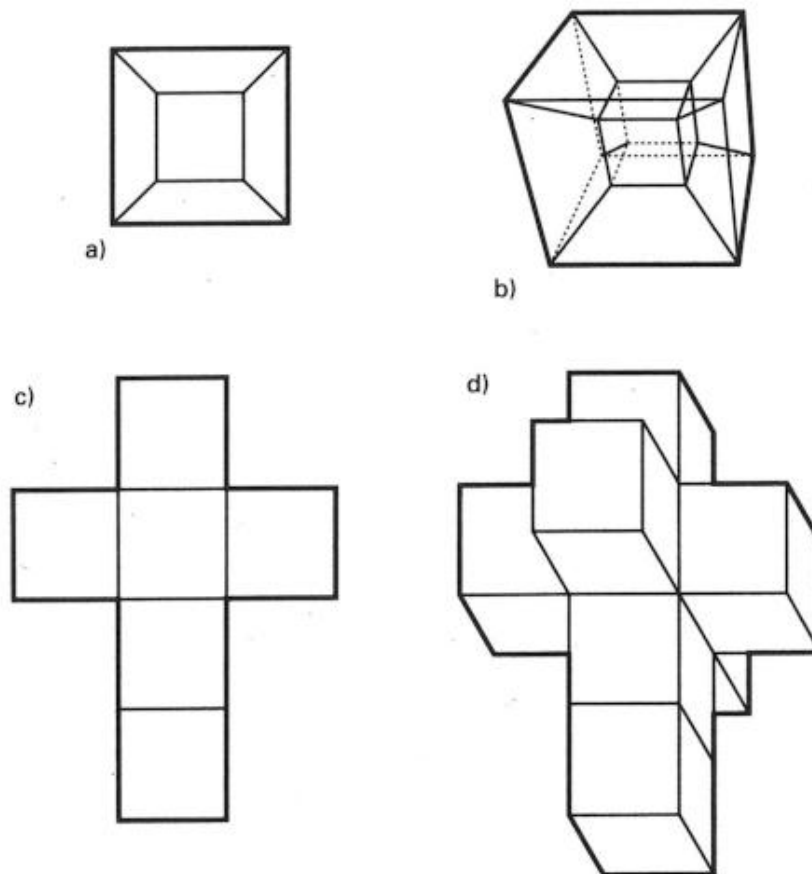


Figura 10.8. (a) Un cubo tridimensional parece bidimensional cuando se ve en proyección, (b) Un cubo tetradimensional parece

³⁰⁹ C. Hinton, «A Mechanical Pitcher», *Harper's Weekly*, 20 de marzo de 1897, pp. 301-302.

tridimensional visto en proyección y puede dibujarse en perspectiva en la página, (c) Un cubo desplegado, (d) Un cubo tetradimensional desplegado.

La memorable contribución de Hinton al estudio de las dimensiones más altas fue la serie de imágenes sencillas que creó para mostrar cómo podríamos obtener una impresión sombreada de la apariencia de los objetos tetradimensionales.

Advirtió que las imágenes que vemos en los libros de objetos tridimensionales reales son siempre bidimensionales —aplanadas en la página—, y por ello deberíamos ser capaces de predecir qué apariencia tendría una imagen tridimensional o bidimensional de un objeto tetradimensional. Esta imagen podría ser su sombra o su proyección. Algunos ejemplos inspirados por Hinton se muestran en la figura 10.8.

Las ideas de Hinton para visualizar la cuarta y más altas dimensiones por extrapolación y analogía tuvieron una enorme influencia, y en 1909 la revista *Scientific American* ofreció un premio de 500 dólares para la mejor explicación popular de la cuarta dimensión. En Europa vemos cómo emerge una fascinación similar con las perspectivas multidimensionales en el mundo del arte. Los cubistas captaron la cuarta dimensión³¹⁰. El *Desnudo descendiendo por una escalera* de Marcel Duchamp superpone imágenes difuminadas de una mujer mientras baja las escaleras, expresando

³¹⁰ A. L. Miller, *Einstein, Picasso: Space, Time and the Beauty that Causes Havoc*, Basic Books, Nueva York, 2001.

visualmente la cuarta dimensión del tiempo. Picasso explota una ambigüedad puramente espacial en su *Retrato de Dora Maar* (ver figura 10.9). Aquí la idea consiste en escapar de la camisa de fuerza tridimensional de una única perspectiva mostrando todos los ángulos al mismo tiempo cuando se considera el rostro del sujeto.



Figura 10.9. *Retrato de Dora Maar*, de Pablo Picasso³¹¹.

§. ¿Por qué la vida es tan fácil para los físicos?

Así fue como vi el péndulo.

La esfera, colgando de un largo cable fijo al techo del coro, oscilaba de un lado a otro con majestad isócrona.

³¹¹ Pablo Picasso, «Retrato de Dora Maar», 1937, (C) Succession Picasso/DACS 2002.

Yo sabía —pero cualquiera podía haberlo sentido en la magia de ese sereno aliento— que el período estaba gobernado por la raíz cuadrada de la longitud del cable y por π , ese número que, por irracional que sea para las mentes sublunares, liga la circunferencia y el diámetro de todos los círculos posibles a través de una racionalidad superior. El tiempo que necesitaba la esfera para oscilar de un extremo a otro estaba determinado por una conspiración arcana entre la más intemporal de las medidas: la singularidad del punto de suspensión, la dualidad de las dimensiones del plano, el comienzo tríadico de π , la secreta Naturaleza cuadrática de la raíz y la innumerada perfección del propio círculo.

UMBERTO ECO³¹²

³¹² U. Eco, *Foucault's Pendulum*, Seeker & Warburg, Londres, 1989, p. 3.

Después de haber utilizado durante un tiempo las ecuaciones y fórmulas de la física matemática, uno se acostumbra a una peculiaridad de la Naturaleza. Es muy comprensiva con nuestra ignorancia de ciertos detalles.

Las leyes de la Naturaleza tienen varios ingredientes: una máquina lógica para predecir el futuro a partir del presente, un lugar para insertar información precisa sobre el presente, constantes especiales de la Naturaleza y un conjunto de simples números. Estos simples números aparecen junto a las constantes de la Naturaleza en casi todas las fórmulas físicas. En el capítulo 3 vimos que Einstein los distinguía para Ilse Rosenthal-Schneider y los llamaba «constantes básicas». Son solamente números. Por ejemplo, el período («tic») de un reloj de péndulo está dado con gran precisión por una sencilla fórmula:

$$\text{Período} = 2\pi\sqrt{L/g}$$

donde L es la longitud del péndulo y g es la aceleración de la gravedad en la superficie de la Tierra.

Nótese la aparición de la «constante básica» $2\pi \approx 6,28$. En todas las fórmulas que utilizamos para describir algún aspecto del mundo físico, aparece un factor numérico de este tipo. Lo más notable es que casi siempre tienen un valor próximo a uno y pueden despreciarse, o aproximarse por 1, si sólo se está interesado en obtener una estimación razonablemente buena del resultado. Este es un premio importante, porque en un problema como la

determinación del período de un péndulo simple nos permite obtener la forma aproximada de la respuesta. El período, que tiene dimensiones de tiempo, sólo puede depender de una manera de la longitud L y la aceleración g si la combinación resultante ha de ser un tiempo: esa combinación es la raíz cuadrada de L/g .

Esta bonita característica del mundo físico, que parece estar bien descrito por leyes matemáticas en las que los factores puramente numéricos que aparecen no son muy diferentes de 1 en magnitud, es uno de los misterios casi desapercibidos de nuestro estudio del mundo físico.

Einstein estaba muy impresionado por la ubicuidad de *pequeños* números adimensionales en las ecuaciones de la física y escribió sobre el misterio de que, aunque casi siempre parece ser así, no podemos exigirlo rigurosamente, pues ¿por qué no debería aparecer un factor numérico como $(12\pi)^3$ en una deducción fisicomatemática? Pero sin duda tales casos son rarezas³¹³.

Y muchos años más tarde, en una de las cartas que escribió a Rosenthal-Schneider sobre las constantes de la Naturaleza, el científico alemán seguía igualmente intrigado por este misterio:

Parece que está en la Naturaleza de las cosas que tales números básicos no difieran del número 1 en orden de magnitud, al menos en tanto que la consideración se limita a formulaciones «simples» o, como puede ser el caso, «naturales»³¹⁴.

³¹³ A. Einstein, *Ann. der Physik* 35, 687 (1911).

³¹⁴ A. Einstein, carta a Ilse Rosenthal-Schneider, 13 de octubre de 1945, traducción inglesa y original alemán en I. Rosenthal-Schneider, *Reality and Scientific Truth: Discussions with Einstein, von Laue, and Planck*, Wayne State University Press, Detroit, 1980, p. 37.

Es posible arrojar alguna luz sobre este problema si reconocemos que casi todos los factores numéricos por los que Einstein estaba tan impresionado tienen un origen geométrico. Por ejemplo, el volumen de un cubo de arista R es R^3 , pero el volumen de una esfera de radio R es $4\pi R^3/3$. Los factores numéricos dan cuenta de la forma detallada cuando las fuerzas de la Naturaleza están actuando. Puesto que las fuerzas fundamentales de la Naturaleza son simétricas y no tienen una preferencia por direcciones diferentes, hay una tendencia a la simetría esférica.

Observaciones como éstas nos permiten ofrecer a Einstein una respuesta posible a su problema.

Sabemos que el perímetro de un círculo de radio R vale $2\pi R$. La superficie de una esfera es $4\pi R^2$. Análogamente, el área de un círculo es πR^2 y el volumen de una esfera es $4\pi R^3/3$. Pensemos ahora en «esferas» en N dimensiones. Los matemáticos pueden calcular fácilmente cuál será la superficie y el volumen de tales esferas. Es evidente que, $A(N)$, el área de la bola N -dimensional de radio R será proporcional a R^{N-1} y su volumen, $V(N)$, proporcional a R^N , pero no es en absoluto obvio cuáles serán las cantidades numéricas como « 4π » o « $4\pi/3$ ». Las fórmulas se muestran en la gráfica de la figura 10.10.

La característica notable de la imagen es que a medida que aumenta la dimensión del espacio, los factores numéricos crecen hasta hacerse enormemente diferentes de 1. No crecen en proporción a N , ni siquiera como 2^N . Crecen como N^N . Así, tenemos una respuesta para Einstein. La ubicuidad de factores numéricos pequeños en las

leyes de la Naturaleza y en las fórmulas de la física es una consecuencia de que el mundo tenga un número muy pequeño de dimensiones espaciales. Si viviéramos en un mundo de veinte dimensiones, entonces las estimaciones sencillas que ignorasen factores numéricos en las fórmulas físicas serían extraordinariamente imprecisas en muchos casos y Einstein estaría preguntando por qué son siempre tan inconvenientemente grandes.

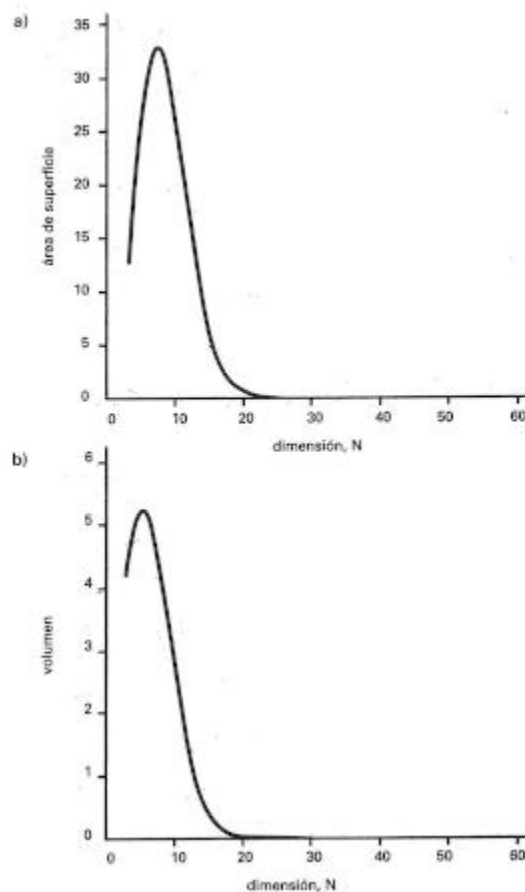


Figura 10.10. Variación del área y el volumen de una bola esférica en N dimensiones con radio igual a una unidad de longitud. El volumen tiene un máximo para N próximo a 5,3 pero luego decrece rápidamente.

A partir de esto vemos que las constantes de la Naturaleza tienen una influencia relativa mucho mayor cuando se trata de determinar los resultados de las leyes de la Naturaleza en tres dimensiones que la que tienen en universos con muchas más dimensiones espaciales.

§. El triste caso de Paul Ehrenfest

Ehrenfest no era solamente el mejor maestro en nuestra profesión que yo haya conocido; también estaba apasionadamente preocupado por el desarrollo y destino de los hombres, especialmente de sus estudiantes. Entender a los demás, ganar su amistad y confianza, ayudar a cualquiera enzarzado en luchas externas o interiores, animar el talento joven; todo esto era su elemento real, casi más que su inmersión en problemas científicos.

ALBERT EINSTEIN

Paul Ehrenfest era un santo Tomás dubitativo; pero era de sí mismo de quien dudaba. Era un físico austriaco de mucho talento que trabajó con muchos de los máximos nombres de la ciencia a principios del siglo XX: Einstein, Heisenberg, Schrödinger, Pauli,

Dirac, todos se beneficiaron de su ayuda. Por encima de todo era un crítico incisivo, capaz de señalar los puntos débiles de cualquier argumento: la conciencia de la física. También era famoso por sus comentarios, como³¹⁵: «¿Por qué tengo tan buenos estudiantes? Porque yo soy muy estúpido». O «¿Usted dice eso por principio o sólo porque resulta que es cierto?».

Ehrenfest hizo importantes contribuciones a la física en varias áreas y los estudiantes de licenciatura que estudian mecánica cuántica llegan invariablemente al «teorema de Ehrenfest». Pero los niveles exigidos por Ehrenfest eran tan elevados que ni él podía estar a la altura. Su infancia había sido infeliz. Su madre murió en 1890, cuando él tenía diez años, y su padre, que había sufrido una mala salud crónica, murió seis años después.

A pesar de la alta estima en que otros lo tenían, y que le llevó a ser invitado a ocupar la cátedra de física en Leiden en 1912, cuando sólo tenía 32 años (figura 10.11), Ehrenfest sufría de baja autoestima. Llegó a estar frustrado por su incapacidad para seguir el rápido ritmo de los desarrollos en física cuántica y su Naturaleza cada vez más matemática. En mayo de 1931 escribió a Niels Bohr diciéndole:

He perdido por completo el contacto con la física teórica. No puedo leer nada más y me siento incompetente para tener siquiera la más modesta idea de lo que tiene sentido entre el diluvio de artículos y libros. Quizá ya no sirva para nada.

³¹⁵ G. E. Uhlenbeck, *American Journal of Physics* 24, p. 431 (1956). Uhlenbeck fue alumno de Ehrenfest.

Su desesperación se ahondó, exacerbada por los graves problemas mentales de su hijo Wassik, con síndrome de Down. Ludwig Boltzmann, que fue supervisor de Ehrenfest, se había suicidado en 1906 desesperado por la falta de reconocimiento de su trabajo.



Figura 10.11. Paul Ehrenfest (1880-1933) con Albert Einstein³¹⁶.

Paul Ehrenfest hizo lo mismo el 25 de septiembre de 1933, pegándose un tiro después de haber disparado a su hijo en la sala

³¹⁶ Acuarela original de Maryke Kammerlingh-Onnes, cortesía AIP Emilio Segrè Visual Archives.

de espera del médico. Su última carta de explicación a sus más íntimos amigos científicos y a sus estudiantes nunca fue enviada³¹⁷. Ehrenfest es parte de nuestra historia porque, en 1917, fue el primero en advertir³¹⁸ cuántos aspectos de las leyes físicas dependían en gran manera del número de dimensiones del espacio. Desarrollando las ideas de Kant acerca de la conexión entre la ley de la inversa del cuadrado de la gravedad y las dimensiones del espacio, Ehrenfest advirtió que sólo era posible tener planetas moviéndose alrededor de una masa central (como el Sol) en órbitas estables si el mundo tenía tres dimensiones. Llevando esto a la escala de los átomos, donde la ley de la inversa del cuadrado de la electricidad y el magnetismo es responsable de la fuerza atractiva entre los núcleos atómicos cargados positivamente y los electrones cargados negativamente que se mueven a su alrededor, Ehrenfest demostró que en mundos con más de tres dimensiones *no podían*

³¹⁷ Su carta dice lo siguiente: «¡Mis queridos amigos: Bohr, Einstein, Franck, Herglotz, Joffé, Kohnstamm y Tolman! Desconozco absolutamente cómo continuar llevando durante los próximos meses la carga de mi vida que se me ha hecho insoportable... Quizá aún pueda emplear mis últimos cartuchos de energía en Rusia, pero si esa posibilidad no se llegara a confirmar muy pronto, es del todo seguro que me suicidaré. Y si eso llegara a suceder alguna vez, entonces me gustaría saber que os he escrito, tranquilamente y sin agobio, a vosotros cuya amistad ha ejercido un papel tan importante en mi vida... En años recientes se me ha hecho cada vez más difícil comprender los desarrollos de la física. Tras intentarlo, cada vez más abatido y roto, al final he caído en la desesperación. Esto me hace sentir totalmente cansado de vivir... Antes me sentía condenado a vivir principalmente por los cuidados económicos de los niños. He intentado hacer otras cosas sin apenas éxito. Por consiguiente, me concentro cada vez más en los detalles exactos del suicidio. No tengo otra posibilidad práctica que el suicidio, y eso después de haber matado a Wassik. Perdonadme... Os deseo lo mejor para vosotros y vuestros seres queridos».

³¹⁸ P. Ehrenfest, «In what way does it become manifest in the fundamental laws of physics that space has three dimensions?», *Proc. Amsterdam Academy* 20, p. 200 (1917) y *Annalen der Physik* 61, p. 440 (1920).

existir átomos estables en absoluto. O bien los electrones caían al núcleo en una trayectoria espiral o bien se dispersaban.

Ehrenfest advirtió también que las ondas tridimensionales tienen propiedades muy especiales. Sólo en tres dimensiones viajan las ondas en el espacio libre sin distorsión o reverberación. Si el número de dimensiones del espacio es *par* (dos, cuatro, seis...), entonces las diferentes partes de una perturbación ondulatoria viajarán a velocidades diferentes. Como resultado, si la emisión ondulatoria es continua habrá reverberación en el receptor: ondas que salen en instantes diferentes llegarán al mismo tiempo. Si el número de dimensiones del espacio es un número impar, todas las perturbaciones viajan a la misma velocidad, pero si no hay *tres* dimensiones la onda se distorsionará cada vez más. Las ondas tridimensionales son especiales.

El imaginativo estudio de Ehrenfest demostraba que la dimensionalidad del mundo tiene un efecto de largo alcance sobre cómo son las cosas. Los mundos tridimensionales son muy inusuales³¹⁹. Imponen propiedades especiales a las leyes y constantes de la Naturaleza.

Pese a todo, Ehrenfest no fue más lejos en 1917 y no extrajo conclusiones filosóficas especiales de sus resultados. No fue el primero en advertir que había algo especial en las órbitas planetarias en mundos tridimensionales. William Paley había explicado ya en 1802 las características únicas en apoyo a la ley

³¹⁹ Los matemáticos también están acostumbrados a esta peculiaridad. Con frecuencia se da el caso de que una conjetura matemática general se decidirá en un sentido u otro en todas las dimensiones del espacio excepto en tres. Aquí normalmente es especialmente difícil de decidir

inversa del cuadrado de la gravedad, y el examen que hizo Wallace en 1905 en *El lugar del hombre en el Universo* había reiterado estas características especiales. Pero estos autores habían escrito antes de que hubiera surgido la teoría cuántica de la materia y Ehrenfest podía hacer un razonamiento mucho más completo y más profundo sobre la singularidad física de los mundos tridimensionales.

§. El caso especial de Gerald Whitrow

El Universo es real, pero uno no puede verlo. Uno tiene que imaginarlo.

ALEXANDER CALDER³²⁰

La conexión antrópica directa entre el número de dimensiones del espacio y la existencia de observadores vivos fue realizada por primera vez por el cosmólogo inglés Gerald Whitrow en 1955. Al plantear la cuestión «¿Por qué observamos que el Universo posee tres dimensiones?» trataba de ofrecer un nuevo tipo de respuesta³²¹ argumentando que sólo podían existir observadores pensantes en mundos tridimensionales. De hecho, sugirió que sería posible deducir la dimensionalidad del mundo a partir del hecho de que nosotros, u otra forma de vida inteligente, existimos: esta propiedad topológica fundamental del mundo... podría inferirse como el único concomitante natural de algunas otras características

³²⁰ K. Kuh, *The Artist's Voice*, Harper & Row, Nueva York, 1962, p. 42.

³²¹ G. J. Whitrow, *Brit. J. Phil. Sci.*, 6, p. 13 (1955).

contingentes asociadas con la evolución de las formas superiores de vida terrestre, en particular del hombre, el formulador del problema. Whitrow desarrolló sus argumentos en un libro de divulgación sobre cosmología publicado cuatro años después³²² e intentó eliminar la posibilidad de un mundo bidimensional favorable para la vida argumentando que los inevitables cruces de conexiones entre células nerviosas en dos dimensiones cortocircuitarían la creación de una red neural compleja.

El enfoque de Whitrow es la primera aplicación de lo que ahora se llamaría el «principio antrópico». Es anterior a su aplicación por Dicke al problema de la G variable y a la hipótesis de los Grandes Números. Utilizando lo que sabemos hoy, podemos ampliarlo un poco más. Y si vamos a considerar qué sería el mundo si sus leyes continuaran siendo las mismas pero el número de dimensiones del espacio fuera diferente, ¿por qué detenernos allí? ¿Por qué no preguntar qué sucedería si el número de dimensiones del tiempo también fuera diferente³²³?

³²² G. J. Whitrow, *The Structure and Evolution of the Universe*, Hutchinson, Londres, 1959.

³²³ Ésta es una pregunta bastante natural de hacer porque si la velocidad de la luz es una constante fundamental de la Naturaleza, la misma para todos los observadores independientemente de dónde estén y cómo se estén moviendo, eso significa que existe una conexión profunda y fundamental entre espacio y tiempo. La teoría de la gravedad y el movimiento de Einstein nos ha mostrado las consecuencias de esta conexión. En consecuencia los físicos hablan ahora de espacio-tiempo 4-dimensional antes que de espacio y tiempo. Esta síntesis fue introducida por primera vez por Hermann Minkowski en una conferencia titulada «Espacio y tiempo» para los científicos reunidos en Colonia el 21 de septiembre de 1908. Empezó con el anuncio: «¡Caballeros! Las ideas de espacio y tiempo que deseo presentar ante ustedes han brotado del suelo de la física experimental, y allí reside su fuerza. Son radicales. En lo sucesivo el espacio por sí mismo, y el tiempo por sí mismo, están condenados a desvanecerse en meras sombras, y sólo un tipo de unión de ambos conservará independencia». Imaginan el espacio-tiempo como un bloque 4-dimensional que puede ser seccionado de muchas maneras posibles, cada una de ellas equivalente a una forma diferente de definir el «tiempo». Esta imagen de bloque espacio-temporal es vieja puesto que aparece de forma

La posibilidad de universos con diferentes dimensiones tanto de espacio como de tiempo ha sido explorada por varios científicos³²⁴. Igual que hicimos cuando consideramos universos con otras dimensiones de espacio y una dimensión de tiempo, podemos suponer que las leyes de la Naturaleza mantienen la misma forma matemática pero permitir que el número de dimensiones del espacio y el tiempo recorran libremente todas las posibilidades. La situación está resumida en la imagen que se muestra³²⁵ en la figura 10.12.

bastante natural desde un punto de vista divino del mundo. Ya en el siglo XIII, santo Tomás de Aquino escribió: «Podemos imaginar que Dios conoce el vuelo del tiempo en su eternidad, como cuando una persona erguida a lo alto de un campanario ve de una sola vez toda la caravana de viajeros». Tomás de Aquino, *Compendium Theologiae*, citado en P. Nahin, *Time Machines*, AIP Press, Nueva York, 1993, p. 103. El término «Universo bloque» fue introducido por el filósofo de Oxford Francis Bradley en su libro *Principles of Logic* (1883), escrito muchos años antes de la introducción de Minkowski de la descripción matemática del espacio-tiempo y la fantasía wellsiana del viaje en el tiempo. Escribe: «Parece que pensamos que estamos en una barca, y llevados corriente abajo por la corriente del tiempo, y que en la orilla hay una hilera de casas con números en la puerta, y salimos de la barca, y golpeamos en la puerta con el número 19, y al volver a entrar en la barca nos encontramos repentinamente frente al 20, y habiendo hecho entonces lo mismo, pasamos a 21. Y, durante este tiempo, la hilera firmemente fija del pasado y futuro se extiende en un bloque detrás de nosotros y ante nosotros». Parece que Einstein también ha mantenido esta visión, en la que el futuro está ya extendido ante nosotros y cualquier diferencia entre el pasado, el presente y el futuro es mera ilusión. Al escribir a la familia de su más viejo e íntimo amigo, Michele Besso, pocas semanas después de la muerte de Besso en 1955, Einstein señalaba la Naturaleza ilusoria del pasado y del futuro, sabiendo que no se recuperaría de su propia enfermedad: «Y ahora él me ha precedido por poco tiempo en despedirse para siempre de este mundo extraño. Esto no significa nada. Para nosotros, físicos convencidos, la distinción entre pasado, presente y futuro es tan sólo una ilusión, por persistente que sea». Véase B. Hoffman, *Albert Einstein: Creator and Rebel*, New American Library, Nueva York, 1972, p. 257. [Hay traducción española: *Einstein*, Salvat, Barcelona, 1982].

³²⁴ Ver J. D. Barrow y F. J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, Oxford, 1986, capítulo 4 y F. Tangerlini, «Atoms in Higher Dimensions», *Nuovo Cimento* 27, p. 636 (1963); J. D. Barrow, «Dimensionality», *Phil. Trans Roy. Soc. A*, 310, p. 337 (1983); I. Freeman, *American Journal of Physics* 37, p. 222 (1969). L. Gurevich y V. Mostepanenko, *Phys. Lett. A* 35, p. 201 (1971); I. Rozental, *Soviet Physics Usp.* p. 296(1981).

³²⁵ De J. D. Barrow, *The Book of Nothing*, Jonathan Cape, Londres, 2000. [Hay traducción española: *El libro de la nada*, Crítica, Barcelona, 1996]. Está basado en un diagrama construido por M. Tegmark, *Annals of Physics* (NY), 270, 1 (1998).

La tabla de chequeo de todas las posibilidades puede reducirse drásticamente mediante la imposición de un pequeño número de requisitos razonables que parece probable que sean necesarios para que exista procesamiento de información, memoria, y por consiguiente vida. Si queremos que el futuro esté determinado por el presente, eliminamos todas las regiones de la tabla marcadas como «impredecible». Si queremos que existan átomos estables junto con órbitas estables de cuerpos (planetas) alrededor de estrellas, tenemos que recortar las franjas marcadas como «inestable». Recortando los mundos en los que hay sólo señalización más rápida que la luz, nos quedamos con nuestro propio mundo de $3 + 1$ dimensiones de espacio más tiempo, junto con mundos muy simples que tienen $2 + 1$, $1 + 1$ y $1 + 2$ dimensiones de espacio más tiempo. Normalmente se piensa que tales mundos son demasiado simples para contener seres vivos. Por ejemplo, en mundos $2 + 1$ no hay fuerzas gravitatorias entre masas y hay una simplicidad impuesta a los diseños que desafía cualquier intento de desarrollar complejidad.

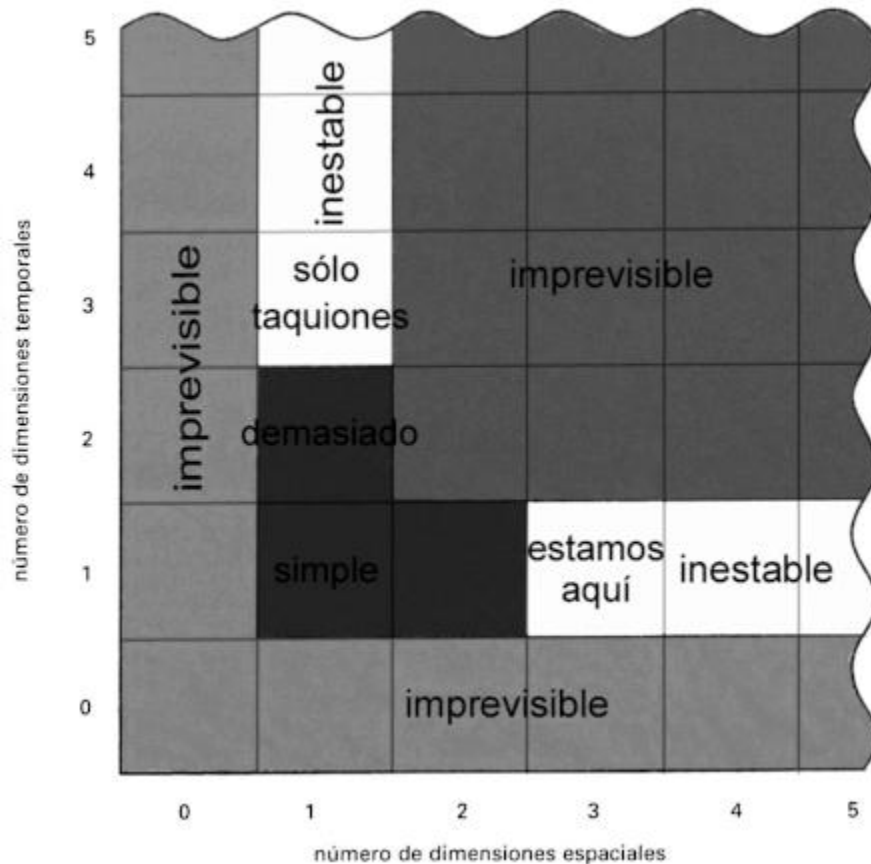


Figura 10.12. Las propiedades de universos con diferente número de dimensiones de espacio y tiempo. Un tiempo y tres dimensiones de espacio parece tener propiedades especiales que son necesarias para que existan estructuras tan complejas como seres vivos.

Independientemente de estas limitaciones, ha habido mucha especulación sobre cómo podrían construirse artefactos que funcionen en mundos bidimensionales³²⁶. Ya hemos mencionado el

³²⁶ John S. Harris (Brigham Young University) plantea una cuestión general interesante sobre máquinas bidimensionales. Señala la notable similitud entre mecanismos planiversales y diseño de cañones esteriversales. De la pistola militar alemana Mauser escribe: «Esta extraordinaria pistola automática no tiene pivotes ni tornillos en sus partes funcionales. Toda su operación se desarrolla deslizando superficies y pasadores bidimensionales. De hecho, el cierre de muchas armas de fuego, especialmente armas del siglo XIX, sigue esencialmente

interés de Whitrow en producir complejidad neural adecuada en un mundo bidimensional. Las redes son extremadamente limitadas porque los caminos no pueden cruzarse sin cortarse³²⁷.

Mundos con más de un tiempo son difíciles de imaginar y parecen ofrecer muchas más posibilidades. Desgraciadamente parecen ofrecer tantas posibilidades que las partículas elementales de materia son mucho menos estables que en mundos con una única dimensión temporal. Los protones pueden desintegrarse fácilmente en neutrones, positrones y neutrinos, y los electrones pueden desintegrarse en neutrones, antiprotones y neutrinos. El efecto global de dimensiones temporales extra es hacer altamente inestables las estructuras complejas a menos que estén congeladas en condiciones de temperatura extremadamente baja³²⁸.

Cuando consideramos mundos con dimensiones de espacio y tiempo distintas de $3 + 1$ topamos con un problema sorprendente. Los mundos con más de una dimensión no permiten predecir el futuro a partir del presente. En este sentido son más bien como mundos sin dimensión temporal. Un sistema organizado complejo, como el necesario para la vida, no podría utilizar la información recogida en su entorno para conformar su comportamiento futuro.

principios planiversales». Citado en A. Dewdney (ed.), *A Symposium on Two-dimensional Science and Technology*, sin publicar, 1981, p. 181.

³²⁷ Se ve una manifestación de esto en matemáticas, donde los sistemas dinámicos sólo empiezan a mostrar comportamiento complejo y caótico cuando sus trayectorias se mueven en tres dimensiones. Sólo entonces pueden retorcerse una alrededor de otras de formas complicadas sin cortarse.

³²⁸ J. Dorling, «The Dimensionality of Time», *Am. J. Phys.*, 38, p. 539 (1969). F. J. Yndurain, «Disappearance of matter due to causality and probability violations in theories with extra timelike dimensions», *Physics Letters B* 256, p. 15(1991).

Seguiría siendo simple: demasiado simple para almacenar información y evolucionar.

Si el número de dimensiones de espacio y tiempo hubiera sido escogido aleatoriamente y todos los números fueran posibles, entonces esperaríamos que el número fuera muy grande. Es muy improbable escoger un número pequeño. Sin embargo, las ligaduras impuestas por la necesidad de tener «observadores» para hablar del problema significa que no todas las posibilidades están disponibles y que se nos impone un espacio tridimensional. Todas las alternativas estarían privadas de vida. Si científicos de otro Universo conociesen nuestras leyes pero no el número de dimensiones en que vivimos, podrían deducir su número simplemente a partir del hecho de nuestra existencia.

En resumen, hemos visto que la aproximación de Whitrow al problema de por qué el espacio tiene tres dimensiones lleva a una estimación de gran alcance de cómo y por qué son peculiares los mundos tridimensionales con una única flecha del tiempo. Las alternativas son demasiado simples, demasiado inestables o demasiado impredecibles para que observadores complejos evolucionen y perduren dentro de ellos. Como resultado, no debería sorprendernos encontrarnos viviendo en tres dimensiones espaciales sujetos a los caprichos de un único tiempo. No hay alternativa.

§. El extraño caso de Theodor Kaluza y Oskar Klein

Los dogmas del pasado apacible son inadecuados para el tormentoso presente. La ocasión está llena de dificultades y debemos superarlos. Puesto que nuestro caso es nuevo, también debemos pensar de nuevo y actuar de nuevo. Debemos desencantarnos.

ABRAHAM LINCOLN

Theodor Kaluza (1885-1954) fue el único hijo de una familia de estudiosos que había vivido durante más de tres siglos en lo que entonces³²⁹ era la ciudad alemana de Ratibor. Su padre, Max, era un reputado estudioso de la lengua y literatura inglesas, pero Theodor manifestó un temprano talento para las matemáticas y se matriculó como estudiante en la Universidad de Königsberg, donde se doctoró en 1910. Hasta aquí, el joven Kaluza parecía estar listo para una carrera como profesor universitario e investigador de éxito. Era un hombre afable con amplios intereses y buen sentido del humor que hablaba y escribía en quince lenguas, pero que evidentemente no estaba muy dotado para las cosas prácticas de la vida. Su hijo nos cuenta algo revelador sobre su forma de enfocar las cuestiones prácticas. Cuando Theodor tenía poco más de veinte años decidió aprender a nadar. Consiguió un libro sobre natación,

³²⁹ Ratibor está ahora en Polonia, rebautizada como Raciborz.

lo leyó cuidadosamente, se lanzó al agua y nadó con éxito en su primer intento. Tal era, afirmaba, el poder del conocimiento teórico. Pero por alguna razón la carrera de Kaluza encalló. En lugar de permanecer, como otros jóvenes científicos de talento, durante sólo dos o tres años en un puesto de ayudante en la universidad, se quedó allí durante veinte años, sin conseguir nunca la promoción a una cátedra.

Durante este largo aprendizaje decidió escribir a Einstein a propósito de sus nuevas ideas referentes a la electricidad, el magnetismo y la gravedad. Esto sucedía en abril de 1919 y Einstein ya era reconocido entre los físicos por su trabajo sobre relatividad, gravedad y física atómica, aunque para el gran público todavía no era un nombre familiar. Kaluza había advertido que añadiendo una dimensión espacial extra al mundo se hacía posible unir la teoría de la gravedad de Einstein con la teoría de la electricidad y el magnetismo de Maxwell de forma muy económica. Einstein se tomó mucho tiempo para responder a la carta de Kaluza pero finalmente respondió con entusiasmo, urgiéndole a preparar el trabajo para su publicación. Einstein añadió su imprimatur comunicando el trabajo al *Journal of the Prussian Academy*³³⁰ en diciembre de 1921.

La idea de Kaluza era ciertamente espectacular. El electromagnetismo, afirmaba, era realmente igual que la gravedad propagándose en una dimensión espacial extra.

³³⁰ T. Kaluza. «Zum Unitätsproblem der Physik», *Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften* 96, p. 69 (1921).

Pero aunque la teoría era matemáticamente muy elegante, tenía que enfrentarse a una difícil pregunta: «Si hay una dimensión extra del espacio ¿por qué no sentimos sus efectos?». Kaluza no abordó esta difícil cuestión en absoluto.

Una respuesta a este enigma fue ofrecida en 1926 por el físico matemático sueco Oskar Klein (1894-1977), uno de los antiguos estudiantes de Kaluza. Klein había desarrollado ideas bastante similares a las de Kaluza, pero las dejó de lado cuando vio que Kaluza se le había adelantado. Había escrito a Niels Bohr que «el origen de la constante de Planck podría buscarse en la periodicidad de la quinta dimensión³³¹» Era sencillo. La dimensión espacial extra es extraordinariamente pequeña y circular (aproximadamente 10^{-30} centímetros de circunferencia) y, por lo tanto, su presencia es imperceptible. La constante de estructura fina de la Naturaleza que vemos en tres dimensiones toma un valor numérico que está controlado por el tamaño de la dimensión extra.

Esta teoría de Kaluza-Klein, como llegó a conocerse, fue de interés durante cierto tiempo, pero luego desapareció hasta la década de 1980, cuando reemergió para convertirse en un foco de interés para los físicos.

La teoría de Kaluza y Klein mostró a los físicos que el mundo podía tener dimensiones espaciales extra sin adolecer de los problemas que Ehrenfest y otros habían demostrado que eran endémicos en mundos con más de tres dimensiones. El truco consistía

³³¹ O. Klein, *Zeit. f. Physik* 37, p. 895 (1926) reimpresso y traducido en O. Klein, *The Oskar Klein Memorial Lectures*, ed. G. Ekspong, World Scientific, Singapur, 1991, p. 103.

simplemente en que la dimensionalidad tenía que ser antidemocrática: podía haber más de tres dimensiones espaciales pero tenían que ser pequeñas e invariables para no alterar el carácter del mundo que experimentamos. Las fuerzas de la Naturaleza no deben propagar democráticamente sus influencias en todas las dimensiones: las dimensiones espaciales extra tenían que ser mucho menores en extensión que las tres que nos son familiares.

En la década de 1980 los físicos empezaron a resucitar las ideas de Kaluza y Klein para ver si añadiendo aún más dimensiones sería posible unir las fuerzas fuerte y débil de la Naturaleza con el electromagnetismo y la gravedad. Si pudiera hacerse que esta idea funcionara, entonces las constantes de la Naturaleza que describían las intensidades de estas fuerzas estarían determinadas por el tamaño de cada una de las dimensiones responsables. Durante un tiempo pareció que esta nueva idea podría funcionar. Se hicieron intentos serios de calcular el valor de la constante de estructura fina en teorías con dimensiones extra³³².

Pero poco a poco empezaron a manifestarse los fallos. Las simples dimensiones extra de Kaluza y Klein no podían imitar todas las complicadas propiedades de las fuerzas fuerte y débil de la Naturaleza ni acomodar las propiedades de las particulares partículas elementales que gobernaban. No obstante, las lecciones aprendidas de esta aproximación fueron importantes y pudieron aplicarse a las nuevas teorías de supercuerdas que reparaban los

³³² P. Candelas y S. Weinberg, *Nucl. Phys. B.* 237, 397 (1984).

defectos de las teorías de Kaluza-Klein, como veremos. Lo más importante era que cuando abrimos nuestra mente a la posibilidad de que el mundo posea más de tres dimensiones espaciales, entonces las verdaderas constantes de la Naturaleza deben vivir en el número total de dimensiones. Las sombras de ellas que vemos en nuestro mundo tridimensional pueden tener un valor muy diferente y, lo más chocante de todo, ni siquiera tienen que ser constantes.

Kaluza consiguió finalmente una cátedra, primero en Kiel en 1929 y luego en Gotinga en 1935, después de que Einstein apoyase por escrito su nombramiento.

En su recomendación llamaba especialmente la atención sobre la novedad de su intento de unir gravedad y electromagnetismo con dimensiones extra.

§. Constantes variables en la brana

Hay dos maneras de difundir la luz: ser la vela o el espejo que la refleja.

EDITH WHARTON³³³

La consecuencia más interesante de añadir dimensiones espaciales extra es que permite que cambien las constantes de la Naturaleza observadas. Si el mundo tiene realmente cuatro dimensiones espaciales, entonces las verdaderas constantes de la Naturaleza

³³³ E. Wharton, *Vesalius in Zante*, citado en C. Pickover, *Surfing through Hyperspace*, Oxford University Press, Nueva York, 1999, p. 118.

existen en cuatro dimensiones. Si nosotros nos movemos sólo en tres de esas dimensiones, veremos o sentiremos sólo «sombras» tridimensionales de las auténticas constantes tetradimensionales. Pero esas sombras no tienen por qué ser constantes. Si la dimensión extra aumenta en tamaño, igual que se están expandiendo nuestras tres dimensiones del Universo, entonces nuestras constantes tridimensionales decrecerán al mismo ritmo. Esto nos dice inmediatamente que si algunas dimensiones extra están cambiando, deben hacerlo de una forma bastante lenta; de lo contrario no las hubiéramos llamado «constantes» en absoluto.

Tomemos una constante tradicional de la Naturaleza, como la constante de estructura fina. Si el tamaño de la dimensión extra³³⁴ del espacio es R , entonces el valor de la «constante» de estructura fina tridimensional, α , variará en proporción a $1/R^2$ cuando cambia R . Imaginemos que estamos en un Universo en expansión de cuatro dimensiones pero sólo podemos movernos en tres de ellas. Las fuerzas de la electricidad y magnetismo pueden «ver» las cuatro dimensiones y encontraremos que nuestra parte tridimensional de ellas se debilitará cuando la cuarta dimensión se haga mayor.

Sabemos que si la constante de estructura fina tridimensional está cambiando no puede hacerlo en ninguna parte tan rápido como se expande el Universo. Esto nos dice que cualquier cuarta dimensión debe ser muy diferente de las otras. La idea de Klein consistía en que es a la vez muy pequeña y estática. Alguna fuerza extra atrapa

³³⁴ Si hay más de una dimensión extra entonces R es el tamaño medio de todas las dimensiones extra.

las dimensiones extra y las mantiene pequeñas. Si no cambian de tamaño de forma significativa no tenemos por qué ver que ninguna de nuestras constantes esté variando hoy. Un escenario posible imagina que el Universo empieza con todas sus dimensiones espaciales comportándose de una manera democrática, pero luego algunas de las dimensiones quedan atrapadas y permanecen estáticas y pequeñas desde entonces, dejando sólo tres para hacerse grandes, expandiéndose hasta convertirse en el Universo astronómico que observamos hoy (ver figura 10.13).

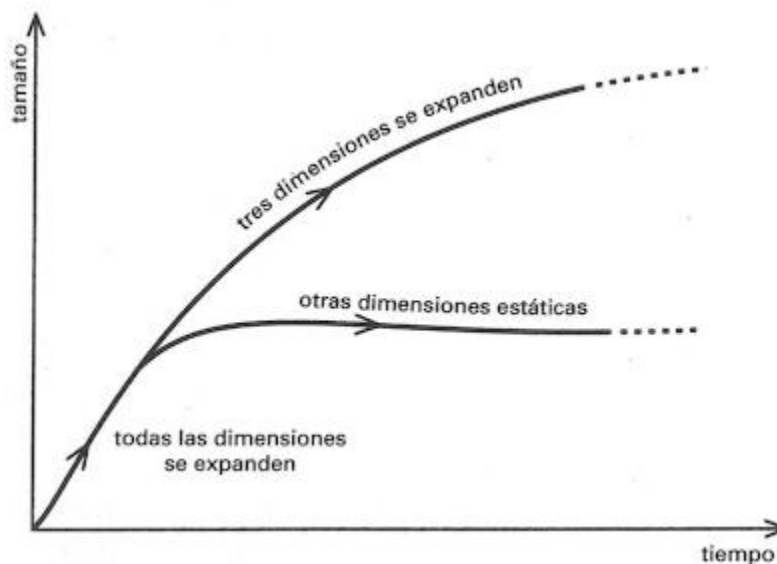


Figura 10.13. Un escenario en que el Universo empieza con más de tres dimensiones espaciales en expansión antes de sufrir un cambio hacia un estado en el que sólo tres siguen expandiéndose mientras las demás quedan atrapadas y estáticas.

En 1982, los teóricos de cuerdas sugirieron por primera vez una respuesta espectacular a un viejo problema: cómo casar la teoría

cuántica de la materia con la teoría de la gravedad de Einstein. Todos los intentos previos habían fracasado miserablemente. Predecían invariablemente que alguna cantidad medida debería ser infinita³³⁵. Estos «infinitos» plagaban todas las teorías con sólo tres dimensiones de espacio y una de tiempo. Pero en 1984 Michael Green y John Schwarz demostraron que este problema podía subsanarse combinando dos ideas radicales. Si se abandona la idea de que las entidades más básicas son puntuales, con tamaño cero, y se permite que haya más de tres dimensiones espaciales, entonces los infinitos desaparecen milagrosamente, cancelándose. Como sucede con las anteriores teorías de Kaluza-Klein, estas dimensiones extra no pueden estar cambiando hoy de forma significativa o veríamos cambios en las «constantes» de la Naturaleza que gobiernan la estructura de nuestro mundo tridimensional. De nuevo, se suponía que están atrapadas por fuerzas desconocidas en una escala muy pequeña, cerca de la escala de longitud fundamental de Planck de 10^{-33} cm.

La simple idea de que sólo tres de las dimensiones del espacio toman parte en la expansión del Universo ilumina los misterios centrales sobre las dimensiones del espacio y el tiempo. Estamos descubriendo que las teorías de cuerdas seleccionan números especiales de dimensiones de espacio y tiempo juntos. No se ha encontrado en dichas teorías ninguna razón por la que sólo una de

³³⁵ Para algunas descripciones sencillas de por qué aparece este problema y por qué se resuelve en teorías de cuerdas ver J. D. Barrow, *Theories of Everything*, Oxford University Press, Oxford, 1991, pp. 22-223, 80-85 y M. Green, «Superstrings», *Scientific American*, September issue (1986), p. 48.

las dimensiones espacio-temporales especificadas en números sea un tiempo; ni por qué tres dimensiones se han hecho grandes. Si las otras están confinadas en una extensión muy pequeña, entonces necesitamos saber si tenían que ser tres dimensiones las que se hicieron grandes o si este número salió al azar y podían haber sido diferentes. Si el número de dimensiones espaciales se escogió al azar por la forma en que se desarrollaron los sucesos cerca del comienzo de la expansión del Universo, entonces podría haber un número diferente de dimensiones grandes en otro lugar del Universo más allá de nuestro horizonte. Una elección aleatoria significaría que este aspecto del mundo no permitía ninguna explicación adicional en el sentido reduccionista normal: sólo en mundos con tres dimensiones de espacio y una de tiempo estaríamos aquí para advertir el hecho.

Recientemente ha surgido otro enfoque del problema de las dimensiones y las constantes. En lugar de que las dimensiones extra estén simplemente atrapadas de modo que no puedan cambiar, permite que sólo la gravedad tenga influencia sobre todas las dimensiones del espacio. Las otras tres fuerzas básicas de la Naturaleza están confinadas a actuar solamente en tres de las dimensiones, en una parte del Universo total en la que habitamos llamada la «mundobrana» (ver figura 10.14), así llamada por ser similar a una membrana multidimensional.



Figura 10.14. Las fuerzas de la Naturaleza que gobiernan la electricidad, el magnetismo, la radiactividad y las reacciones nucleares están confinadas a un «mundobrana» tridimensional, mientras que la gravedad actúa en todas las dimensiones y es consecuentemente más débil.

El alcance multidimensional de la fuerza de la gravedad en las dimensiones superiores del espacio, lo que se llama el «volumen», es responsable de su relativa debilidad (por el famoso factor 10^{40} de Eddington) comparada con las otras fuerzas que extienden sus «líneas» de fuerza a través de tres de las dimensiones. En este momento los mundobranas están sujetos a una intensa investigación de papel y lápiz por físicos de todo el mundo para ver si pueden dejar algún residuo decisivo en el Universo que permitiera una comprobación observacional. En los próximos años estas investigaciones quizá revelen la conexión entre las constantes de la Naturaleza que definen el verdadero espacio de dimensiones

superiores en el que existen y los valores de sus sombras tridimensionales que gobiernan la evolución de la brana tridimensional que constituye todo lo que conocemos del verdadero Universo. Nuestras constantes estarán ligadas a los tamaños relativos de nuestro mundobrana y al volumen no observado del espacio de dimensiones superiores. Quizá estemos en el umbral de algún profundo descubrimiento que coloque a todo nuestro Universo visible en algún lugar del hiperespacio.

Capítulo 11

Variaciones sobre un tema constante

Para un físico del período precámbrico hubiera sido fácil construir un reactor nuclear.

GEORGE A. COWAN³³⁶

§. Un reactor nuclear prehistórico

Lo que veo aterrizar en los campos cercanos no es otra cosa que un avión alemán... Salen dos hombres, muy educados, y me preguntan por dónde se va a Suiza... uno de ellos se me acerca sosteniendo en la mano algo parecido a una roca... y dice: «Esto es por sus molestias; tenga cuidado, es uranio». Entiéndalo, era el final de la guerra... ya no tenían tiempo de hacer la bomba atómica y no necesitaban el uranio.

—Por supuesto que le creo — respondí heroicamente—. Pero ¿era realmente uranio?

³³⁶ G. A. Cowan, *Scientific American*, vol. 235, julio de 1976, p. 41.

—*Absolutamente: cualquiera podría haberlo visto. Tenía un peso increíble, y cuando lo tocabas, estaba caliente. Además, aún lo tengo en casa. Lo guardo en la terraza, en un pequeño cobertizo, un rincón secreto, para que los niños no puedan tocarlo; de vez en cuando se lo muestro a mis amigos, y sigue estando caliente, está caliente incluso ahora.*

*PRIMO LEVI, Uranio*³³⁷

El 2 de junio de 1972 el doctor Bouzigues hizo un descubrimiento preocupante³³⁸, el tipo de descubrimiento que podría tener incalculables implicaciones políticas, científicas e incluso delictivas. Bouzigues trabajaba en la planta de reprocesamiento de combustible nuclear de Pierrelatte, en Francia. Una de sus tareas rutinarias consistía en medir la composición de menas procedentes de minas de uranio próximas al río Oklo, en la antigua colonia francesa ahora conocida como la República Africana Occidental de Gabón, a unos 440 km de la costa atlántica, como se muestra en la

³³⁷ P. Levi, *The Periodic Table*, Abacus, Londres, 1986, pp. 196-197. [Hay edición española: *El sistema periódico*, Alianza Editorial, Madrid, 1999.1 Para tranquilizar la mente del lector, el metal que guardaba el colega de Levi resultó ser cadmio.

³³⁸ R. Bodu, H. Bouzigues, N. Morin y J. P. Pfielman, «Sur l'existence d'anomalies isotopiques rencontrées dans l'uranium d'Oklo», *Comptes Rendus Acad. Sci.*, Paris, Series D 275, 1731 (1972).

figura 11.1. Una y otra vez él comprobaba la fracción del mineral natural que estaba en forma de isótopo de uranio-235 comparada con la fracción en forma de isótopo de uranio-238, para lo que realizaba análisis de muestras de hexafluoruro de uranio gaseoso³³⁹. La diferencia entre los dos isótopos es crucial. El uranio que se da de forma natural y que extraemos del interior de la Tierra está casi todo en forma del isótopo 238³⁴⁰. Esta forma de uranio no producirá una cadena de reacciones nucleares autosostenidas. Si lo hiciera, nuestro planeta habría explotado hace mucho tiempo. Para hacer una bomba o una reacción en cadena productiva es necesario tener trazas del isótopo activo 235 del uranio. En el uranio natural no más de una fracción de un 1 por 100 está en la forma 235, mientras que se requiere aproximadamente un 20 por 100 para iniciar una cadena de reacciones nucleares. El uranio «enriquecido» contiene realmente un 90 por 100 del isótopo 235. Estos números nos dejan conciliar un sueño profundo por la noche con la seguridad de que por debajo de nosotros no se va a iniciar espontáneamente una interminable cadena de reacciones nucleares que convierta la Tierra en una bomba gigantesca. Pero ¿quién sabe si en algún lugar habrá más 235 que la media?

³³⁹ Este análisis se realizó mediante espectrometría de masas. Las moléculas de hexafluoruro de uranio son ionizadas y aceleradas antes de ser desviadas cuando atraviesan un campo magnético. La masa de la molécula se manifiesta por la magnitud de la desviación. La precisión de esta técnica es muy alta. Era estándar que la abundancia «normal» natural de uranio fuera proscrita por $0,7202 \pm 0,0006$ por 100 de uranio-235, mientras que las muestras analizadas procedentes de Oklo mostraron un $0,7171 \pm 0,0007$ por 100.

³⁴⁰ Los isótopos son formas del mismo elemento en las que el núcleo contiene el mismo número de protones pero un número diferente de neutrones. El ejemplo más simple es el del hidrógeno, cuyo núcleo contiene sólo un protón y ningún neutrón. El deuterio, el isótopo más pequeño del hidrógeno, contiene un neutrón y un protón.

Bouzigues midió con gran precisión la razón de isótopo 235 frente al 238. Eran comprobaciones importantes de la calidad de los materiales que en última instancia se utilizarían en la industria nuclear francesa. El suyo era un trabajo rutinario, pero ese día de junio de 1972 su atención a los detalles se vio recompensada. Advirtió que algunas muestras presentaban una razón 235 a 238 de 0,717 por 100 en lugar del valor normal de 0,720 por 100 que se encuentra normalmente en todas las muestras terrestres, e incluso en meteoritos y rocas lunares.



Figura 11.1. Localización de Oklo en África occidental.

Tan exactamente se conocía el valor «normal» a partir del experimento³⁴¹, y tan exactamente estaba reflejado en todas las muestras tomadas, que esta pequeña discrepancia hizo sonar los timbres de alarma.

¿Dónde estaba el 0,003 por 100 que faltaba de uranio 235? Era como si el uranio ya hubiese sido utilizado para alimentar un reactor nuclear de modo que la abundancia de 235 se había reducido antes de haber sido extraído de las minas.

La Comisión de Energía Atómica de Francia consideró todo tipo de posibilidades. ¿Quizá las muestras habían sido contaminadas por algún combustible ya utilizado procedente de la planta de procesamiento? Pero no había ninguna prueba de la intensa radiactividad que habría acompañado al combustible usado, y ningún hexafluoruro de uranio reducido faltaba en el inventario de la planta. Incluso se sugirió alguna forma de robo de material por parte de terroristas o un depósito de origen extraterrestre. Pero a poco las investigaciones descubrieron que la fuente de la discrepancia estaba en los propios depósitos naturales de uranio. Había una baja razón 235 a 238 en las vetas de la mina. Los investigadores consideraron cada paso del transporte y procesamiento del mineral de uranio, desde la extracción de la mena original y la molidura local en Gabón, hasta el procesamiento en Francia antes de que llegara a la planta de enriquecimiento de Pierrelatte. No se descubrió nada extraño. El uranio procedente de la mina de Oklo era simplemente distinto del que se encontraba en

³⁴¹ El valor estándar es $0,007202 \pm 0,00006$.

cualquier otro lugar. De hecho, todas las muestras que se habían guardado procedentes de todos los embarques despachados a Francia desde que empezó la excavación de la mina en 1970 mostraban una ligera disminución de uranio-235. De las 200 toneladas de uranio ya extraídas, la masa total que faltaba de uranio-235 equivalía a 200 kilogramos.

Cuando se investigó con detalle el emplazamiento de la mina pronto quedó claro que el uranio 235 que faltaba había sido destruido dentro de las vetas de la mina. Una posibilidad era que algunas reacciones químicas lo hubiesen eliminado mientras dejaban intacto el 238. Por desgracia, las abundancias relativas de uranio 235 y 238 no se ven afectadas de forma diferente por procesos químicos que hayan ocurrido en el interior de la Tierra. Tales procesos pueden hacer que algunas partes de la Tierra sean ricas en mineral de uranio a expensas de otras partes al disolverlo y transportarlo, pero no alteran el balance de los dos isótopos que constituyen el mineral disuelto o en suspensión. Sólo las reacciones y desintegraciones nucleares pueden hacerlo (ver figura 11.2).

Poco a poco, la insospechada verdad salió a la luz ante los investigadores. Las vetas bajas en uranio-235 contenían la pauta característica de otros 30 o más elementos atómicos que se forman como subproductos de las reacciones de fisión nuclear. Sus abundancias eran completamente diferentes de las que se dan de forma natural en rocas donde no hubieran ocurrido reacciones de fisión. La reveladora firma de los productos de fisión nuclear se conoce a partir de los experimentos en reactores construidos por el

hombre. Seis de estas vetas características de la actividad de un reactor nuclear natural fueron finalmente identificadas en Oklo. Algunos de los elementos presentes, como el neodimio, tienen muchos isótopos pero no todos son productos de fisión. Los que no son productos de fisión proporcionan por consiguiente una calibración de la abundancia de todos los isótopos antes de que empezaran las reacciones naturales, y de este modo nos permiten determinar los efectos y tiempos característicos de dichas reacciones³⁴².

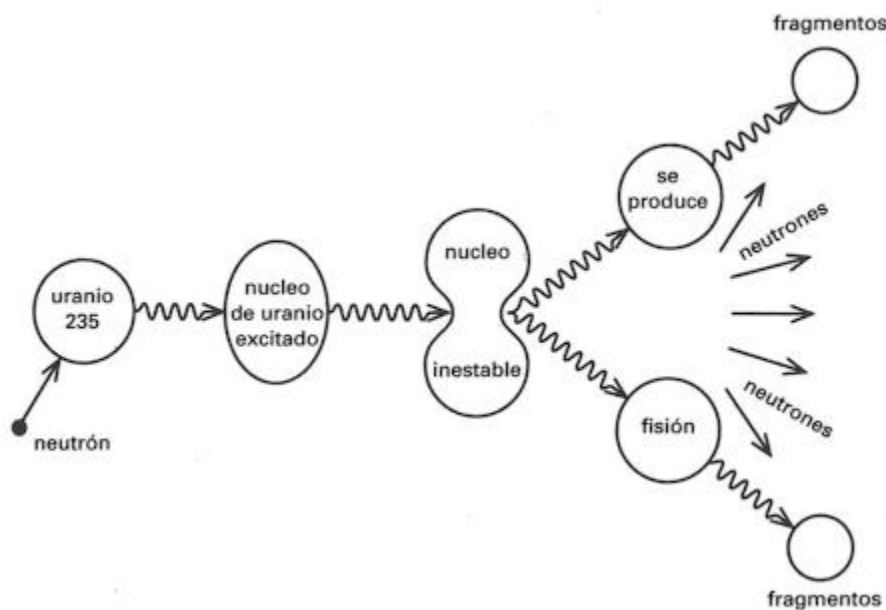


Figura 11.2. Fisión de un núcleo de uranio-235.

³⁴² Se encuentran siete isótopos del neodimio. Uno de éstos, el neodimio-142, no es un producto de fisión y puede utilizarse para determinar las abundancias de los componentes de neodimio natural en el emplazamiento de Oklo antes de que fueran afectados por la actuación del reactor.

Sorprendentemente, parecía que la Naturaleza había conspirado para producir un reactor nuclear natural que había generado reacciones nucleares espontáneas bajo la superficie de la Tierra hace dos mil millones de años³⁴³. Fue este episodio en la historia geológica de Gabón lo que había llevado a la acumulación de productos de fisión en el emplazamiento actual de la mina. Como resultado de estos sensacionales descubrimientos, la extracción fue interrumpida durante un tiempo en 1972 mientras se realizaba un examen geoquímico detallado. Finalmente, se encontraron quince emplazamientos de antiguos reactores fosilizados, 14 de ellos en Oklo y otro a unos 35 km al sur, en Bangombe.

En 1956, un físico japonés llamado Paul Kuroda, que trabajaba en la Universidad de Arkansas, había predicho que precisamente esto podría suceder en la Naturaleza³⁴⁴. Kuroda consideró casi todos los requisitos clave: las concentraciones de uranio necesarias para las reacciones nucleares, el momento del pasado en que podría haber sucedido y la razón entre uranio-235 y uranio-238³⁴⁵. Si bien no

³⁴³ M. Neuilly, J. Bussac, C. Frejacques, G. Nief, G. Yendryes y J. Yvon, «Sur l'existence dans un passé reculé d'une réaction en chaîne naturelle de fissions, dans le gisement d'uranium d'Oklo (Gabon)». *Comptes Rendus Acad. Sri.*, París, series D 275, 1847 (1972).

³⁴⁴ P. K. Kuroda, «On the Nuclear Stability of Uranium Minerals», *J. Chem. Phys.* 25, pp. 81-82 (1956), y «On the Infinite Multiplication Constant and Age of U Minerals», *J. Chem. Phys.* 25, pp. 1295-1296 (1956).

³⁴⁵ George Cowan informa de que una predicción menos detallada fue hecha en 1953 por George Wetherill de UCLA y Mark Inghram de la Universidad de Chicago. Estudiaron un depósito de pechblenda (una forma de óxido de uranio pobre en torio, la uraninita que cristaliza en una solución coloidal) y escribieron: «[Nuestro] cálculo muestra que el 10 por 100 de los neutrones producidos son absorbidos para producir fisión. Así pues, el depósito está a un 25 por 100 del camino para convertirse en una pila [reactor nuclear]. También es interesante extrapolar dos mil millones de años atrás, cuando la abundancia de uranio-235 era del 3 por 100 en lugar de 0,7. Ciertamente un depósito semejante estaría cerca de ser una pila operativa». Citado en *Sci. American*, vol. 235, julio 1976, pp. 40-41. El artículo original es G. W.

pudo imaginar ningún lugar en dónde pudiesen darse a la vez todas estas condiciones especiales. Pero Kuroda pasó por alto una interesante posibilidad que la geología de Oklo había creado por sí misma.

Las primeras reacciones nucleares producidas por el hombre se produjeron el 2 de diciembre de 1942 como parte del famoso Proyecto Mahattan que culminó con la fabricación de las primeras bombas atómicas. Rompían núcleos pesados dando núcleos más ligeros, liberando energía y neutrones que se movían a gran velocidad y seguían rompiendo más núcleos pesados y liberando todavía más energía y neutrones. Los reactores hechos por el hombre se controlan introduciendo un «moderador», como grafito o agua, que absorbe neutrones y frena la reacción. Los neutrones se emiten a altas velocidades y en ese estado son fácilmente absorbidos por núcleos de uranio-238. Hay que frenarlos apreciablemente para que tengan una alta probabilidad de ser absorbidos por otros núcleos de uranio-235 y sostener así la cadena de reacciones de fisión. Se puede introducir barras de grafito en la región de interacción y retirarlas cuando sea necesario, para moderar las reacciones. Sin este efecto moderador las reacciones nucleares serían como una bola de nieve fuera de control una vez que hubieran alcanzado un nivel crítico. Entonces, ¿qué moderó los sucesos en Oklo?

Wetherill y M. G. Inghram, «Proc. Conf. Nucl. Processes Geol. Settings», pp. 30-32, Nat. Research Council, Washington DC (1953).

Los investigadores encontraron la prueba inequívoca característica de los productos de fisión en Oklo, que mostraba que habían tenido lugar reacciones nucleares en cadena. Aunque hoy la abundancia natural de uranio-235 es sólo de aproximadamente un 0,7 por 100 con relación al uranio-238, la razón entre los dos isótopos no ha sido constante a lo largo de la historia de la Tierra. Ambos se desintegran lentamente pero a velocidades diferentes. La semivida del 235 es aproximadamente de setecientos millones de años, mientras que la del 238 es de unos cuatro mil quinientos millones de años. La desintegración más rápida del 235 significa que había más 235 con relación a 238 en el pasado que hoy. Cuando se formó la Tierra, hace aproximadamente cuatro mil quinientos millones de años, el uranio natural contenía aproximadamente un 17 por 100 de uranio-235. Hace unos dos mil quinientos millones de años, cuando la Tierra tenía unos dos mil millones de años, la razón 235:238 habría caído hasta aproximadamente un 3 por 100, lo justo para empezar una reacción en cadena que pudiera ser moderada por agua.

Los depósitos de uranio de Oklo fueron descubiertos en la década de 1960 y tienen varios kilómetros de largo y unos 700 metros de ancho. Proviene del uranio originalmente depositado en la corteza terrestre durante la formación de la Tierra. La abundancia original era muy pequeña, de promedio sólo unas pocas partes por millón de la constitución de la Tierra. Su fuente, como la de los demás elementos pesados de la Tierra, está en las estrellas. El uranio se formó en las estrellas y fue eyectado al espacio antes de

condensarse en pequeñas rocas que se agregaron en planetas sólidos durante la historia temprana del sistema solar. Siguiendo la intensa actividad geológica asociada a la era posterior a la formación de la Tierra, los reactores naturales de Oklo se hicieron posibles por la deposición accidental de vetas ricas en uranio dentro de una capa de piedra arenisca situada sobre placas de granito. Durante millones de años se depositó sobre casi un kilómetro de sedimento arenoso. Las capas de granito están inclinadas unos 45 grados, lo que produjo una acumulación de agua de lluvia y óxido de uranio soluble profundamente enterrada en el fondo de la pendiente (ver figura 11.3).

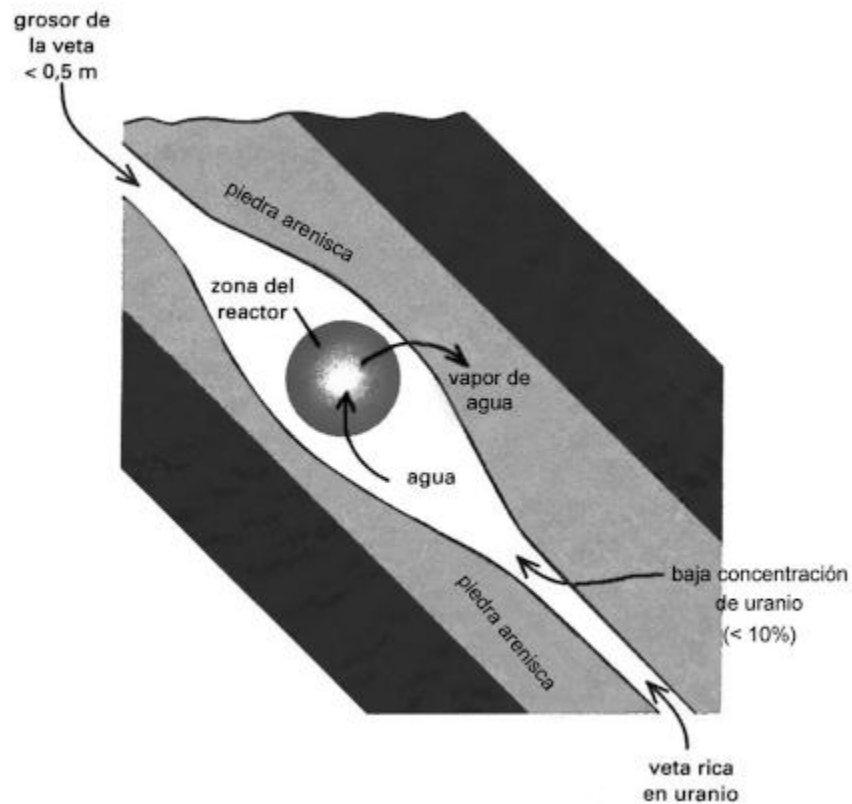


Figura 11.3. La geología del reactor de Oklo presenta capas de granito con una inclinación de unos 45 grados. Esto dio lugar a una acumulación en el subsuelo profundo de agua de lluvia y óxido de uranio soluble.

El ambiente oxidante necesario que aportase el agua requerida para concentrar el uranio fue originado por un importante cambio de la biosfera de la Tierra. Hace unos dos mil millones de años ocurrió un cambio en la atmósfera, producido por el crecimiento de algas azul verdosas, los primeros organismos capaces de producir fotosíntesis. Su actividad incrementó el contenido de oxígeno del agua y permitió que se le incorporase algo del uranio en óxidos solubles. En Oklo, los depósitos de uranio quedaron enterrados a profundidad suficiente para impedir que fueran redisueltos y dispersados durante los casi dos mil millones de años de historia posterior. Sólo durante los últimos dos millones de años parte del depósito mineral se acercó a la superficie, donde los buscadores de mineral lo encontraron y lo extrajeron.

No son sólo éstas las circunstancias especiales necesarias para un reactor nuclear. La capa de mineral de uranio concentrado tiene que ser suficientemente gruesa para impedir que escapen los neutrones creados por las primeras reacciones nucleares y además ha de estar libre de contaminación que absorba los neutrones e interrumpa las reacciones en cadena.

Una vez que el uranio soluble alcanzó una concentración de más de aproximadamente un 10 por 100 hace dos mil millones de años, las

reacciones nucleares no sólo pudieron comenzar, sino que continuaron de un modo autorregulado estable. Las vetas tenían que ser al menos de medio metro de grosor para que los neutrones no escapasen y las reacciones muriesen. Conforme las reacciones se aceleraban, la temperatura aumentaba, convirtiendo el agua en vapor y frenando los neutrones que chocaban con las moléculas de agua. Este frenado reducía la temperatura, haciendo que el vapor se condensase de nuevo en agua líquida y disminuyese el número de neutrones absorbidos. Como resultado las reacciones se aceleraban. Este ciclo de actividad marcha-parada parece haberse repetido intermitentemente durante casi un millón de años, con episodios de reacción en cadena de duración variable, entre unos pocos años y miles de años, antes de que el reactor se apagase finalmente³⁴⁶. En seis lugares dentro de la capa de uranio de Oklo se había fisionado aproximadamente una tonelada de uranio-235,³⁴⁷ produciendo una energía un millón de veces mayor que la que se habría producido por el proceso de desintegración radiactiva natural en uranio-238. En cada uno de los lugares quedaba la pauta característica de

³⁴⁶ El tiempo de hace $1,84 \pm 0,07$ miles de millones de años para el inicio de la criticalidad (obtenido utilizando datación uranio-plomo) está determinado de forma precisa por el requisito de que en un pasado bastante anterior la abundancia de uranio-235 debe ser suficientemente grande pero no tan temprano que no hubiera presente ningún agua líquida para producir la solución rica en óxido de uranio concentrado. El período de vida operativa del reactor fue de $2,29 \pm 0,7 \times 10^5$ años, ver Y. V. Petrov, «The Oklo Natural Nuclear Reactor», *Sov. Phys. Usp.* 20, p. 937 (1977) y J. M. Irvine, R. Naudet, «The Oklo Natural Reactors: 1800 Million Years Ago», *Interdisciplinary Science Reviews* 1, p. 72 (1976).

³⁴⁷ Una reconstrucción detallada de los sucesos mostró que hace aproximadamente mil ochocientos millones de años el peculiar paisaje geológico de esta parte de Gabón facilitó la creación de reacciones en cadena auto-sostenidas en seis reactores nucleares naturales. La potencia media total resultante durante los doscientos mil años de actividad del reactor es bastante débil, aproximadamente 25 kilovatios.

productos de fisión para contar la historia³⁴⁸. Esto ya es de por sí bastante notable, pero las ideas que siguieron han hecho de los reactores de Oklo una piedra de toque importante para nuestra comprensión de las constantes de la Naturaleza.

§. La intuición de Alexander Shlyakhter

Para mí la radiactividad es una enfermedad real de la materia. Además es una enfermedad contagiosa. Se difunde. Uno pone estos átomos degradados y deshechos cerca de otros y éstos también caen inmediatamente en la trampa de ponerse a sí mismos fuera de una existencia coherente. Supone para la materia exactamente lo mismo que lo que la desintegración de nuestra cultura es para la sociedad: una pérdida de tradiciones, distinciones y reacciones aseguradas.

H. G. WELLS, Tono-Bungay³⁴⁹

³⁴⁸ M. Maurette, «Fossil Nuclear Reactors», *Am. Rev. Nucl. Sci.*, 26, p. 319 (1976); J. C. Ruffenach, R. Hagemann y E. Roth, «Isotopic Abundance Measurements a Key to Understanding the Oklo Phenomenon», *Zeit Naturforsch.* 35A, p. 171 (1979).

³⁴⁹ H. G. Wells, *Tono-Bungay*, Waterlow & Sons, Londres, 1933, p. 215. [Hay traducción española: *Tono-Bungay*, Plaza y Janés, Barcelona, 1985]. Esta extraordinaria novela, publicada

Alexander Shlyakhter era un notable y joven físico nuclear de San Petersburgo (figura 11.4). Murió de cáncer en junio de 2000 después de trasladarse a la Universidad de Harvard, en Estados Unidos. Su experiencia fue importante para el control y la investigación de varios accidentes nucleares, en particular el desastre del reactor de Chernóbil, en la antigua Unión Soviética. Siendo aún un estudiante se dio cuenta de que los restos de la actividad nuclear acaecida en Oklo podían estar comunicándonos algo muy importante sobre cómo actuaban las reacciones nucleares hace dos mil millones de años. Reconoció que había algo muy inusual en algunas de las reacciones nucleares allí implicadas. Sorprendentemente, una de las reacciones que allí ocurrieron, la captura de un neutrón por un núcleo de samario-149 para producir el isótopo samario-150 y un fotón de luz, es muy sensible. Sólo ocurre debido a una «resonancia» fortuita: el drástico aumento de ritmo de una reacción nuclear en un espectro de energías particularmente estrecho. La ocurrencia de una resonancia es tan rara como hacer en golf un hoyo de un solo golpe. Sucede cuando las energías de los componentes que entran en una reacción se suman para dar un total que casi iguala exactamente al estado energético de un posible producto. En ese caso la interacción pasa muy rápidamente a su bien localizado

por primera vez en 1909, habla de una aventura secreta del explorador científico Gordon-Nasmyth para traer material radiactivo del África occidental, una de las atrevidas empresas del magnate Ponderevo, cuyo milagroso remedio Tono-Bungay da título al libro. Toneladas de tierra «supurante», que valen su peso en oro, son cargadas en su barco pero se echan a perder por la irradiación de las fibras de madera del barco. Finalmente se hunde y los capitalistas en bancarota son rescatados por un barco de línea de la Union Castle.

estado final. Era precisamente el mismo tipo de coincidencia que Fred Hoyle había predicho para el núcleo de carbono que describimos en el capítulo 8.

Shlyakhter comprendió que la necesidad de un nivel energético resonante localizado con gran precisión para la captura de un neutrón por samario-149 significaba que el reactor de Oklo nos estaba diciendo algo muy llamativo sobre la constancia de la física durante miles de millones de años.



Figura 11.4. Alexander Shlyakhter (1951-2000)³⁵⁰.

La excelente sintonización que parece existir entre los valores de las diferentes constantes de la Naturaleza que determinan la energía precisa de este nivel resonante debió haber existido ya con gran

³⁵⁰ Fotografía cortesía de Ilya Shlyakhter; para más información ver la página web <http://alexonline.info>.

exactitud hace aproximadamente dos mil millones de años, cuando el reactor nuclear estaba activo. En la figura 11.5 mostramos la probabilidad de que la reacción de samario ocurra a diferentes temperaturas si cambiamos la posición actual de la energía de la resonancia. Un cambio cero significa que tiene el mismo valor que se observa hoy en las reacciones nucleares.

El carácter resonante de la captura de un neutrón por el samario-149 es responsable de su muy significativa reducción en el emplazamiento de Oklo. Tres de las cuatro fuerzas de la Naturaleza, la interacción nuclear fuerte, la interacción débil y la interacción electromagnética, intervienen para establecer la localización del nivel energético crucial de la resonancia.

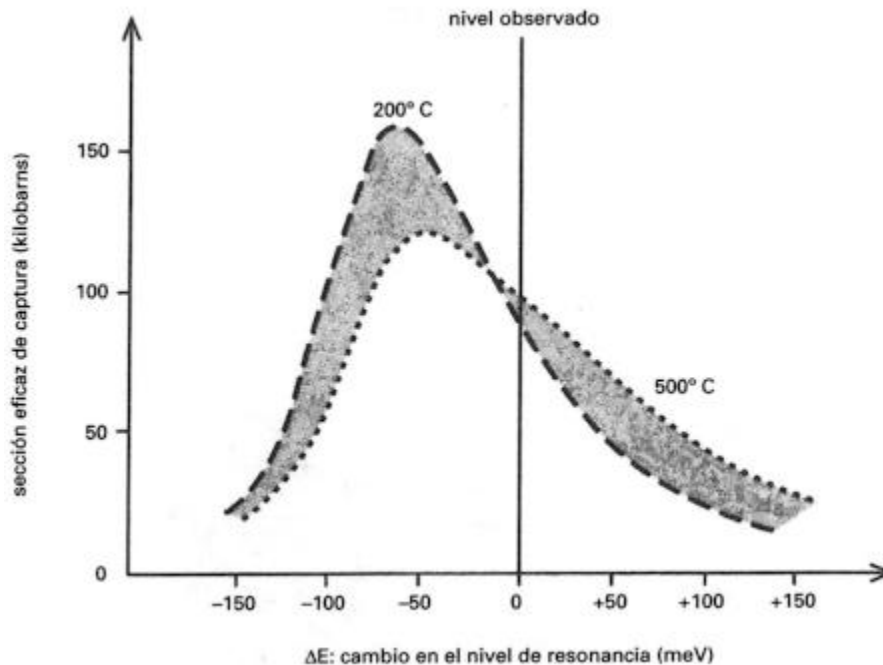


Figura 11.5. Cambio en la probabilidad de que ocurra una reacción nuclear de captura en samario a diferentes temperaturas cuando

cambiamos la posición de la energía de resonancia³⁵¹. Un cambio nulo significa que tiene el mismo valor que se observa hoy en las reacciones nucleares.

Por desgracia, la forma en que lo hacen no puede calcularse con todo detalle debido a la extraordinaria complejidad de las distintas contribuciones en competencia. Pero Shlyakhter redujo estas complejidades proponiendo la estimación razonable de que la contribución de cada fuerza de la Naturaleza al nivel energético de la resonancia estaría en proporción a su intensidad. Suponiendo que la temperatura del reactor era de unos 300 grados centígrados —el punto de ebullición del agua en el ambiente a alta presión de la veta—, concluyó que hace dos mil millones de años el nivel de la resonancia no podría haber estado a más de veinte mili-electrón voltios (meV) de su posición actual: esto es *un cambio de menos de una parte en 5000 millones durante 2000 millones de años.*

Estas deducciones significan que si la intensidad de la interacción entre un solo neutrón y el núcleo de samario está cambiando, entonces su tasa de cambio es inferior a 10^{-19} por año, o menor que aproximadamente una parte en mil millones durante los catorce mil millones de años de la historia del Universo. Shlyakhter argumentó³⁵² que si la intensidad de la interacción está determinada predominantemente por la fuerza nuclear fuerte,

³⁵¹ Y. Fujii *et al.*, «The Nuclear Reaction at Oklo 2 Billion Years Ago», *Nucl. Phys. B* 573, p. 381 (2000).

³⁵² A. I. Shlyakhter, *Nature* 260, p. 340 (1976); A. I. Shlyakhter, *Direct test of the time-independence of the fundamental nuclear constants using the Oklo natural reactor*, ATOMKI Report A/I, Leningrad Nuclear Physics Institute, 1983.

entonces su constante de la Naturaleza asociada α_F , está sujeta a la estricta restricción:

$$\{\text{ritmo de cambio de } \alpha_F\} / \{\text{valor de } \alpha_F\} < 10^{-19} \text{ por año}$$

Si sólo la interacción electromagnética está cambiando con el tiempo, entonces, debido a que su contribución al ritmo de interacción del samario es de aproximadamente un 5 por 100, cualquier tasa de cambio de la constante de estructura fina, α , debe obedecer al límite

$$\{\text{ritmo de cambio de } \alpha\} / \{\text{valor de } \alpha\} < 5 \times 10^{-17} \text{ por año}$$

Y si sólo la fuerza débil de la radiactividad variase con el tiempo, entonces la variación de su intensidad, α_D , está acotada por

$$\{\text{ritmo de cambio de } \alpha_D\} / \{\text{valor de } \alpha_D\} < 10^{-12} \text{ por año}$$

Estos límites eran mucho más fuertes que cualquier límite que se hubiese encontrado antes para la posible variación temporal de las constantes de la Naturaleza. El Universo ha estado expandiéndose durante unos catorce mil millones de años, de modo que estos límites, si se toman al pie de la letra, nos están diciendo que la constante de estructura fina no puede haber cambiado en más de aproximadamente una parte en diez millones durante toda la edad

del Universo. Los límites observacionales previos eran más de mil veces más débiles.

Hay algunas simplificaciones muy evidentes para llegar a estas fuertes limitaciones sobre la posible variación de las constantes de la Naturaleza:

- a)** Tienen un alcance concreto en el tiempo que se remonta a unos dos mil millones de años, cuando se formó el reactor de Oklo, comparados con los cuatro mil seiscientos millones de años de edad de la Tierra y unos catorce mil millones de años para la era de expansión del Universo.
- b)** Si las diferentes constantes variasen simultáneamente, entonces los resultados podrían cambiar.
- c)** Se hizo una hipótesis simplificadora concreta sobre la forma en que las constantes de la Naturaleza contribuyen a la energía de la resonancia de la captura neutrónica.
- d)** Se ha hecho alguna hipótesis simplificadora sobre la temperatura dentro del reactor cuando estaba activo.

La singular evidencia de la constancia de las constantes que proporciona Oklo ha garantizado que la brillante observación de Shlyakhter haya sido investigada por otros con mucho mayor detalle³⁵³. El estudio más detallado ha sido el de Yasanori Fujii y sus colaboradores³⁵⁴ en Japón. Un cambio en la energía de la resonancia (ΔE_r no nula) produce un cambio en la probabilidad de

³⁵³ T. Damour y F. Dyson, *Nucl. Phys. B* 480, p. 37 (1996).

³⁵⁴ Y. Fujii *et al.*, «The Nuclear Reaction at Oklo 2 Billion Years Ago», *Nucl. Phys. B* 573, p. 381 (2000).

captura del neutrón, que depende de la temperatura del reactor. El intervalo permitido para la probabilidad de captura del neutrón hace dos mil millones de años está entre 85 y 97 kilobarns³⁵⁵ si la abundancia de samario tiene que coincidir con el intervalo observado en los lugares del reactor. Los diversos investigadores de las muestras coinciden en que la temperatura debe haber estado en algún valor entre 200 y 400 grados centígrados. Ahora bien, uno puede ver a partir de las curvas dibujadas para dichas temperaturas que hay realmente *dos* intervalos de cambio ΔE_r que mantienen la sección eficaz de captura dentro de las cotas permitidas:

$$-12 \text{ meV} > \Delta E_r > 20 \text{ meV}$$

tomando la rama derecha; y

$$-105 \text{ meV} > \Delta E_r > -89 \text{ meV}$$

si tomamos la rama izquierda.

El límite procedente de la rama derecha es un refinamiento del resultado original de Shlyakhter y lleva a un límite más estricto sobre la posible variación temporal de la constante de estructura fina si se supone que es la única constante que varía. El límite es

$$\{\text{ritmo de cambio de } \alpha\} \{\text{valor de } \alpha\} = (-0,2 \pm 0,8) \times 10^{-17} \text{ por año}$$

³⁵⁵ 1 barn = 1024 cm². (*N. del t.*)

y es unas cinco veces más fuerte que el anterior. Permite que no haya ninguna variación en absoluto debido a la incertidumbre 0,8 en el valor inferido. Esta incertidumbre tendría que reducirse muy por debajo de 0,2 para que haya alguna evidencia creíble de cualquier variación real. Sin embargo, si tomamos el resultado de la rama izquierda, éste no permite que ΔE_r sea cero y lleva a la deducción de que ha habido un cambio no-nulo en el valor de la constante de estructura fina desde el suceso de Oklo, igual³⁵⁶ a {ritmo de cambio de α }{valor de α } = $(4,9 \pm 0,4) \times 10^{-17}$ por año. Si se consideran las abundancias de los otros residuos isotópicos del suceso de Oklo, este segundo resultado podría excluirse³⁵⁷. Pero de momento la calidad de la muestra y las incertidumbres sobre la temperatura en el reactor nos impiden descartarla definitivamente. También es interesante ver las consecuencias de permitir que las intensidades de la fuerza electromagnética y la fuerza nuclear fuerte varíen simultáneamente. Lo típico es que esto lleve a límites sobre la variación temporal de ambas «constantes» que son aproximadamente tan fuertes como los que acabamos de dar para la constante de estructura fina. Pero hay una situación peculiar,

³⁵⁶ Puede interpretarse que el análisis de Damour y Dyson da los intervalos -94 ± 26 meV y $46 + 44$ meV que ellos eligieron reunir para crear un único intervalo acotado por los puntos finales (esto incluye ahora el cero que no incluían los intervalos separados) de -120 meV < ΔE_r < 90 meV.

³⁵⁷ Fujii *et al.*, *op. cit.*, considera la captura de neutrones por un isótopo de gadolinio. Éste es un enfoque prometedor basado en nuevas muestras, pero el problema de la contaminación es agudo y se necesita una importante corrección del análisis para dar cuenta de ella. Las elecciones más razonables parecen favorecer la solución de la rama derecha para el samario, consistente en un desplazamiento cero en la energía de resonancia en tres de las cuatro muestras analizadas.

aunque en apariencia bastante complicada, en la que los límites para la variación son mucho más débiles. Si, por alguna razón desconocida, las tasas de cambio en las interacciones fuerte y electromagnética durante dos mil millones de años son iguales con un error menor de una parte en diez millones, entonces los efectos de los dos cambios en las constantes se cancelan. Los nuevos límites quedan drásticamente debilitados a un nivel que hubiera sido el caso de no producirse ninguna resonancia especial para la captura del neutrón

{ritmo temporal de cambio de α [α_F]}{valor de α [α_F]} = $< 10^{-10}$ por año

Aunque esta probabilidad finamente ajustada de una parte en diez millones para la posible variación de las constantes de la fuerza electromagnética y fuerte podría sonar más bien artificial, un amplio abanico de teorías que intentan unir las diferentes fuerzas de la Naturaleza predicen realmente que ambas constantes varían justo a la misma velocidad, de modo que no se debería excluir esta posibilidad como algo absurdamente improbable³⁵⁸.

§. El reloj de los tiempos

Las nueve primeras cifras tras la coma decimal pueden memorizarse como sigue: $e = 2,7$ (Andrew

³⁵⁸ Las teorías de Kaluza-Klein con dimensiones extra de espacio, que consideramos en el último capítulo, predicen que tanto α como α_s serán proporcionales a R^{-2} , donde R es el diámetro promedio de cualquier dimensión extra del espacio, si R cambia con el tiempo.

Jackson)², o e = 2,718281828..., porque Andrew Jackson fue elegido presidente de Estados Unidos en 1828. Por otra parte, para los que son buenos en matemáticas ésta es una buena manera de recordar la historia americana.

EDWARD TELLER³⁵⁹

Para la mayoría de la gente la palabra radiactividad trae a la mente alguna frase en la que también aparecen palabras como accidente, residuos, fuga, cáncer o desastre. Pero sin radiactividad no estaríamos aquí. La delicada secuencia de procesos que crea el flujo estacionario de energía solar que baña la Tierra se hace posible gracias a la radiactividad. Cuando la Tierra se condensó en su masa de material actual hace aproximadamente cuatro mil quinientos millones de años, contenía en su núcleo suficientes metales como níquel y hierro para mantener un campo magnético significativo. Sin él, no tendríamos atmósfera que sustentara la vida. El viento de partículas eléctricamente cargadas que continuamente salen de la superficie del Sol hubiera barrido nuestra atmósfera, como lo hacen en Marte donde no hay escudo magnético. El campo magnético de la Tierra nos defiende de estos invasores desviándolos alrededor de la atmósfera.

³⁵⁹ E. Teller, *Conversations on the Dark Secrets of Physics*, Plenum, Nueva York, 1991, p. 87.

Junto con este núcleo interno de hierro y níquel que sostiene la vida, la Tierra primordial también tenía suficientes elementos radiactivos, como uranio, para mantener un largo período de calentamiento por desintegraciones radiactivas en su interior profundo. Este motor interno desempeñó un papel clave en la liberación del potencial geológico de la Tierra. El horno subterráneo ha estimulado continuas ediciones de levantamiento de montañas y tectónica de placas, manteniendo viva la superficie y cambiándola de forma que ofrece un hábitat adecuado para animales terrestres y anfibios.

Cuando la idea de que algunas de las constantes tradicionales de la Naturaleza podrían estar cambiando lentamente fue sugerida por primera vez por Dirac y Gamow, muchos físicos se dieron cuenta de que las constantes que controlaban la desintegración radiactiva debían ser cruciales para la historia del planeta Tierra. Cualquier cambio en sus valores pasados debería perturbar con toda probabilidad un equilibrio delicado y dar lugar a demasiado, o demasiado poco, calentamiento.

Los elementos radiactivos actúan como relojes. Sus «semividas» nos indican el tiempo necesario para reducir a la mitad su abundancia inicial. Se dividen en grupos cuyas semividas son de miles de millones, millones y miles de años respectivamente.

Siguiendo los primeros intentos de Denys Wilkinson³⁶⁰ para poner límites a la constancia de las constantes por este sistema, en 1958

³⁶⁰ D. H. Wilkinson, *Phil. Mag.* (series 8) 3, p. 582 (1958).

Freeman Dyson³⁶¹ utilizó la semivida de núcleos de larga vida que se desintegran mediante desintegración beta, tales como renio-187, osmio-187 y potasio-40, para poner un límite a la posible variación pasada de la constante de estructura fina respecto a su valor presente. Estos tres núcleos tienen semividas muy largas que han sido determinadas con precisión por experimentos de laboratorio y por comparación con las edades de los meteoritos. Dado que el ritmo de desintegración del uranio-238 debe haber estado dentro de un margen de menos del 20 por 100 respecto a su valor presente durante los últimos dos mil millones de años, se deduce que

$$\{\text{ritmo de cambio de } \alpha\} / \{\text{valor de } \alpha\} < 2 \times 10^{-13} \text{ por año}$$

Estudios similares de diferentes secuencias de desintegraciones realizados por otros científicos³⁶² llevan a otros límites de una intensidad muy similar. Estos límites fueron finalmente superados por la evidencia del reactor nuclear de Oklo.

§. Especulaciones subterráneas

Esta sal de roca tiene más de doscientos millones de años y se formó en antiguos procesos geológicos en las montañas

³⁶¹ F. Dyson, *Phys. Rev. Lett.* 19, p. 1291 (1967).

³⁶² A. Peres, *Phys. Rev. Lett.* 19, p. 1293 (1967); S. M. Chitre y Y. Pal, *Phys. Rev. Lett.* 20, p. 278 (1967); T. Gold, *Nature* 218, p. 731 (1968).

alemanas. Consumir antes de abril de 2003.

*Etiqueta de producto*³⁶³

El fenómeno de Oklo quizá no haya sido único. Las condiciones necesarias para sostener cadenas de reacciones de fisión nuclear son inusuales pero en absoluto extrañas. Es posible que otros reactores naturales hayan sido explotados inadvertidamente o estén esperando a ser descubiertos en otros lugares de la Tierra. Aunque hay otros lugares en África, y en Colorado, Estados Unidos, que presentan déficit de uranio-235 y que podrían haber sido producidos por reacciones nucleares que ocurrieran de forma natural, ninguno de ellos es considerado un reactor natural.

El descubrimiento de estos posibles reactores naturales no sólo es importante para el estudio de las constantes de la Naturaleza. Transmiten a los físicos nucleares información importante sobre la estabilidad y confinabilidad futura de los productos de fisión nuclear enterrados durante períodos de tiempo larguísimos. Quizá un día un ejercicio de contabilidad química muy cuidadoso llevará a una repetición de la excitante secuencia de investigaciones que desenmascararon al reactor de Oklo.

Si en la Tierra pueden darse reactores naturales, entonces ¿por qué no en otro lugar? Resulta tentador especular con la identificación de una nueva fuente de calor que sostiene la vida y que podría

³⁶³ *Observer*, 27 de enero de 2002, p. 30.

desempeñar el inusual papel de incubar evolución bioquímica en otros mundos.

El astrónomo Fred Hoyle³⁶⁴ escribió una novela de ciencia ficción sobre el desarrollo de la vida en un cometa que era iniciada y sostenida por reacciones nucleares naturales ocurridas dentro de su núcleo. Quizá la búsqueda de planetas extrasolares descubrirá un planeta o una luna en donde el fenómeno de Oklo ocurrió a mayor escala, calentando el interior durante largos períodos de la vida del planeta y sosteniendo el desarrollo de vida bacteriana compleja, antes de apagarse y dejar el planeta latente y superficialmente muerto.

Es tentador pensar que el tiempo en la historia del Universo durante el que existe vida ha dictado algunas consecuencias nucleares interesantes para la vida humana. Hemos visto cómo los diferentes ritmos de desintegración de los dos isótopos de uranio hacen el uranio-235 relativamente más abundante en el pasado. Por la misma razón, sería relativamente menos abundante en planetas como la Tierra en el futuro lejano. Durante el último siglo descubrimos que la corteza de nuestro planeta contiene elementos radiactivos que permiten crear bombas nucleares con alguna habilidad técnica si refinamos el isótopo activo de uranio-235 a partir del uranio-238, más abundante. Si los seres humanos aparecieran en nuestro planeta mucho antes o mucho después de lo que lo hicieron, entonces sus perspectivas de hacer uso de armas nucleares hubieran sido muy diferentes.

³⁶⁴ F. Hoyle, *Comet Halley*, Michael Joseph, Londres, 1985.

He aquí el clarividente análisis de John von Neumann, uno de los más extraordinarios científicos del siglo XX, escrito en el alba de la era nuclear:

Si el hombre y su tecnología hubieran aparecido en escena varios miles de millones de años antes, la separación del uranio-235 (crucial para hacer bombas) habría sido más fácil. Si el hombre hubiera aparecido más tarde —digamos diez mil millones de años más tarde—, la concentración de uranio-235 habría sido tan baja que lo haría prácticamente inutilizable³⁶⁵.

Somos los beneficiarios de muchos aspectos de la interesante geología de la Tierra. La presencia de elementos pesados con interesantes propiedades magnéticas y radiactivas nos ha conducido a la comprensión de estas fuerzas fundamentales de la Naturaleza. La vida en un planeta tranquilo e irrigado, bañado por la luz de una estrella que se porta bien, sería posible sin ningún interés nuclear o radiactivo en cualquier lugar próximo a su superficie. Pero sus habitantes se verían seriamente perjudicados en su búsqueda por entender el alcance y riqueza de las fuerzas y constantes de la Naturaleza.

³⁶⁵ J. von Neumann, *Collected Works*, ed. A. H. Taub, Pergamon, Nueva York, 1961, vol. 6, artículo 39.

Capítulo 12

Mirar al cielo

Una idea que no es peligrosa no merece llamarse idea.

OSCAR WILDE³⁶⁶

§. Tiempo de sobra

All that I Know

Of a certain star,

Is, it can throw,

(Like the angled spar)

Now a dart of red,

Now a dart of blue³⁶⁷.

ROBERT BROWNING, *My Star*³⁶⁸

Imaginemos que el hijo del telescopio espacial Hubble ha detectado signos de vida inteligente en un sistema estelar de otro lugar de nuestra galaxia. Se emiten señales de radio dirigidas a dicho lugar y unos años más tarde llega una respuesta. Sigue una lenta conversación en la que cada parte descodifica limpiamente los mensajes recibidos. Poco a poco aprendemos algo singular y ligeramente desagradable (al menos para algunas personas) sobre nuestros amigos extraterrestres: sólo les interesa la astronomía. Su

³⁶⁶ O. Wilde, *The Critic as Artist* (1890) en *The Portable Oscar Wilde*, eds. R. Aldington y S. Weintraub, Viking, Nueva York, 1976. [Hay traducción española: *El crítico como artista*, Espasa Calpe, Madrid, 2000].

³⁶⁷ «Todo lo que sé / de cierta estrella, / es que puede lanzar / (como el bauprés) / ahora un dardo de rojo, / ahora un dardo de azul».

³⁶⁸ R. Browning, *The Poems of Robert Browning*, Heritage Press, Nueva York, 1971.

civilización no parece estudiar otra cosa. Todos los desarrollos en matemáticas, ingeniería, computación y otras ciencias están subyugados al avance de la comprensión de las estrellas. No sabemos muy bien por qué es así. Quizá hay un imperativo religioso profundo. Ciertamente ellos poseen otras cosas técnicas, pero parecen que su interés por ellas es escaso a menos que tengan aplicaciones cósmicas.

Aunque a los astrónomos de la Tierra no les desagrade descubrir este sesgo, muchos otros están disgustados por haber descubierto especialistas. Deciden que una de las cosas que mejor podrían preguntar a sus corresponsales interestelares son los valores de las constantes de la Naturaleza. No es demasiado difícil asegurarnos de que estamos hablando de lo mismo. Después de todo, las propias señales de radio ofrecen un ejemplo de experiencia electromagnética compartida. No es demasiado difícil decirles lo que nosotros entendemos por la constante de estructura fina. A los extraterrestres se les pide que midan las razones de diversas frecuencias de oscilación en átomos y moléculas que contienen números especificados de partículas dentro y alrededor de sus núcleos y que nos envíen las respuestas a la velocidad de la luz. Nosotros haremos lo mismo y les enviaremos nuestras respuestas.

Puesto que esto no ha sucedido todavía, no puedo decirles qué es lo que reveló la comparación. Pero esta pequeña ficción ilustra cómo la información obtenida en otras partes del Universo podría darnos una comprobación única de la uniformidad de las constantes de la Naturaleza y las leyes de la física. ¿Qué pasaría si pudiéramos

prescindir de los extraterrestres y recoger información sobre las constantes de la Naturaleza directamente a gran distancia en el Universo?

Lo notable es que estas ficciones se han convertido en realidad sin los gastos o las complicaciones de comunicación extraterrestre y desciframientos. Cuando observamos una estrella lejana no sólo estamos recogiendo información a gran distancia, sino que también estamos retrocediendo en el tiempo. La luz viaja a una velocidad finita y, por ello, cuanto más lejos está una estrella de nosotros más tiempo ha tardado su luz en alcanzarnos. En el caso del Sol el viaje temporal de la luz es muy corto, unos quinientos segundos. La estrella más próxima a nosotros después del Sol es Alpha Centauri, a 4,1 años luz, mientras que los objetos astronómicos más lejanos que se observan rutinariamente están a más de trece mil millones de años luz. La luz procedente de estos objetos lejanos debe estar aportándonos información importante sobre los procesos físicos que la produjeron muy lejos y hace mucho tiempo.

George Gamow fue uno de los primeros que tuvo la idea de utilizar observaciones astronómicas³⁶⁹ de alguna manera para investigar si las constantes variaban; de hecho, él quería suponer que la constante de estructura fina variaba de una forma que explicaría las coincidencias de los Grandes Números de Dirac y ver entonces si este cambio contribuiría al desplazamiento hacia el rojo de la luz procedente de galaxias lejanas. La expansión del Universo significa que las galaxias más distantes se están alejando de nosotros y por

³⁶⁹ G. Gamow, *Phys. Rev. Lett.* 19, p. 759 (1967). Una medida ha sido intentada por M. P. Savedoff, «Physical Constants in Extra-Galactic Nebulae», *Nature* 178, pp. 688-689 (1956).

ello las ondas luminosas que emiten sus estrellas son recibidas por nuestros telescopios con una frecuencia más baja de aquella con la que fueron emitidas.

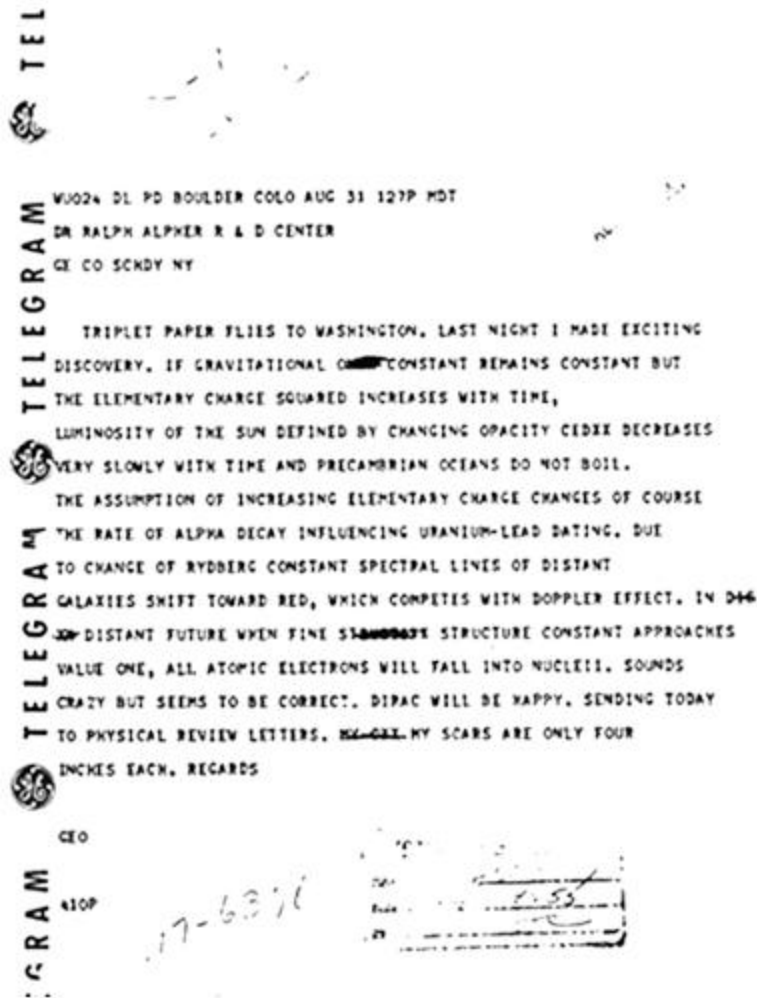


Figura 12.1. ¡El artículo del triplete vuela a Washington! Telegrama de Gamow a su antiguo estudiante Ralph Alpher en donde le cuenta su idea de que el incremento de la carga eléctrica puede evitar que los océanos hiervan en una época demasiado reciente en la historia de la Tierra³⁷⁰.

³⁷⁰ R. Alpher, «Large Numbers, Cosmology, and Gamow», *American Scientist* 61, p. 56 (1973). Reproducido con permiso de *American Scientist*.

Esto significa que sus colores están desplazados hacia el extremo rojo del espectro, y de ahí que estén «desplazados al rojo». Gamow dio con la forma de utilizar el desplazamiento al rojo para mirar hacia atrás en el tiempo y ver cómo eran las constantes de la Naturaleza cuando la luz empezó su viaje intergaláctico hacia nuestros telescopios. En la figura 12.1 podemos ver el telegrama de Gamow a su antiguo estudiante, Ralph Alpher, hablando de esta nueva idea y algunas de sus implicaciones.

Lamentablemente, la idea de Gamow no produce ningún efecto medible incluso si varía la constante de estructura fina. Pero no pasó mucho tiempo antes de que tres astrónomos, John Bahcall, Maarten Schmidt y Wallace Sargent en Caltech, Pasadena, dieran con otro enfoque que el reciente descubrimiento de los cuásares, o radiofuentes cuasiestelares, con altos desplazamientos al rojo había hecho posible por primera vez.

Recientemente habían encontrado pares de líneas espectrales³⁷¹, llamadas «dobletes», creadas por la absorción de luz recibida del recientemente descubierto cuásar QSU 3C191 por el elemento silicio. La distancia entre las dos líneas del doblete del silicio es una característica pequeña y sensible de la física atómica, consecuencia de los efectos relativistas que aparecen cuando los electrones se mueven a velocidades próximas a la de la luz alrededor del núcleo atómico (ver figura 12.2). De forma crucial, la separación de las

³⁷¹ J. Bahcall, W. Sargent y M. Schmidt, *Astrophys. J.* 149, L11 (1967).

líneas que forman el doblete del silicio depende sensiblemente del valor de la constante de estructura fina.

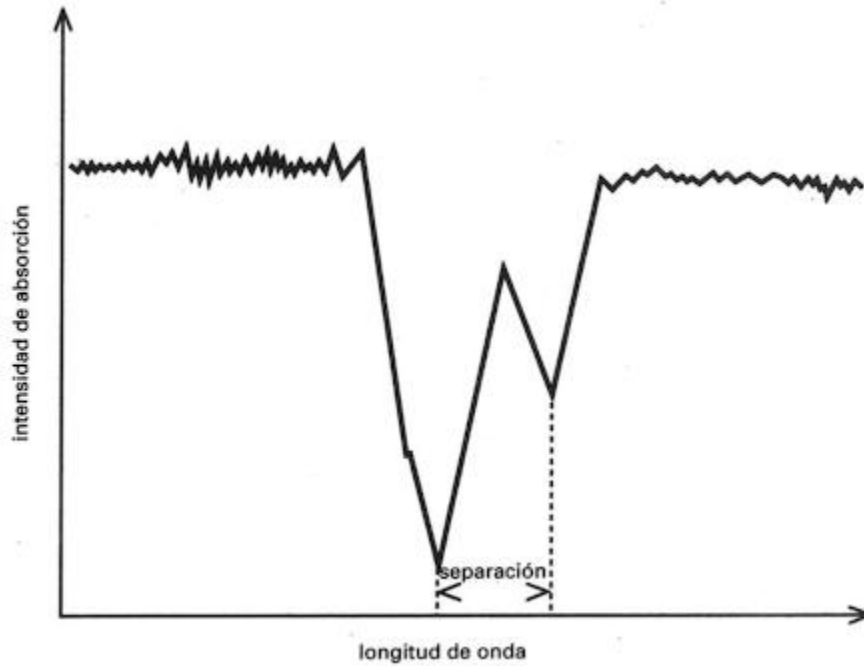


Figura 12.2. Líneas espectrales en un típico doblete atómico.

El cuásar 3C191 fue localizado con un desplazamiento al rojo de 1,95 y por eso su luz salió cuando el Universo tenía sólo una quinta parte de su edad actual, hace casi once mil millones de años, llevando información codificada sobre el valor de la constante de estructura fina en ese momento. Con la precisión de las medidas alcanzable entonces, se encontró que la constante de estructura fina era la misma entonces que ahora dentro de un margen de unos pocos por ciento:

$$\alpha(z = 1,95)/\alpha(z = 0) = 0,97 \pm 0,05$$

Poco después, en 1967, Bahcall y Schmidt³⁷² observaron un par de líneas de emisión de oxígeno que aparecen en el espectro de cinco galaxias que emiten radioondas, localizadas con un desplazamiento hacia el rojo promedio de 0,2 (emitiendo así su luz hace unos dos mil millones de años: aproximadamente la época en que el reactor de Oklo estaba activo en la Tierra) y obtuvieron un resultado consistente con ausencia de cambio en la constante de estructura fina que era aún diez veces más fuerte:

$$\alpha(z = 0,2)/\alpha(z = 0) = 1,001 \pm 0,002$$

Estas observaciones excluían rápidamente la propuesta de Gamow de que la constante de estructura fina estaba aumentando linealmente con la edad del Universo. Si hubiese sido así, la razón $\alpha(z = 0,2)/\alpha(z = 0)$ debería haberse encontrado con un valor próximo a 0,8.

Estas ideas establecen el escenario para que los astrónomos mejoren nuestro conocimiento de la constancia de constantes particulares de la Naturaleza a medida que la sensibilidad mejorada de los telescopios y detectores electrónicos permita hacer observaciones a desplazamientos al rojo cada vez mayores, retrocediendo cada vez más en el tiempo. La estrategia general consiste en comparar dos transiciones atómicas en un lugar astronómico y aquí y ahora en el laboratorio. Por ejemplo, si hay

³⁷² J. Bahcall y M. Schmidt, «Does the Fine-Structure Constant Vary with Cosmic Time?», *Phys. Rev. Lett.* 19, p. 1294-1295 (1967).

dobletes de elementos como carbono, silicio o magnesio, que se ven normalmente en nubes de gas con altos desplazamientos hacia el rojo, entonces las longitudes de onda de dos líneas especiales, digamos λ_1 y λ_2 , estarán separadas por una distancia proporcional a α^2 . El desplazamiento de líneas relativo viene dado por una fórmula:

$$(\lambda_1 - \lambda_2)/(\lambda_1 + \lambda_2) \propto \alpha^2$$

Ahora necesitamos medir las longitudes de onda λ_1 y λ_2 de forma muy precisa aquí en el laboratorio, y muy lejos de aquí por observaciones astronómicas. Calculando el miembro izquierdo de nuestra fórmula con gran exactitud, en ambos casos podemos dividir nuestros resultados para encontrar que

$$[(\lambda_1 - \lambda_2)/(\lambda_1 + \lambda_2)]_{\text{lab}}/[(\lambda_1 - \lambda_2)/(\lambda_1 + \lambda_2)]_{\text{ast}} = \alpha_{\text{lab}}^2/\alpha_{\text{ast}}^2$$

Queremos descubrir si existe cualquier desviación significativa de 1 cuando calculamos la razón en el miembro izquierdo. Si fuera así, nos dice que la constante de estructura fina ha cambiado entre el momento en que salió la luz y el presente. Para estar seguros de que hay realmente una desviación significativa de 1, varias cosas deben mantenerse bajo un control muy preciso. Hemos de ser capaces de medir las longitudes de onda λ_1 y λ_2 con gran exactitud en el laboratorio. También necesitamos estar seguros de que las observaciones no se vean afectadas por ruido extraño o sesgadas

por alguna propensión sutil de nuestros instrumentos a recoger ciertos tipos de prueba más fácilmente que otros.

Otra aproximación consiste en comparar³⁷³ los desplazamientos al rojo de la luz emitida por moléculas como el monóxido de carbono con la de átomos de hidrógeno de la misma nube. De hecho, uno está midiendo el desplazamiento al rojo de la misma nube por dos medios y comparándolos. La radioastronomía utiliza este procedimiento, lo que nos permite comparar el valor de α aquí y ahora³⁷⁴ con su valor en las fuentes astronómicas. Cuando están en desplazamientos al rojo 0,25 y 0,68 lleva a un límite para un posible cambio, $\Delta\alpha$, en α entre entonces y ahora de

$$\Delta\alpha/\alpha = \{\alpha(z) - \alpha(\text{ahora})\}/\alpha(\text{ahora}) = (-1,0 \pm 1,7) \times 10^{-6}$$

Uno de los retos de este método es asegurar que las observaciones atómicas y moleculares están considerando átomos y moléculas que se mueven en la misma dirección y en la misma nube en su lejana localización.

Un tercer método es comparar el desplazamiento hacia el rojo encontrado en radio-observaciones de emisiones en la longitud de onda de 21 centímetros con transiciones atómicas ópticas en la misma nube. La razón de las frecuencias de estas señales nos

³⁷³ M. J. Drinkwater, J. K. Webb, J. D. Barrow y V. V. Flambaum, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 295, p. 457 (1998).

³⁷⁴ En realidad mide la constancia del producto $g_p\alpha^2$ donde g_p es el «factor g» del protón. Aquí suponemos que g_p no está cambiando.

permite comparar la constancia de otra combinación de constantes³⁷⁵:

$$A \equiv \alpha^2 m_e / m_{\text{pr}}$$

donde m_e es la masa del electrón y m_{pr} es la masa del protón. La observación de una nube de gas con un desplazamiento hacia el rojo de $z = 1,8$ conduce a un límite³⁷⁶ sobre cualquier cambio en la combinación A de³⁷⁷

$$\Delta A/A = \{A(z) - A(\text{ahora})\}/A(\text{ahora}) = (0,7 \pm 1,1) \times 10^{-5}$$

Lo importante a notar en estos dos resultados es que la incertidumbre de la medida es suficientemente grande para incluir el caso de *no*-variación:

$$\Delta\alpha/\alpha = 0 \text{ y } \Delta A/A = 0$$

Es importante resaltar que durante todo el período de 1967 a 1999, cuando se estaban haciendo estas observaciones para aumentar la precisión, no hubo nunca ninguna expectativa de encontrar una variación no-nula de cualquier constante tradicional. Las observaciones se continuaron como medio de mejorar los límites sobre cuáles podían ser las mínimas variaciones permitidas. Su

³⁷⁵ Suponemos de nuevo que g_p es constante.

³⁷⁶ L. L. Cowie y A. Songalia, *Astrophys. J.* 453, p. 596 (1995).

³⁷⁷ Este límite excluye la inclusión de incertidumbres asociadas con posibles variaciones de las velocidades locales de las fuentes.

novedad residía en que eran mucho más restrictivas que cualesquiera límites que pudieran obtenerse en el laboratorio por ataque experimental directo. Observar simplemente la energía de un átomo durante unos pocos años para ver si se desplaza no puede competir con los miles de millones de años de historia que las observaciones astronómicas pueden registrar rutinariamente.

El cuarto y más reciente método es el más potente. Una vez más, busca pequeños cambios en la absorción por los átomos de la luz procedente de cuásares lejanos. En lugar de considerar pares de líneas espectrales en dobletes del mismo elemento, como el silicio, considera la separación entre líneas causada por la absorción de luz del cuáasar por *diferentes* elementos químicos en nubes de gas situadas entre el cuáasar y nosotros (ver figura 12.3).

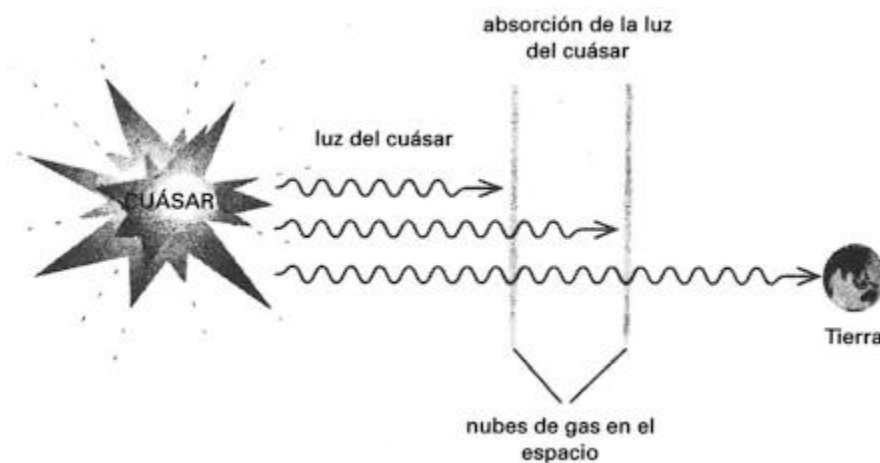


Figura 12.3. La absorción de la luz del cuáasar por diferentes elementos químicos en nubes de material situadas entre un cuáasar lejano y nosotros.

Este nuevo método comporta varias ventajas considerables. Es posible considerar las separaciones entre muchas líneas de absorción y acumular un conjunto de datos mucho más importante. Mejor aún, es posible elegir los pares de líneas cuyas separaciones van a medirse de modo que se maximice la sensibilidad de las separaciones frente a pequeños cambios en el valor de α con el tiempo. Pero hay una inusual ventaja añadida en este método. Las separaciones de longitud de onda que hay que extraer de los datos astronómicos y medir en el laboratorio dependen de α de formas características. Podemos servirnos de grandes simulaciones por ordenador³⁷⁸ para descubrir qué sucedería con las posiciones de las líneas si se hiciera un cambio minúsculo en el valor de α . Los cambios varían mucho para diferentes pares de líneas. Aumentamos α en una parte en un millón y algunas separaciones aumentan, otras disminuyen, mientras que otras apenas se ven afectadas. El conjunto total de cambios define una huella característica de un cambio en el valor de α . Cualquier influencia espuria sobre los datos, o turbulencia confusa en el lugar del Universo donde está ocurriendo la absorción, que trate de engañarnos haciéndonos pensar que α está cambiando cuando no es así, habrá tenido que imitar toda la huella dactilar dejada en las separaciones de longitudes de onda por la auténtica variación de α .

Este método, llamado por sus inventores el método polimultipléte, es mucho más sensible que los otros métodos astronómicos y

³⁷⁸ Estas simulaciones han sido desarrolladas para predecir las posiciones de las líneas espectrales y niveles energéticos de los átomos en el laboratorio y son llevadas a cabo por Victor Flambaum y sus colegas en la Universidad de Nueva Gales del Sur.

permite utilizar mucha más información contenida en los datos astronómicos³⁷⁹. Nosotros la hemos aplicado a observaciones de 147 cuásares, considerando separaciones entre magnesio, hierro, níquel, cromo, zinc y aluminio. Cuando empezamos este trabajo esperábamos ser capaces de utilizar nuestra nueva técnica para poner límites aún más fuertes a la constancia de la constante de estructura fina. Pero nos aguardaba una gran sorpresa.

§. ¿Inconstancia entre las constantes?

Me siento como un fugitivo de la ley de los valores medios.

BILL MAUDLIN³⁸⁰

Cuando desarrollamos inicialmente el método polimultipléte esperábamos que llevase simplemente a una mejora importante de los límites a cualquier cambio permitido en la constante de estructura fina. Era un método ideal para explotar los desarrollos en astronomía extragaláctica, los grandes telescopios y la tecnología de grandes detectores. El gas absorbente situado entre nosotros y los cuásares lejanos es un laboratorio perfecto para comprobar la constancia de las constantes porque los cuásares son brillantes y fácilmente accesibles para los telescopios en un amplio espectro de desplazamientos al rojo. No obstante, hay algunas restricciones. Si

³⁷⁹ Esta sensibilidad mejorada surge porque la sensibilidad a α con respecto a aspectos relativistas de la estructura atómica entra como $(\alpha Z)^2$ donde Z es el número atómico (número de protones en el núcleo) del átomo. Así, comparando líneas de diferentes especies atómicas con valores grandes y pequeños de Z se obtiene una importante ganancia en sensibilidad con respecto a métodos que observan dobletes de una especie con el mismo Z .

³⁸⁰ W. Maudlin, texto de un dibujo de *Up Front* (1945).

uno trata de ver objetos con un desplazamiento hacia el rojo demasiado alto, las señales serán demasiado débiles para detectarlas con claridad. También, por desgracia, algunas de las longitudes de onda de la luz que serían muy interesantes terminan siendo desplazadas hacia el rojo en su ruta hasta nosotros de modo que caen fuera de la ventana de longitudes de onda que pueden atravesar la atmósfera terrestre y llegar al suelo.

Los resultados recogidos y analizados durante dos años por nuestro equipo constituido por John Webb, Mike Murphy, Victor Flambaum, Vladimir Dzuba, Chris Churchill, Michael Drinkwater, Jason Prochaska, Art Wolfe y por mí mismo, con aportaciones de datos por parte de Wallace Sargent, resultaron ser inesperados y potencialmente de gran alcance. Si nos están diciendo lo que parece que nos están diciendo, entonces, en palabras de un comentarista³⁸¹, «será el descubrimiento más espectacular de los últimos cincuenta años».

Nosotros encontramos una diferencia persistente y altamente significativa en la separación de líneas espectrales con un alto desplazamiento hacia el rojo comparada con su separación cuando se miden en el laboratorio³⁸². La complicada «huella dactilar» de desplazamientos encaja con la que se predice si el valor de la constante de estructura fina era *menor* en el momento en que se formaron las líneas de absorción en aproximadamente siete partes

³⁸¹ *Scientific American*, noviembre de 1998, Science and the Citizen «Inconstant Constants», citando a Robert J. Scherrer.

³⁸² La medida de las líneas espectrales requeridas en el laboratorio con el nivel de precisión requerido (para el que no parece haber habido necesidad antes) es muy desafiante, y con más observaciones en laboratorio el método polimultipléte podría extraer aún más información de los datos disponibles.

por millón³⁸³. La pauta global de variación que se obtiene si se combinan todos los resultados se muestra en la figura 12.4³⁸⁴.

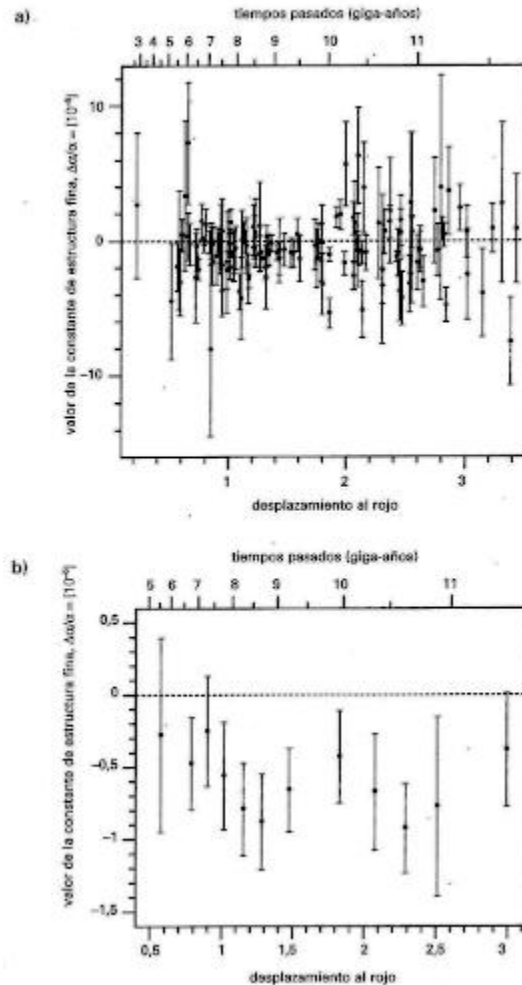


Figura 12.4. Cambio relativo ($\Delta a/a$) en el valor de la constante de estructura fina (en unidades de 10^{-5}) con diferentes desplazamientos al rojo, y tiempos hacia el pasado medidos en miles de millones de años (giga-años). Hay un importante cambio negativo entre desplazamientos al rojo 1 y 3, lo que indica que la constante de

³⁸³ J. K. Webb, M. T. Murphy, V. Y. Flambaum, V. A. Dzuba, J. D. Barrow, C. W. Churchill, J. X. Prochaska y A. M. Wolfe, «Further evidence for cosmological evolution of fine structure constant», *Phys. Rev. Lett.* 87, 091301 (2001). Cuando se incluyen nuevos datos de W. Sargent la significación estadística de la detección de las variaciones en α es mejor que 7- sigma.

³⁸⁴ Preparado para el autor por Michael Murphy.

estructura fina parece haber sido menor en el pasado en aproximadamente siete partes por millón, (a) Muestra todos los objetos astronómicos observados, (b) Simplifica los datos agrupando los puntos en (a) en grupos de diez observaciones.

Los primeros estudios que utilizaban el método polimultipléte en 1999 registraban pruebas de una variación en el valor de la constante de estructura fina en el pasado. Desde entonces, los datos han aumentado continuamente y se han utilizado mejores técnicas de análisis. Sorprendentemente, los mismos resultados se encuentran a partir del conjunto de observaciones de 147 cuásares. Éste es el mayor ataque observacional directo a la cuestión de si las constantes son las mismas ahora que hace trece mil millones de años.

El primer rasgo sorprendente es que si utilizamos los resultados para calcular la constante de estructura fina en el pasado, encontramos un período en la historia cósmica en el que parece ser ligeramente menor que hoy. La magnitud de la disminución de su valor es muy pequeña, unas siete partes por millón; demasiado pequeña para haberla encontrado en cualquier investigación anterior por parte de observadores que utilizaban otros métodos o para haberla detectado en cualquier experimento de laboratorio. Apunta a que la electricidad y el magnetismo eran ligeramente más débiles en el pasado y los átomos más grandes. Si tomamos las

observaciones de fuentes situadas entre desplazamientos al rojo de 0,5 y 3,5 en conjunto, el cambio observado es³⁸⁵

$$\Delta\alpha/\alpha = [\alpha(z) - \alpha(\text{ahora})]/\alpha(\text{ahora}) = (-0,72 \pm 0,18) \times 10^{-5}$$

Si convertimos esto en una tasa de cambio de α con el tiempo, equivale aproximadamente a

$$\{\text{ritmo de cambio de } \alpha\}/\{\text{valor actual de } \alpha\} = 5 \times 10^{-16} \text{ por año}$$

Una primera reacción a estos resultados podría ser que están afirmando una variación mucho mayor que la permitida por la evidencia obtenida de los estudios del reactor natural de Oklo. Pero no están en conflicto directo. Dejando aparte todas las incertidumbres que intervienen en encontrar la dependencia exacta de los ritmos de captura de neutrones en el reactor de Oklo de la constante de estructura fina, las observaciones de Oklo sondan el valor de la constante de estructura fina hace sólo unos 2000 millones de años (un desplazamiento al rojo de aproximadamente 0,1) mientras que las observaciones de los cuásares cubren el rango comprendido entre 3000 y 11 000 millones de años. Las dos observaciones sólo están en conflicto si uno supone que la

³⁸⁵ Esto puede compararse con los resultados obtenidos con la primera serie de observaciones en 1999:

$$\Delta\alpha/\alpha = [\alpha(z) - \alpha(\text{ahora})]/\alpha(\text{ahora}) = (-1,09 \pm 0,36) \times 10^{-5}$$

publicada por J. K. Webb, V. V. Flambaum, C. W. Churchill, M. J. Drinkwater y J. D. Bairow, *Phys. Rev. Lett.* 82, p. 884 (1999).

constante de estructura fina cambia siempre al mismo ritmo. Pero, como veremos, no es necesario hacer ninguna hipótesis.

§. ¿Qué hacemos con esto?

Espero no escandalizar mucho a los físicos experimentales si añado que también es una buena regla no confiar demasiado en los resultados observacionales que se presentan hasta que hayan sido confirmados por la teoría.

ARTHUR EDDINGTON³⁸⁶

La prueba de que la constante de estructura fina puede haber sido diferente en el pasado es impresionante aunque de carácter estadístico. Se fundamenta en la totalidad de las observaciones astronómicas de absorción de luz por muchos elementos químicos diferentes en aproximadamente 147 nubes de polvo distintas. En el futuro se añadirán más datos al total y la cuestión será sondeada mediante observaciones cada vez mejores. Idealmente, otros astrónomos deberían repetir nuestras observaciones y utilizar diferentes instrumentos y diferentes técnicas de análisis de datos para ver si obtienen los mismos resultados.

Pero, por deseables que sean, más observaciones y mayor precisión no son la panacea.

³⁸⁶ A. S. Eddington, *New Pathways in Science*, Cambridge University Press, Cambridge, 1935, p. 211.

En la ciencia observacional hay que ser conscientes de los diferentes tipos de incertidumbre y «error». En primer lugar, hay una incertidumbre introducida por la precisión limitada de los procesos de medida. Si se mide la altura de alguien con una precisión de un centímetro y se apunta que es de 1,85 metros, en realidad podría estar en cualquier valor entre 1,845 y 1,855 metros. Normalmente este tipo de incertidumbre se entiende bien y puede reducirse poco a poco con una mejora de la tecnología (en otras palabras, usando una regla graduada con una escala más fina). En segundo lugar, hay una forma más sutil de incertidumbre, que suele llamarse «error sistemático» o «sesgo», que deforma el proceso de recogida de datos de modo que uno reúne inadvertidamente algunos tipos de pruebas con más facilidad que otros. Y lo que es aún más grave, puede hacer que uno no observe lo que piensa que está observando³⁸⁷.

Todas las formas de ciencia experimental se enfrentan al desafío de estos sutiles sesgos. En trabajos de laboratorios normales es habitual repetir los experimentos de varias maneras, cambiando algunos aspectos del montaje experimental cada vez para poder excluir muchos tipos de sesgo. Pero en astronomía hay un pequeño problema. Sólo hay un Universo. Podemos observarlo pero no podemos experimentar con él. En lugar del experimento buscamos correlaciones entre diferentes propiedades de objetos: ¿tienen todas

³⁸⁷ Hay otras formas de error que son introducidas deliberadamente, especialmente por los políticos, cuando se tratan los datos de las votaciones. Por ejemplo, un partido con un manifiesto de diez puntos supone sin cuestionárselo que si gana la elección por una mayoría absoluta tiene un mandato para todas las políticas de su manifiesto, cuando en realidad podrían tener sólo un voto mayoritario para una fracción de ellas.

las nubes con desplazamientos hacia el rojo concretos cambios espectrales más pequeños entre ciertas líneas de absorción, por ejemplo? Uno podría ser consciente de un sesgo y pese a todo ser incapaz de corregir completamente su influencia, como en el caso de crear un gran catálogo de galaxias donde se es consciente del simple hecho de que las galaxias brillantes son más fáciles de ver que las débiles. Pero el verdadero problema real es el sesgo que uno *no conoce*. Los datos utilizados para estudiar la posible variación de la constante de estructura fina han sido sometidos a una gran cantidad de pruebas y revisiones para estimar los efectos de cualquier sesgo imaginable. Hasta ahora sólo se ha encontrado una influencia significativa y, si se tiene en cuenta, hace en realidad *mayores* las variaciones deducidas³⁸⁸.

La reacción de la mayoría de los físicos y químicos a la idea de que la constante de estructura fina podría estar cambiando en una minúscula cantidad durante miles de millones de años es generalmente una reacción de horror e incredulidad categórica. Toda la química se basa en la creencia en teorías que la suponen absolutamente constante. Sin embargo, un cambio de algunas partes por millón durante diez mil millones de años no tendría ningún efecto discernible sobre ningún experimento de física y química terrestre. Para verlo con mayor claridad es hora de preguntar cuáles son exactamente los mejores límites

³⁸⁸ Éste es el efecto de refracción de la luz incidente que depende de la profundidad de atmósfera que tiene que atravesar, que a su vez depende de la latitud geográfica del telescopio. Es un efecto muy pequeño, normalmente ignorable en astronomía, pero entra al mismo nivel que las aparentes variaciones de estructura fina. Si se corrige, hace el valor de la constante de estructura fina aún ligeramente menor en el pasado cuando se compara con su valor actual.

experimentales directos que tenemos sobre el cambio en la constante de estructura fina.

La mayoría de los tests directos de la constancia de la constante de estructura fina toman un átomo y lo monitorizan durante un intervalo dado de tiempo de forma tan precisa como permita el montaje de medida, habitualmente en unas pocas partes por mil millones. Esto equivale a comparar diferentes relojes atómicos. Esta monitorización no puede realizarse durante mucho tiempo debido a la necesidad de mantener constantes otras cosas, y los mejores resultados provienen de una prueba de 140 días³⁸⁹. Suponiendo que la razón entre las masas del electrón y el protón no cambia, los experimentadores encuentran que la estabilidad del valor de una transición entre hidrógeno y mercurio significa que si la constante de estructura fina está cambiando, entonces su tasa de cambio debe ser menor que 10^{-14} por año. Este resultado suena muy fuerte. Permite que la constante cambie en sólo una parte en diez mil durante toda la edad del Universo, pero las observaciones astronómicas están registrando una variación que es todavía cien veces menor. Esta diferencia entre el laboratorio y el espacio exterior ilustra también la enorme ganancia en sensibilidad que ofrecen las observaciones astronómicas sobre los experimentos directos en laboratorio. Quizá no estén haciendo medidas de la constante de estructura fina en el límite de sensibilidad tecnológica, pero están mirando tan atrás en el pasado —13 000 millones de años en lugar

³⁸⁹ J. D. Prestage, R. L. Tjoelker y L. Maleki, *Phys. Rev. Lett.* 74, p. 18 (1998).

de 140 días— que proporcionan límites mucho más sensibles³⁹⁰. El Universo tiene que tener miles de millones de años para que las estrellas tengan el tiempo suficiente para crear los elementos biológicos necesarios que permiten la existencia de complejidad viviente en su interior. Si se da la casualidad de que estos complicados fragmentos de química son astrofísicos, entonces un bonito producto colateral de la gran edad del Universo es el hecho de que tales sondas sensibles de la constancia de la Naturaleza estén disponibles para ellos.

Parece que no podemos utilizar experimentos terrestres para comprobar por partida doble la aparente variabilidad de la constante de estructura fina: sencillamente no tenemos instrumentos suficientemente sensibles para detectar una variación en el nivel visto en los datos astronómicos. Por el momento, la mejor oportunidad de una confirmación independiente desde una dirección del todo distinta parece estar en otra sonda astronómica. Oklo nos dice que no deberíamos esperar encontrar una tasa similar de variación en épocas más recientes, a 2000 millones de años en el pasado, pero quizá una variación semejante podría existir y tener efectos observables en las etapas muy tempranas de la historia del Universo. Los cuásares se remontan a lo largo de un 80 por 100 de

³⁹⁰ En el futuro, nuevos interferómetros atómicos pueden ofrecer una mejora sobre el límite de Prestage. La resolución experimental actual de esta tecnología es sensible a cambios en α de aproximadamente 10^{-8} durante 1-2 horas. En el futuro puede adaptarse para poner a prueba la constancia de α . No obstante, no hay perspectiva inmediata de que se acerque a los niveles de precisión astronómica. Motivado por los nuevos cálculos de física atómica de V. Dzuba y V. Flambaum, *Phys. Rev. A* 61, 1 (2000), Torgerson ha discutido el potencial de las cavidades ópticas para ofrecer medidas mejoradas de la estabilidad de α con el tiempo (ver *Physics/0012054* [2000]). Espera que los experimentos de laboratorio sean pronto sensibles a variaciones temporales del orden de 10^{-15} por año.

la historia del Universo, pero podemos ver mucho más atrás que eso sondeando las microondas que quedaron del comienzo de la expansión del Universo. Esto es lo que normalmente se denomina radiación de fondo cósmico de microondas, y dejó de interactuar con la materia cuando el Universo tenía sólo unos pocos millones de años. Mientras que los cuásares que estamos observando tienen desplazamientos al rojo hasta un valor de 3,5, la radiación de microondas fue emitida efectivamente con un desplazamiento al rojo de 1100. Su estructura nos está dando una instantánea de la forma y uniformidad del Universo cuando sólo tenía 300 000 años (ver figura 12.5).

Últimamente los astrónomos han generado titulares de prensa en todo el mundo al cartografiar esta radiación con exquisito detalle mediante receptores a bordo de globos o satélites. Sabemos que la radiación tiene el espectro de la radiación térmica pura con una aproximación muy alta y su temperatura es la misma en diferentes direcciones del cielo con una precisión de aproximadamente una parte en cien mil.

Los mapas detallados que se están construyendo de la estadística de sus variaciones de temperatura en el cielo guardan los secretos de cómo eran las galaxias y los cúmulos en su extrema juventud, cuando eran poco más que islas embrionarias de material ligeramente más denso que el resto del Universo a su alrededor.

Por desgracia, éste no parece ser un diagnóstico claro y simple del valor de la constante de estructura fina cuando se transmitieron las microondas hacia nosotros.

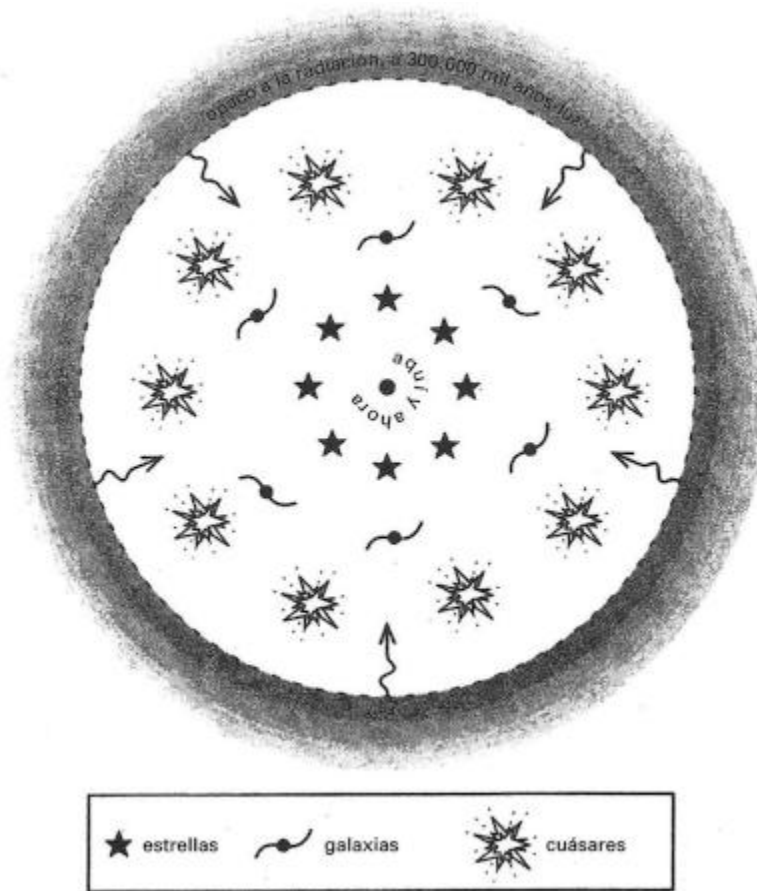


Figura 12.5. Mirando al espacio (y hacia atrás en el tiempo) alcanzamos la época en que se formaron los cuásares. Más allá, alcanzamos la superficie en donde la radiación de fondo era opaca y todos los átomos eran desintegrados por la radiación térmica. Esto sucedió cuando el Universo sólo tenía unos 300 000 años y era mil veces más pequeño que hoy.

Sin embargo, motivados por nuestros resultados de los cuásares, varios equipos de cosmólogos han llevado a cabo una complicada reconstrucción de cómo debería ser la pauta estadística de fluctuaciones en el cielo si α tuviera un valor diferente para un valor de desplazamiento al rojo de 1100. Tienen que utilizar las teorías

más razonables de cómo afectan las fluctuaciones que darán lugar a las galaxias sobre la pauta de temperatura de las microondas en el cielo. Lo interesante es que ellos afirman que los datos más recientes se entienden algo mejor si hay un valor menor de la constante de estructura fina para este alto desplazamiento hacia el rojo³⁹¹. La magnitud del cambio requerido es enorme —un 10 por 100³⁹²— y requeriría una caída continua del valor de α a medida que retrocedemos en el tiempo desde la época del cuásar hasta el momento de la última dispersión de la radiación de microondas. Ésta no es una prueba muy convincente dado el Gran Número de variantes en la imagen global para la formación de las galaxias. Hay demasiados otros pequeños efectos en la pauta de temperaturas, todos muy razonables, que producen un efecto global similar al atribuible a un valor menor de la constante de estructura fina. Sin más información sobre lo que buscar, no parece un camino muy prometedor para descubrir el valor de la constante de estructura fina en el pasado. Pero las cosas pueden cambiar. Durante 2002 el satélite Microwave Anisotropy Probe (MAP) de la NASA enviará nuevos mapas de todo el cielo de la radiación de fondo de microondas y su pauta de variaciones. La precisión sin precedentes

³⁹¹ P. P. Avelino *et al.*, *Phys. Rev. D* 62, 123508 (2000) y R. Battye, R. Crittenden y J. Weller, *Phys. Rev. D* 63, 043505 (2001).

³⁹² Puesto que la sensibilidad de las observaciones de la anisotropía de la temperatura de las microondas es de aproximadamente 2×10^{-5} y la última dispersión es de aproximadamente hace catorce mil millones de años, utilizando nuestra mejor estimación de la edad, no podríamos obtener un límite sobre la variación temporal de α a partir de estos datos que sea mejor que $(2 \times 10^{-5}) / (14 \times 10^9 \text{ años}) \approx 1,4 \times 10^{-15}$ por año.

esperada de este instrumento puede permitir que se extraigan nuevas conclusiones a principios de 2003³⁹³.

§. Nuestro lugar en la historia

Ese gallo parecía una persona impaciente. Como alguien que viviera en la ciudad, alguien que siempre pareciera tener mucho que hacer, pero nunca hacía nada sino atender a su propia prisa. La vida no era así en el pueblo: aquí todo se movía tan lentamente como la propia vida. ¿Por qué deberían apresurarse las personas cuando las plantas que les alimentaban crecían tan lentamente?

HENNING MANKELL³⁹⁴

³⁹³ Los primeros resultados del análisis de los datos enviados por WMAP (la W se añadió al nombre inicial de la misión en homenaje a David Wilkinson, uno de sus promotores, fallecido en septiembre de 2002) se publicaron en febrero de 2003. Estos resultados muestran un espectro de fluctuaciones gaussiano y (aproximadamente) invariante frente a escala que coincide con las predicciones de los modelos inflacionarios más generales. El Universo estaría compuesto de un 4 por 100 de materia bariónica, un 23 por 100 de materia oscura no bariónica y un 73 por 100 de energía oscura. Además, los datos dan una edad para el Universo de $13,7 \pm 0,2 \times 10^9$ años, y un tiempo de $379 + 8 \times 10^3$ años para el instante en que se liberó la radiación cósmica de fondo. Otro resultado importante es que las primeras estrellas se formaron sólo 200 millones de años después del Big Bang, mucho antes de lo que se pensaba hasta ahora. Todavía no se han hecho públicos los resultados del análisis de una segunda serie de datos, pese a que su aparición estaba prevista para la primavera de 2004. (Para más detalles, ver <http://lambda.gsfc.nasa.gov>.) (*N. del t.*)

³⁹⁴ H. Mankell, *Sidetracked*, Harvill Press, Londres, 2000, p. 3.

Si las constantes de la Naturaleza están cambiando lentamente, podíamos estar en una pendiente hacia la extinción. Hemos aprendido que nuestra existencia explota muchas coincidencias peculiares entre los valores de diferentes constantes de la Naturaleza, y que los valores observados de las constantes caen dentro de algunas ventanas de oportunidad muy estrechas para la existencia de vida. Si los valores de dichas constantes están cambiando realmente, ¿qué podría suceder? ¿No podrían salirse del intervalo que permite que exista vida? ¿Hay épocas concretas en la historia cósmica en que las constantes son las correctas para la vida?

Hay dos situaciones en las que es posible examinar con cierto detalle los cambios en las constantes tradicionales. En efecto, sólo cuando la «constante» de estructura fina, α , o la «constante» gravitatoria de Newton, G , están cambiando tenemos una teoría completa que incluye los efectos de los cambios. Estas teorías son generalizaciones³⁹⁵ de la famosa teoría de la relatividad general creada por Einstein en 1915. Nos permiten extender nuestra imagen de cómo se comportará un Universo en expansión para incluir variaciones de dichas constantes. Si sabemos algo sobre la magnitud de una variación en una época, podemos utilizar la teoría para calcular qué debería verse en otros momentos. De esta

³⁹⁵ La teoría que incluye una G variable es la teoría Brans-Dicke de la gravitación, encontrada por Carl Brans y Robert Dicke, *Physical Review* 124, p. 924 (1961). Una teoría cosmológica que incluye una α variable fue encontrada por Håvard Sandvik, J. Magueijo y por mí mismo en 2001 (*Phys. Rev. Lett.* 88, 031302 [2002]), ampliando desarrollos de Jacob Bekenstein, *Physical Review D* 65, 063504 (2002).

manera, la hipótesis de que las constantes están variando se hace mucho más vulnerable al ataque observacional.

Si constantes como G y α *no* varían con el tiempo, entonces la historia estándar de nuestro Universo tiene una apariencia sencilla a grandes rasgos. Durante los primeros 300 000 años la energía dominante en el Universo es la radiación y la temperatura es mayor de 3000 grados, demasiado caliente para que existan átomos o moléculas. El Universo es una enorme sopa de electrones, fotones de luz y núcleos.

Llamamos a ésta la «era de radiación» del Universo. Pero al cabo de unos 300 000 años hay un gran cambio. La energía de la materia alcanza y supera a la de la radiación. El ritmo de expansión del Universo está ahora dictado básicamente por la densidad de núcleos atómicos de hidrógeno y helio. Pronto la temperatura cae lo suficiente para que se formen los primeros átomos y moléculas sencillos. Durante los siguientes 13 000 millones de años se forman una serie de estructuras más complicadas: galaxias, estrellas, planetas y, finalmente, personas. Esta se denomina la «era de la materia» de la historia del Universo. Pero la era de la materia no podría continuar directamente hasta el presente. Si el Universo se está expandiendo suficientemente rápido entonces, al final, la materia no importa, y la expansión continúa y escapa de las garras deceleradoras de la gravedad, como un cohete lanzado desde la Tierra con una velocidad mayor que la de escape. Cuando esto sucede decimos que el Universo está «dominado por la curvatura»

porque la rápida expansión crea una curvatura negativa para el espacio astronómico, parecida al asiento de una silla de montar.

Hay tres trayectorias que puede seguir un Universo en expansión (ver p. 194). El Universo «cerrado» se expande demasiado lentamente para superar los efectos deceleradores de la gravedad y finalmente vuelve a colapsar a una gran densidad. El Universo «abierto» tiene mucha más energía de expansión que la deceleración gravitatoria y la expansión continúa para siempre. El mundo intermedio, que a menudo se denomina el Universo «plano» o «crítico», mantiene un equilibrio perfecto entre energía de expansión y gravedad y sigue expandiéndose para siempre. Hoy nuestro Universo está sorprendentemente próximo a este estado crítico o «plano».

Otra posibilidad es que la energía de vacío del Universo pueda llegar finalmente a dominar los efectos de la materia ordinaria y hacer que la expansión del Universo empiece a acelerarse. De forma notable, las observaciones astronómicas actuales muestran que nuestro Universo puede haber empezado a acelerarse muy recientemente, cuando tenía aproximadamente tres cuartas partes de su edad actual. Además, estas observaciones implican que su expansión no ha llegado a estar dominada por la curvatura. La pauta general de la historia de la expansión desde que tenía aproximadamente un segundo de edad se muestra en la figura 12.6. Las observaciones nos están diciendo que aproximadamente el 70 por 100 de la energía del Universo está ahora en la forma de vacío que actúa para

acelerar la expansión mientras que casi todo lo demás está en forma de materia.

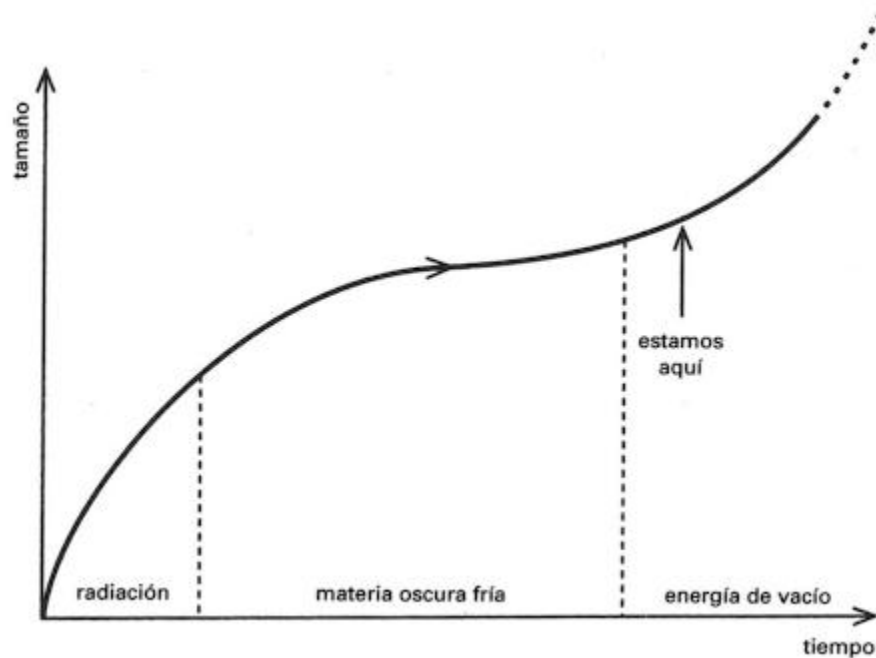


Figura 12.6. Las tres eras distintivas en la historia de un Universo en expansión como el nuestro, que parece tener aproximadamente un 70 por 100 de su energía actual en una forma desconocida de energía de vacío que actúa para acelerar la expansión. La expansión de semejante Universo tiene tres eras distintas, dominadas por radiación, materia oscura fría y energía de vacío.

¿Qué sucede con esta historia si cambia la constante de estructura fina? La expansión queda prácticamente inalterada por las variaciones en la constante de estructura fina si éstas son tan pequeñas como sugieren las observaciones —un millón de veces más lentas que la expansión del Universo— pero la expansión afecta drásticamente a cómo cambia la «constante» de estructura fina.

Håvard Sandvik, João Magueijo y yo investigamos lo que sucedería con la constante de estructura fina durante miles de millones de años de historia cósmica. Las conclusiones fueron bastante sorprendentes pero llamativamente simples. Durante la era de radiación no hay ningún cambio importante. Pero una vez que empieza la era de la materia, cuando el Universo tiene unos 300 000 años, el valor de la constante de estructura fina empieza a *aumentar* muy lentamente³⁹⁶. Cuando empieza una era de curvatura, o la energía de vacío empieza a acelerar el Universo, dicho incremento se detiene. Esta peculiar historia característica se muestra en la figura 12.7 para un Universo con valores de materia, radiación y energía de vacío iguales a los que observamos hoy en nuestro Universo.

Resulta intrigante. Da una imagen que encaja muy bien todas las pruebas. Nuestro Universo empezó a acelerarse con un desplazamiento al rojo de aproximadamente 0,5, de modo que no habrá ninguna variación importante de la constante de estructura fina en la época del reactor de Oklo. En el intervalo de desplazamientos al rojo correspondiente a las observaciones de cuásares, las variaciones pueden ser de la forma que se ve, y se predice que α es menor en el pasado: precisamente lo que vemos. Si seguimos retrocediendo hasta el desplazamiento al rojo de aproximadamente 1100, donde la radiación de microondas empieza a volar libremente hacia nosotros, predecimos que la variación de α

³⁹⁶ Aumenta en proporción al logaritmo de la edad del Universo; para más detalles ver J. D. Barrow, H. Sandvik y J. Magueijo, «The Behaviour of Varying-alpha Cosmologies», *Physical Review D* 65, 063504 (2002).

debería ser mucho menor que la sensibilidad de las observaciones actuales.

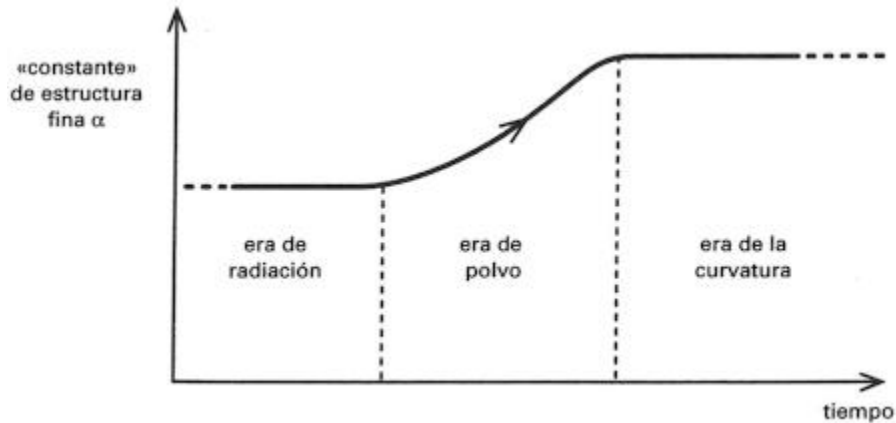


Figura 12.7. Cambio esperado en la «constante» de estructura fina en un Universo como el nuestro: la «constante» deja de cambiar cuando el Universo empieza a acelerar y sólo cambia muy lentamente durante el período de dominación por la materia fría.

Si estas variaciones están teniendo lugar realmente a medida que se expande el Universo, tienen consecuencias para la evolución de la vida. Sabemos que si la «constante» de estructura fina se hace demasiado grande, entonces átomos y moléculas no podrán existir y no podrán formarse estrellas porque sus centros son demasiado fríos para iniciar reacciones nucleares autosostenidas.

Es por lo tanto crucial que la era de polvo de la historia cósmica durante la cual aumenta la constante de estructura fina no dure demasiado. Sin la energía de vacío o la curvatura para detener el incremento continuo en el valor de la constante de estructura fina, llegaría un momento en que la vida no sería posible. El Universo

dejaría de ser habitable por formas de vida basadas en átomos que dependen de estrellas para su energía.

Algo similar ocurre si puede haber variaciones en la intensidad de la gravedad, representada por la «constante» G de Newton. Durante la era de radiación tiende a permanecer constante, pero cuando empieza la era de materia su valor inicia un descenso hasta que empieza la era de curvatura. Si el Universo no experimenta nunca una era de curvatura, la gravedad sigue haciéndose cada vez más débil y se hace cada vez más difícil la existencia de planetas y estrellas. Este comportamiento se muestra en la figura 12.8.

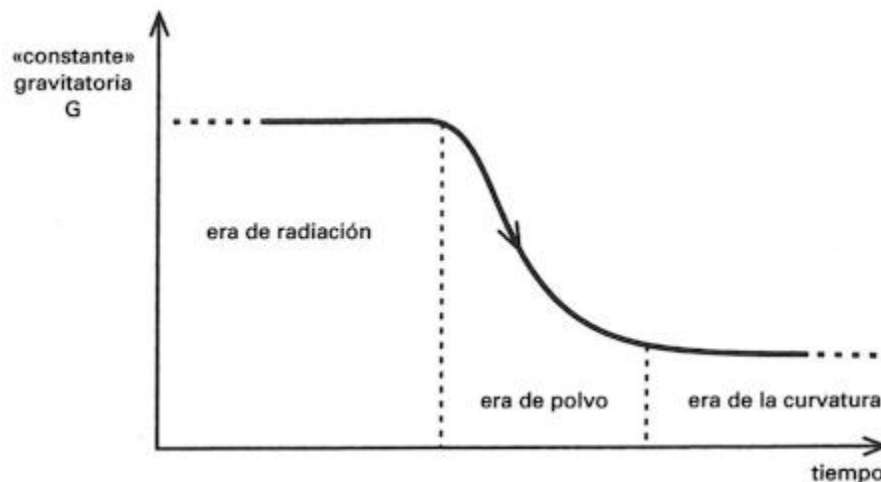


Figura 12.8. Comportamiento típico de una «constante» gravitatoria variable durante la historia cósmica en teorías cosmológicas que permiten que ocurran tales cambios. La intensidad de la gravedad sólo cambia significativamente durante la era en que la materia oscura fría («polvo») domina el Universo y es mantenida constante por los efectos de la radiación o la curvatura espacial que dominan la expansión del Universo.

Esta evolución general es muy intrigante. Muestra que incluso cuando se permite que varíen las constantes, éstas sólo pueden explotar esta libertad para variar cuando el Universo está en la era de materia. Si están variando, el Universo se halla en un nicho de la historia en que los valores de las constantes permiten la existencia de átomos, estrellas y planetas.

Siempre ha sido un poco misterioso por qué nuestro Universo está hoy tan próximo al estado crítico de expansión y por qué la energía de vacío es tan fantásticamente pequeña. Sabemos que si estuviéramos demasiado lejos del ritmo de expansión crítico, hubiera sido mucho menos probable que la vida hubiera evolucionado en la Tierra, y probablemente sería imposible en cualquier otro lugar del Universo. Si los universos están demasiado dominados por la curvatura, la expansión se hace tan rápida que las islas de materia no pueden superar el efecto de la expansión y contraerse para formar galaxias y estrellas. Por el contrario, si el Universo se expande demasiado lentamente, pronto colapsa de nuevo en un Big Crunch. Islas densas de materia se forman demasiado rápidamente y caen dentro de grandes agujeros negros antes de que las estrellas y la bioquímica tengan oportunidad de formarse (ver figura 9.2).

Lo mismo sucede con la energía del vacío. Si fuera diez veces mayor, habría empezado a acelerar la expansión del Universo tan pronto en su historia que galaxias y estrellas no hubieran podido independizarse de la expansión general.

Ambos argumentos nos muestran que no debería sorprendernos encontrar que las desviaciones del ritmo de expansión crítico no sean grandes, o que hay una energía de vacío nula en el Universo. Si así fuera no estaríamos aquí. Pero la posibilidad de constantes que varían nos ofrece una razón posible de por qué el Universo no podría ser observado por nosotros en un estado exactamente crítico y no tener energía de vacío³⁹⁷. La energía de vacío y la curvatura son las zapatas de los frenos del Universo que reducen las variaciones en las constantes de la Naturaleza. Detienen el cambio de las constantes. Si sus variaciones no se frenaran, alcanzarían valores que impiden la existencia de átomos, núcleos, planetas y estrellas. El Universo llegaría con el tiempo a ser inerte, incapaz de contener los bloques constituyentes de complejidad. Entonces la vida, como todas las cosas buenas, debería llegar a un final.

³⁹⁷ J. D. Barrow, H. Sandvik y J. Magueijo, «Anthropic Reasons for Non-zero Flatness and Lambda», *Physical Review D* 65, 123501 (2002).

Capítulo 13

Otros mundos y grandes preguntas

*¡Oh mundo de muchos mundos!
¡Oh vida de vidas! ¿Cuál es tu
centro? ¿Dónde estoy yo?*

WILFRED OWEN³⁹⁸

§. Multiversos

*La aparente unicidad del Universo
depende básicamente del hecho de
que podemos concebir muchas
alternativas para él.*

CHARLES PANTIN³⁹⁹

Nuestras excursiones por los nuevos senderos que han abierto los intentos de entender y explicar los valores de las constantes de la Naturaleza plantean muchas grandes preguntas sobre la Naturaleza de las cosas. Hemos visto que los cosmólogos contemplan activamente la Naturaleza de «otros mundos» en los que las constantes de la Naturaleza toman valores diferentes que en el nuestro. Parece que cambios muy pequeños en muchas de nuestras constantes harían la vida imposible. Esto plantea la cuestión más profunda de si estos otros mundos «existen» en algún sentido y, si

³⁹⁸ W. Owen, «O world of many worlds», *The Collected Poems of Wilfred Owen 1893-1918*, Chatto & Windus, Londres, 1963.

³⁹⁹ C. Pantin, «Life and the Conditions of Existence», en *Biology and Personality*, ed. I. T. Ramsey, Blackwell, Oxford, 1965, p. 94; ver también C. F. A. Pantin, «Organic Design», *Advances in Science* 8, p. 138 (1951).

es así, qué los hace diferentes del mundo que vemos y conocemos. También ofrece una alternativa al viejo argumento de que el aparente buen ajuste del mundo para que posea todas aquellas propiedades requeridas para la vida es prueba de alguna forma de diseño especial. Pues si existen todas las alternativas posibles, debemos encontrar necesariamente habitando en una de las que permiten que exista vida. Y podríamos ir aún más lejos y aventurar la conjetura de que podríamos esperar encontrar en el tipo más probable de Universo que sustenta vida⁴⁰⁰. La primera persona que parece haber expresado este enfoque de muchos mundos fue el biólogo de Cambridge Charles Pantin, quien trató de encontrar un contexto más atractivo para reflexionar sobre propiedades especiales de la estructura, constantes y leyes del Universo introduciendo la idea de un conjunto de muchos mundos, cada uno de ellos con una serie diferente de propiedades físicas:

Si pudiéramos saber que nuestro propio Universo era sólo uno entre un número indefinido con propiedades cambiantes quizá podríamos invocar una solución análoga al principio de selección natural; que sólo en ciertos universos, entre los que se incluye el nuestro, se dan las condiciones apropiadas para la existencia de vida, y a menos

⁴⁰⁰ El problema de añadir sustancias a la palabra «probable» es un problema profundo y difícil. Cada intento de definir la probabilidad de forma precisa para problemas cosmológicos y dar así respuestas numéricas a preguntas como «¿cuál es la probabilidad de que el Universo tenga ciertas propiedades que permitan que exista vida en él?» ha fracasado hasta ahora. Técnicamente, éste es el problema matemático de definir una medida de probabilidad. La dificultad está simplemente en no saber cuáles son los resultados igualmente probables cuando se trata de evaluar el conjunto de todas las posibles condiciones de partida para el Universo o todos los posibles resultados de la teoría del Universo inflacionario caótico. Los problemas se acentúan por el problema de definir «cuándo» se aplican las probabilidades de un modo universal para cualquier lugar en el Universo. Hay considerable investigación sobre este problema actualmente pero sigue sin estar resuelto.

que se satisfaga esta condición no habrá observadores para advertir el hecho⁴⁰¹.

Una de las dificultades de concebir siquiera semejante multiverso de todos los universos posibles es que hay muchas cosas que podrían ser diferentes. De nuestro estudio de las matemáticas sabemos que existen lógicas diferentes a la que utilizamos en la práctica, en la que los enunciados son o verdaderos o falsos. Análogamente, hay diferentes estructuras matemáticas; diferentes leyes de la Naturaleza posibles; diferentes valores para las constantes de la Naturaleza; diferentes números de dimensiones de espacio y de tiempo; diferentes condiciones de partida para el Universo; y diferentes resultados aleatorios para secuencias complejas de sucesos. Frente a ello, la colección de todos los mundos posibles tendría que incluir, como mínimo, todas las permutaciones y combinaciones posibles de estas diferentes cosas. Obtener una comprensión de esta cornucopia es pedir demasiado.

Ya hemos visto lo que podría suceder si se realizaran algunos de los otros mundos posibles, mundos con más dimensiones u otros valores de las constantes cruciales. Sin embargo, no sabemos si estos diferentes mundos son realmente posibles. Está muy bien contemplar cambios en las constantes de la Naturaleza y las cantidades que definen la forma y tamaño del Universo. Pero ¿hay realmente universos alternativos permitidos o son tan posibles como los círculos cuadrados? Podría ser que la teoría de todo sea muy restrictiva cuando se trata de dar permisos de planificación para

⁴⁰¹ C. Pantin, «Life and the Conditions of Existence», *op. cit.* p. 104. Nótese que aunque Pantin menciona «una solución análoga al principio de selección natural», él no la desarrolla.

otros universos. El hecho de que podamos concebir tantos universos alternativos, definidos por otros valores de las constantes de la Naturaleza, quizá sea simplemente un reflejo de nuestra ignorancia acerca de la camisa de fuerza sobre la consistencia lógica que exige una Teoría de Todo.

Cuando se trata de contemplar otros universos hay dos formas de abordar el problema. Existe la aproximación conservadora que produce mundos alternativos haciendo pequeños cambios en las propiedades de nuestro mundo; pequeños cambios en los valores de algunas de las constantes de la Naturaleza, propiedades ligeramente diferentes del Universo astronómico, quizá, pero no cambios en las propias leyes de la Naturaleza. Normalmente estos estudios muestran que si los «pequeños cambios» son demasiado grandes hay consecuencias adversas para la existencia de vida tal como la conocemos. Nuestro tipo de vida puede seguir existiendo si hubiera un cambio de una parte en cien mil millones en el valor de la constante de estructura fina, pensamos nosotros⁴⁰², pero no si hubiera un cambio de una parte entre diez. Por el contrario, la aproximación radical piensa en grandes cambios, donde pueden alterarse cosas como las leyes, la lógica matemática subyacente o el número de dimensiones de espacio y de tiempo. Tiene que concebir tipos de «vida» completamente nuevos que podrían existir en

⁴⁰² Podríamos estar equivocados en esto si la Teoría de Todo contuviera alguna interrelación de constantes que tuviera la propiedad de que un cambio de una parte en cien mil millones en la constante de estructura fina produjera un cambio de, digamos, una parte en dos de alguna otra constante crítica para la vida.

ambientes completamente diferentes⁴⁰³. Esto suscita un examen más detallado de lo que se entiende por «vida». Normalmente se reduce a algunos componentes esenciales, como la capacidad de procesar y almacenar información (si usted es un científico de computadores), la capacidad de evolucionar por selección natural (si usted es un biólogo), o simplemente el flujo de energía fuera del equilibrio (si usted es un químico).

Como ejemplo de la aproximación radical, consideremos la búsqueda de «vida» en los formalismos matemáticos que yo propuse en cierta ocasión⁴⁰⁴. Consideremos la jerarquía de todas las estructuras matemáticas posibles, partiendo de simples colecciones finitas de puntos relacionados por reglas, luego geometrías, luego sistemas de recuento como la aritmética de los números enteros, luego las fracciones, luego los decimales, luego estructuras complejas y grupos y así sucesivamente, avanzando y subiendo indefinidamente, en una escala ascendente de complejidad. Preguntemos ahora cuál de estas estructuras puede describir completamente seres conscientes. Pues si tomáramos los axiomas de uno de estos sistemas lógicos, y luego desarrolláramos poco a poco todas las verdades que pueden deducirse de ellos, utilizando las reglas de deducción prescritas, veríamos una gran madeja de verdades lógicas extendida ante nosotros. Si esa madeja de verdad

⁴⁰³ Si la vida no es nada más que un subproducto de alcanzar un nivel muy alto de complejidad, entonces quizá pueda haber vida en el espacio de velocidades o en la fábrica de la estructura del espacio-tiempo o en las escalas atómica, nuclear o de las partículas elementales como una extensión asintótica de las búsquedas actuales por crear nanotecnologías.

⁴⁰⁴ J. D. Barrow, *Pi in the Sky*, Oxford University Press y Vintage, Nueva York, 1992, pp. 280-292. [Hay traducción española: *La trama oculta del Universo*, Crítica, Barcelona, 1996]. Para un desarrollo ver también M. Tegmark, «Is the “Theory of Everything” merely the Ultimate Ensemble Theory?», *Annals of Physics* (NY) 270, 1 (1998).

lleva finalmente a estructuras que describen completamente lo que llamamos «consciencia», entonces podría decirse que «está viva» en cierto sentido. La pregunta es: ¿en qué sentido?

Otra manera de verlo es pensar en la creación de un modelo o una simulación por ordenador del proceso mediante el que se forman estrellas y planetas. Esto es algo que los astrónomos se afanan en hacer. La formación de estrellas es demasiado complicada de entender con todo detalle utilizando sólo papel y lápiz y cálculo humano directo. Se necesita una rápida solución por ordenador de las ecuaciones que la gobiernan. Imaginemos que en el futuro lejano estas simulaciones se han hecho extraordinariamente precisas. Describen cómo se forman las estrellas y generan descripciones de planetas que encajan muy estrechamente con lo que vemos. Estimamos que este problema está «resuelto». Un bioquímico entusiasta sugiere que vayamos un poco más lejos e introduzcamos en el ordenador montones de información sobre bioquímica y geología de modo que podamos seguir las predicciones del ordenador sobre la temprana evolución química de un planeta y su atmósfera. Cuando se hace esto los resultados son muy interesantes. El ordenador describe la formación de moléculas autorreplicantes que empiezan a competir entre sí y a hacer cosas complicadas sobre la superficie del joven planeta. Aparecen hélices de ADN y empiezan a formar las bases de replicantes genéticos. La selección empieza a tener un impacto y los replicantes mejor adaptados se multiplican y mejoran muy rápidamente, extendiendo sus proyectos por toda la superficie habitable. El programa del

ordenador sigue ejecutándose más y más tiempo. Finalmente, parece que algunas estructuras del programa están enviando señales a otras y almacenando información. Han desarrollado un sencillo código y lo que podríamos llamar una aritmética, que se basa en la simetría (octolateral) que poseen los replicantes más grandes. Los programadores están fascinados por este comportamiento, sin haber sospechado nunca que pudiera surgir de su programación original. El comportamiento de los replicantes es como un código, y al principio no es demasiado difícil de romper. Los patrones visibles en el resultado del ordenador desarrollan una lógica simple para la comunicación. Una grabación en vídeo del resultado hace que parezca una película de historia natural sobre la evolución de la vida.

Esta pequeña fantasía muestra de qué forma es concebible que el comportamiento que podríamos estimar consciente pudiera emerger de una simulación por ordenador. Pero si preguntamos dónde «está» este comportamiento consciente parece que nos vemos empujados a decir que vive en el programa. Es parte del software que se está ejecutando en la máquina. Consiste en una colección de deducciones muy complejas («teoremas») que se siguen de las reglas de partida que definen la lógica de la programación. Esta vida «existe» en el formalismo matemático.

Estos ejemplos tratan de captar un aspecto de la vida como un programa de ordenador. Son sospechosamente poderosos porque llevan a la conclusión de que si la «vida», adecuadamente definida, puede existir en un formalismo matemático, entonces existe en el

sentido más pleno⁴⁰⁵. No es muy diferente del famoso argumento ontológico de san Anselmo para referirse a la existencia necesaria de Dios.

El problema con tales argumentos ontológicos de ordenador, que permiten que la vida se sitúe dentro de formalismos matemáticos, es que equiparan la existencia matemática a la existencia física. La existencia física es algo de lo que tenemos experiencia. Probablemente no podemos definirla pero, como muchas cosas que nos resultan difíciles de definir, la reconocemos cuando la vemos. La existencia matemática es algo mucho más débil, pero mucho más fácil de definir. La existencia matemática sólo significa coherencia lógica: esto es todo lo que se necesita para que un enunciado matemático sea «verdadero». Así, los triángulos rectángulos «existen» en el sistema de la geometría de Euclides. Los círculos cuadrados no.

Un enunciado matemático verdadero no necesita ser interesante; no necesita ser corto; no necesita ser nuevo. Simplemente no debe

⁴⁰⁵ Podríamos preguntar si hay algún umbral de complejidad en el que se hace posible que la vida sea descrita dentro de un formalismo matemático. El único umbral evidente ocurre cuando alcanzamos la complejidad de la aritmética. En este punto es posible la auto-referencia. Allí puede haber una correspondencia uno a uno entre aritmética y enunciados sobre aritmética (esto no es posible con estructuras más simples como las geometrías). Autómatas celulares como el juego de la vida de John Conway resultan ser equivalentes a la aritmética en su estructura lógica. Es interesante que cuando alcanzamos la complejidad de la aritmética, la propiedad de incompletitud de Gödel se hace una propiedad del sistema. Algunos autores, en especial John Lucas y Roger Penrose, han sugerido que esta propiedad podría ser una característica esencial de la consciencia. Si es así, entonces el umbral de complejidad que se cruza cuando alcanzamos la aritmética sería el nivel mínimo necesario para que aparezca procesamiento de información consciente dentro del sistema lógico. Es interesante comparar este bajo umbral para la complejidad auto-referencial en los sistemas lógicos con el bajo umbral para la generación de complejidad en autómatas celulares discretos discutido por Stephen Wolfram en *A New Kind of Science*, Wolfram Media Inc., Champaign, IL, 2002. Algoritmos unidimensionales sencillos con reglas de primeros vecinos pueden generar niveles de complejidad que no pueden superarse añadiendo dimensiones extra, reglas más complejas, perturbaciones aleatorias o promedios.

llevar a una contradicción lógica con las reglas lógicas que se están utilizando⁴⁰⁶. Estos universos matemáticos pueden ser imaginarios en muchos sentidos. Algunos, como el matemático Godfrey Hardy (1877-1947), han pensado que algunos de ellos son más atractivos que el real:

Los universos «imaginarios» son mucho más bellos que este Universo «real» construido de forma estúpida; [pero] la mayor parte de los productos más finos de la fantasía de un matemático aplicado deben ser rechazados, nada más crearlos, por la razón suficiente y brutal de que no encajan con los hechos⁴⁰⁷.

Una posible objeción para obtener mundos que soportan vida como resultados de un gran código de ordenador es que parece haber muchos más formalismos matemáticos que no llevan a la vida que los que sí lo hacen. Pero eso está muy bien. Nuestro argumento antrópico nos ha enseñado que debemos encontrarlos en uno de los que soportan vida. Sin embargo, existe un problema más sutil. Hay también un número infinito de universos que poseen la estructura ordenada y sujeta a leyes que vemos a nuestro alrededor hasta el momento presente, pero que se comportarán de una forma completamente diferente o ilegal de ahora en adelante. Parece por consiguiente mucho más probable que vivamos en un Universo

⁴⁰⁶ Si en un sistema lógico hay un enunciado falso, éste puede utilizarse para demostrar la verdad de cualquier enunciado (como $0 = 1$). Es famosa la respuesta que dio Bertrand Russell a un reto para demostrar que su interlocutor era el Papa si $1 = 2$: usted y el Papa son dos pero si $2 = 1$, entonces usted y el Papa son uno.

⁴⁰⁷ G. H. Hardy, *A Mathematician's Apology*, Cambridge University Press, 1967, p. 135. [Hay traducción española: *Apología de un matemático*, Nivola, Madrid, 1999].

donde falla nuestra creencia en que el Sol saldrá mañana⁴⁰⁸. Si hay tantos mundos posibles en los que el Sol no sale mañana pero en los que todo lo demás es igual que en nuestro mundo que soporta vida hasta la salida del Sol mañana, ¿qué deberíamos deducir si el Sol no sale mañana?

Esta no es la paradoja que parece a primera vista. Requiere alguna forma de evaluar la probabilidad de las diferentes historias. El método más apropiado quizá no sea contarlas simplemente. Las historias que son ordenadas hasta un momento y luego divergen en caos requieren una especificación que las hace menos probables en el espacio de todas las posibilidades que las que continúan en el mismo estado ordenado de soporte de vida.

Estos otros mundos son más bien platónicos. Su existencia no deriva de lo que queramos considerar como existencia «real». Es virtual más que real. De algún modo la vida en un formalismo matemático o dentro de un programa de ordenador no está viviendo realmente. Aunque quizá todos los procesadores de información conscientes de estos formalismos experimenten ilusiones similares de grandeza y unicidad. Pero supongamos que tienen razón y pasemos a algunos conjuntos más concretos de otros mundos.

§. El gran catálogo universal

*El Universo no es más que una
idea fugaz en la mente de Dios;
éste es un pensamiento muy*

⁴⁰⁸ Esta fe en que el futuro será como el presente es lo que los filósofos llaman problema de inducción.

incómodo, especialmente si acabas de pagar la entrada de una casa.

WOODY ALLEN⁴⁰⁹

Los cosmólogos han considerado de qué maneras podrían aparecer algunos de los conjuntos de otros mundos. En general, brotan de la aproximación conservadora a la creación de otros mundos que introdujimos antes. Consideremos un pequeño número de cambios en el Universo que conocemos, que dejan las leyes invariables pero alteran los valores de sus constantes o sus dimensiones. Ya hemos visto el caso del Universo inflacionario en sus versiones caótica y eterna. Diferentes regiones grandes de nuestro único Universo, que pueden ser de tamaño infinito, pueden encontrarse con diferentes densidades promedio, diferentes ritmos de expansión o incluso números diferentes de grandes dimensiones espaciales y diferentes fuerzas de la Naturaleza, como resultado de la aleatoriedad intrínseca de los procesos que inician la inflación. La inflación puede haber empezado y terminado en diferentes momentos en diferentes lugares. El resultado sería un Universo que contiene regiones diferentes en donde las condiciones serían muy diversas y los valores de algunas de las constantes definitorias que son esenciales para la vida podrían tomar valores también diferentes (ver figura 13.1).

⁴⁰⁹ W. Allen, *Getting Even*, Random House, Nueva York, 1971, p. 33.

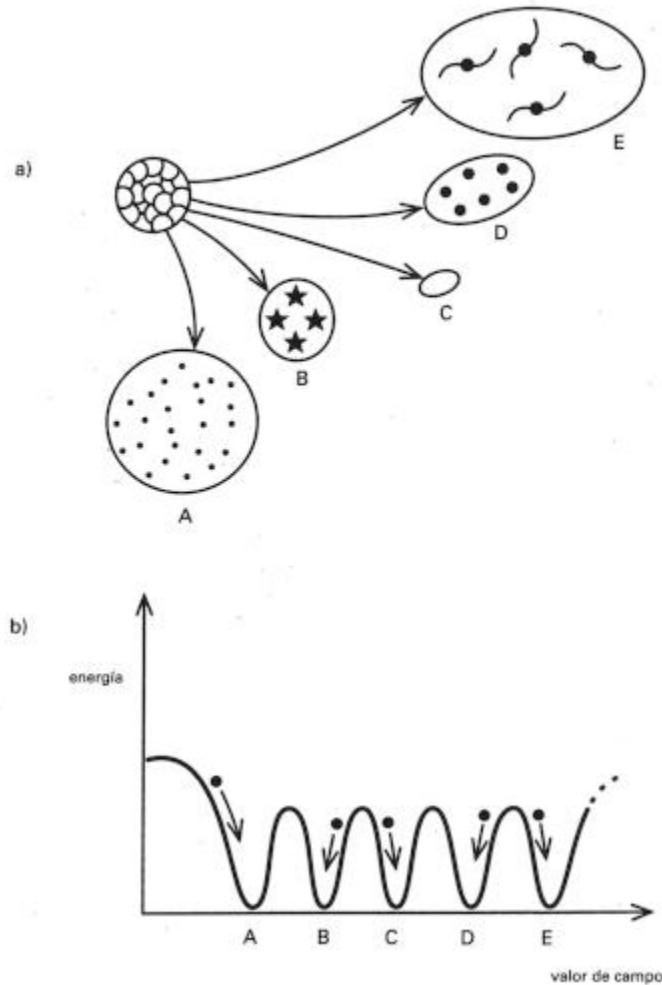


Figura 13.1. (a) Un Universo en que diferentes regiones experimentan una cantidad de inflación diferente, dando lugar a condiciones diferentes, (b) El estado energético más bajo para el material del Universo al final de la inflación puede no ser único. El Universo puede terminar en mínimos diferentes en lugares diferentes. Como resultado el número y la intensidad de las fuerzas de la Naturaleza serán diferentes en lugares diferentes dependiendo de qué mínimo se alcanzó para la materia en esa localización.

Es mucho más probable que estas regiones sean muy grandes, mucho mayores que nuestro Universo visible. La inflación expande

muy fácilmente regiones pequeñas haciéndolas grandes, y así es muy probable que la frontera de nuestro dominio sea muchísimo más grande que lo que podemos ver del Universo. Pero un día nuestros descendientes podrían ver cómo una de estas regiones en las que las cosas son diferentes se acerca al horizonte astronómico, aniquilando materia lejana, distorsionando la expansión del Universo y engullendo estrellas y galaxias.

Si se contempla la versión eterna de la inflación, el conjunto de posibilidades se amplía aún más, y tenemos que vemos como una fluctuación local en un proceso interminable que explora todas las permutaciones de las condiciones, constantes y dimensiones cósmicas que están abiertos a él. Sólo en algunos será posible la vida.

Una característica interesante de estos conjuntos inflacionarios es que no nos piden que creamos en un multiverso de otros mundos de estatus dudoso. No son mundos paralelos ni mundos imaginarios, y quizá ni siquiera son mundos meramente hipotéticos. Lo que cuenta como un «mundo» es tan sólo una región muy grande de nuestro único Universo. Y si nuestro Universo es infinito en extensión, entonces el número de alternativas que puede generar la inflación quizá sea también infinito. Si agota todas las posibilidades lógicas de variación que hay disponibles, cualquier posibilidad que pueda existir existirá en algún lugar, y no sólo una vez sino a menudo

infinitamente. Una cosa que podemos decir con certeza sobre esta idea es que, si es verdadera, no puede ser original⁴¹⁰.

Hay otras maneras más triviales de generar numerosas posibilidades diferentes dentro de nuestro único Universo. La Naturaleza crea complejidad rompiendo las simetrías de las leyes de la Naturaleza en los productos de dichas leyes. Así, en este momento, usted está situado en un lugar concreto del Universo incluso si las leyes de la gravedad y el electromagnetismo, de las que usted es un producto complicado, no tienen preferencia por ningún lugar en el Universo. Conforme el Universo se expande y se enfría en sus fases más tempranas hay un número de ocasiones en que las simetrías se rompen. En unos lugares se romperá de una manera, y en otros de otra. Estos productos aleatorios pueden tener consecuencias de gran alcance para la evolución de la vida en el futuro. Un ejemplo típico de ruptura de simetría vital es el que da lugar al equilibrio entre materia y antimateria en el Universo primitivo. Como resultado, el desequilibrio entre materia y antimateria que se necesita para impedir que todo se aniquile más adelante dando radiación variará de un lugar a otro. Si sucediera antes de que ocurra la inflación, entonces una región que tuviera preponderancia de materia se inflaría y se convertiría en una región enorme que contiene a nuestro Universo visible. Si sucediera después de la inflación, nuestra porción visible del Universo podría

⁴¹⁰ Si olvidamos la inflación como creadora de diversidad y sólo suponemos que el Universo es infinito y aleatorio, entonces en algún lugar, infinitamente a menudo, deben aparecer grandes regiones que tienen propiedades que soportan la vida. Tendríamos que habitar en una de ellas. Sin embargo, las grandes regiones ordenadas serían mucho menos probables que las pequeñas y la inflación ofrece un mecanismo para explicar por qué grandes regiones ordenadas se generan con alta probabilidad.

contener regiones con equilibrios diferentes de materia y antimateria. Una vez más, tenemos un vehículo para crear grandes regiones dentro de un único Universo donde algunas características que son críticas para la existencia de vida pueden variar significativamente de un lugar a otro.

La descripción cuántica del Universo nos enseña que todas las cosas sustantivas que vemos y experimentamos como partículas o agregados de materia tienen una cualidad ondulatoria. Dicha cualidad expresa la probabilidad de que manifiesten ciertas propiedades observables. Uno de los descubrimientos interesantes hechos por los físicos que luchan con el problema de crear una descripción cuántica del Universo entero es que las condiciones de partida para el Universo parecen desempeñar un papel crucial en la transición de propiedades ondulatorias a sustantivas.

Nos hemos acostumbrado a la idea de que la Naturaleza ondulatoria e indefinida de las partículas de materia es algo que ocurre en el reino de lo muy pequeño. Cuando las cosas se hacen grandes, esta ondulatoriedad cuántica se hace pequeña y despreciable. Podríamos tener que preocuparnos de ello cuando hacemos física atómica pero no tenemos que hacerlo cuando estamos conduciendo un automóvil. Sin embargo, parece que esta cualidad sustantiva de nuestra experiencia —que hay comportamiento definido y no-cuántico de las cosas— no está garantizada en todos los universos que aumentan y envejecen. Parece que son necesarias condiciones de partida especiales para que esto suceda. En muchos mundos nuestras cualidades familiares como posición, energía, momento y tiempo

nunca emergerán de una forma bien definida y, sospechamos, no habrá el tipo de organización compleja que llamamos vida.

La búsqueda moderna de una Teoría de Todo ofrece también lugar para otros mundos. A menudo se imagina que la Teoría de Todo final especificará todas las constantes de la Naturaleza, pero esto se ve ahora mucho menos probable. Parece que sólo una fracción de las constantes de la Naturaleza estará absolutamente determinada por la lógica interna inflexible de la teoría mientras que las otras serán libres para tomar diferentes valores que se escogen en un proceso aleatorio de ruptura de simetría. Como vimos en el capítulo 8, enfrentados a esta apertura, tenemos que dirigimos a la selección antrópica para explicar por qué vemos los valores que vemos en los estrechos espectros que soportan vida.

Hasta ahora nos hemos contentado con crear conjuntos de otros mundos jugando con partes del nuestro y explotando su propensión natural a hacer que las cosas sean de forma diferente en un lugar y otro. Es el momento de ser más especulativos y considerar algunas de las maneras en que podrían variarse las constantes de la Naturaleza y llenar el conjunto de todas las posibilidades saliendo de las ligaduras de las teorías de la física más habituales y entrando en el dominio de las posibilidades más especulativas.

§. Mundos sin fin

Universos a la deriva como burbujas en la espuma del Río del Tiempo.

*ARTHUR C. CLARKE*⁴¹¹

Antes de que saliera a la luz el carácter auto-reproductor del Universo inflacionario eterno⁴¹² se sugirió que sería posible iniciar inflación en una parte del Universo forzando colisiones concretas de alta energía entre partículas elementales⁴¹³. El escenario inflacionario eterno se basa realmente en la expectativa de que no es necesario forzar nada. El Universo provee los continuos estallidos de inflación sin ayuda inteligente o desastre no inteligente.

Ahora bien, ¿qué pasa si el Universo se está reinventando eternamente en brotes de inflación? Quizá han existido civilizaciones superavanzadas en regiones que se inflaron en el pasado que *sabían* cómo iniciar la inflación y controlar sus consecuencias. Si es así, podrían ser capaces de sintonizar los productos de la inflación de modo que fueran ventajosos para la existencia continua de vida. El cosmólogo británico Edward Harrison ha especulado⁴¹⁴ con la idea de que tales seres iluminados decidirían hacer la próxima edición del Universo mejor adaptada para la vida que aquellas dentro de las que ellos mismos habían evolucionado. Si este proceso de sintonización continuara durante muchas generaciones de inflación eterna, entonces esperaríamos

⁴¹¹ A. C. Clarke, «The Wall of Darkness», en *Super Science Stories*, recogidas en *The Other Side of the Sky*, Signet, Nueva York, 1959, capítulo 4. Esta historia fue escrita en 1946 y publicada por primera vez en 1949.

⁴¹² A. Linde, «The Self-reproducing Inflationary Universe», *Scientific American* 5, 32 (mayo de 1994).

⁴¹³ La motivación para descubrir si esto es posible es evitar el hacerlo por accidente.

⁴¹⁴ E. R. Harrison, «The Natural Selection of Universes Containing Intelligent Life», *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* 36, p. 193 (1995). Aunque el autor llama al inteligente ajuste de las constantes de la Naturaleza «selección natural» de universos, es en realidad selección «antinatural» o «reproducción forzada» de universos con características deseadas.

que las «coincidencias» en apoyo de la vida que se dan entre los valores de las constantes controlables de la Naturaleza se hagan cada vez mejor sintonizadas. Quizá, sugiere Harrison, por eso las encontramos así. Por atractivo que pueda parecer este diseño inteligente de universos, no está claro cómo se inició. Si los universos empiezan con constantes alejadas de los valores que permiten que se desarrolle complejidad, nunca desarrollarán los seres conscientes necesarios para el ajuste fino de las constantes. Tendrán que depender de fluctuaciones aleatorias para dar un Universo capaz de desarrollar seres suficientemente inteligentes que ajusten sus constantes.

El físico americano Lee Smolin⁴¹⁵ ha sugerido otro esquema interesante en que las constantes de la Naturaleza también se desarrollan bajo alguna influencia externa. El sugiere que cada vez que se forma un agujero negro en el Universo hay lugar para que emerja un nuevo Universo paralelo de la misteriosa singularidad que se desarrolla en su centro. Todo lo que es capturado por un agujero negro termina por caer inexorablemente en esta singularidad de su centro. En lugar de desaparecer en un olvido intemporal, el material que desaparece vuelve a nacer como un nuevo Universo en expansión con sus valores de las constantes de la Naturaleza ligeramente cambiados de una forma aleatoria⁴¹⁶.

⁴¹⁵ L. Smolin, *The Life of the Cosmos*, Oxford University Press, Nueva York, 1995.

⁴¹⁶ Esta idea de que las constantes de la Naturaleza son «reprocesadas» cuando la materia colapsa en una singularidad de densidad infinita, por ejemplo cuando un Universo cerrado colapsa y rebota a un estado de expansión, fue sugerida por primera vez por John A. Wheeler; ver por ejemplo el último capítulo de C. Misner, K. Thorne y J. A. Wheeler, *Gravitation*, W. H. Freeman, San Francisco, 1972.

A largo plazo este escenario lleva a expectativas definidas. Si el colapso de materia en agujeros negros siempre genera nuevos universos, entonces cuantos más agujeros negros pueda producir un Universo más descendencia tendrá para llevar información sobre su propio «código genético»: los valores de sus constantes de la Naturaleza definitorias. Finalmente, dice el argumento, esperaríamos encontrarlos viviendo en un Universo en el que las constantes han evolucionado hacia una serie de valores que maximizan la producción de agujeros negros. Cualquier cambio pequeño en los valores observados de las constantes haría así *más difícil* producir agujeros negros.

Ésta representa, no obstante, tan sólo una de las conclusiones que podrían extraerse de este escenario. A partir de nuestras consideraciones antrópicas podemos ver que podría darse el caso de que universos con constantes que toman valores maximizadores de la producción de agujeros negros no puedan contener observadores vivos en absoluto. Una aplicación del principio antrópico es por ello esencial. Sólo podemos predecir que deberíamos encontrarlos en un Universo con constantes cuyos valores maximizan la producción de agujeros negros, dado que también deben ser posibles los observadores conscientes. Y ése puede ser un tipo de Universo muy diferente.

Otra posibilidad a largo plazo es que no exista ningún máximo local para la producción de agujeros negros cuando las constantes cambien de valor. Puede haber una dirección de cambio para algunas constantes que permita que la producción de agujeros

negros siga haciéndose cada vez mayor indefinidamente. También en este caso podemos decir muy poco sobre los valores últimos de las constantes de la Naturaleza⁴¹⁷.

Esto sugiere otra forma en que podría generarse un conjunto de otros mundos con constantes diferentes a partir de nuestro Universo. Si un Universo contiene materia suficiente para contraerse de nuevo sobre sí mismo y experimentar un Big Crunch en el futuro, entonces lo que ocurre en el Crunch es un misterio. Físicamente no es muy diferente del centro de un agujero negro. Quizá el Universo, junto con el espacio y el tiempo y las leyes de la Naturaleza, llega simplemente a un final y no hay nada después de esto. Pero los cosmólogos siempre han estado tentados a creer que el Universo en colapso podría «rebotar», como un ave fénix, en un estado de expansión. Si es así, la conclusión natural a extraer es que el Universo seguirá oscilando para siempre entre estados de expansión y contracción, como en la figura 13.2. La gran pregunta es: ¿qué cambia, si es que cambia algo, cuando ocurre un rebote? ¿Está la pizarra limpia o da alguna información sobre el viejo ciclo que ha originado al nuevo?

⁴¹⁷ Esto es bastante parecido al estado a largo plazo para un sistema evolucionista, mientras que la situación en que se alcanza un máximo local con respecto al valor de las constantes es similar a alcanzar una estrategia evolutivamente estable, en la que cualquier desviación de este estado deja al menos a uno de los jugadores peor de lo que estaba; ver por ejemplo J. Maynard Smith, *Evolutionary Genetics*, Oxford University Press, Londres, 1989.

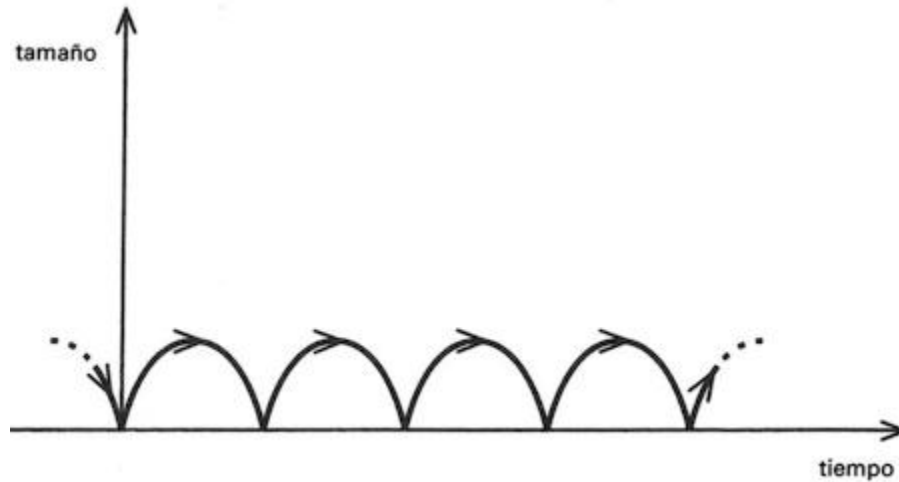


Figura 13.2. Un Universo oscilante en el que el colapso en un Big Crunch futuro viene seguido de una reexpansión en un nuevo ciclo, y así sucesivamente para siempre.

Podría ser, como sugirió al principio John Wheeler, que los valores de las constantes de la Naturaleza se vuelvan a barajar cada vez que ocurre un rebote⁴¹⁸. Esto crearía una secuencia inacabable de universos en expansión y contracción en los que las constantes son diferentes. Sólo podríamos existir en aquellos ciclos en los que el «acuerdo» de las constantes da una permutación que permite que exista vida. Por desgracia, no tenemos ninguna idea de cómo ligar los valores de las constantes de un ciclo con las del siguiente. Cuando se trata de las propiedades del Universo como un todo, hay un factor grande que desempeñará un papel dominante. Si las constantes cambian a una permutación que no permite que el Universo colapse de nuevo en un Big Crunch, el juego terminará y el Universo quedará atascado con un puñado de constantes que

⁴¹⁸ Evidentemente este escenario requiere que el Universo sea cerrado de modo que pueda colapsar en el futuro.

nunca se volverán a negociar. Evidentemente, éste es el estado más probable en el que pueda encontrarse el Universo. Si ha habido un número infinito de oscilaciones del Universo en el pasado y existe cualquier posibilidad de encontrar una permutación que acabe con las oscilaciones, entonces, con el tiempo, se dará dicha permutación y las oscilaciones terminarán⁴¹⁹.

A los cosmólogos les gusta imponer un elemento preferido de continuidad en la evolución ciclo-a-ciclo. Es la segunda ley de la termodinámica, el principio según el cual el desorden («entropía») nunca decrece con el paso del tiempo. Si este principio se mantiene de un ciclo a otro y la energía se conserva⁴²⁰, esto hace que los ciclos aumenten continuamente de tamaño (figura 13.3)⁴²¹.

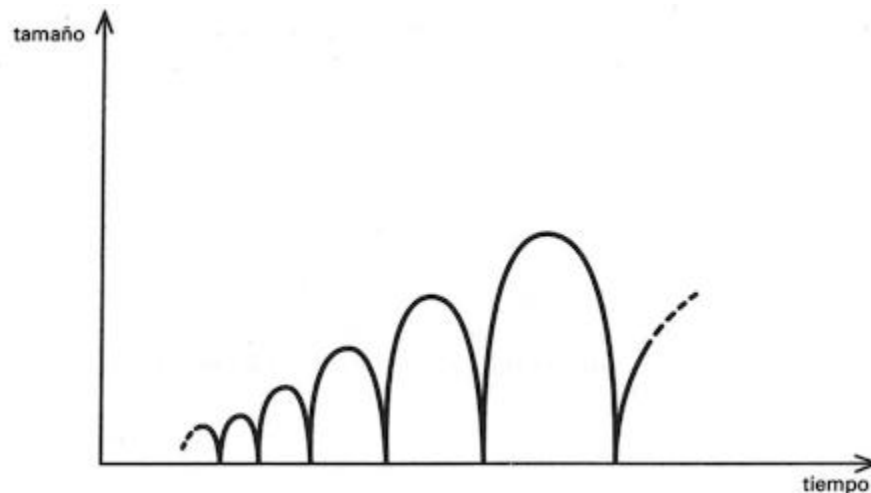


Figura 13.3. El incremento de la entropía hace que los ciclos sucesivos aumenten de tamaño si la energía se conserva.

⁴¹⁹ Suponiendo que no hay ninguna otra forma de que las constantes cambien sus valores distinta de cambiar en una singularidad.

⁴²⁰ La energía total del Universo en cualquier ciclo es en realidad cero.

⁴²¹ Esto fue advertido por primera vez en dos artículos del cosmólogo americano R. C. Tolman, «On the Problem of the Entropy of the Universe as a Whole», *Physical Review* 37, p. 1639 (1931) y «On the Theoretical Requirements for a Periodic Behaviour of the Universe», *Physical Review* 38, p. 1758 (1931).

Esto es bastante interesante porque a largo plazo el Universo llegará cada vez más cerca del estado de expansión crítica para cuya explicación se invocó la inflación. Pero hay un giro adicional en la historia. Mariusz Dabrowsky y yo⁴²² demostramos que si hay una energía de vacío cósmica que actúa para acelerar la expansión del Universo, como sugieren observaciones actuales, siempre llevará a la secuencia de oscilaciones a un final y dejará el Universo en una trayectoria en expansión acelerada en el futuro (figura 13.4).

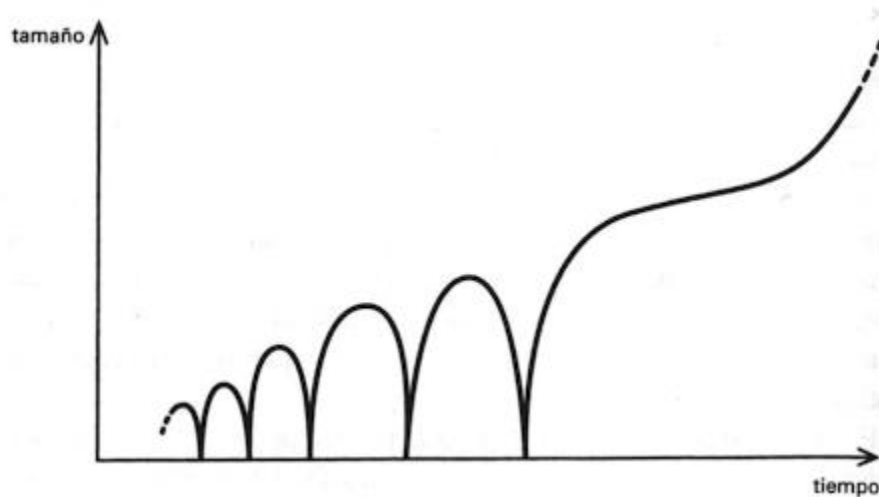


Figura 13.4. Si hay una pequeña constante cosmológica positiva los ciclos llegarán con el tiempo a un final, dejando que el Universo se expanda para siempre, acelerado por la influencia de la constante cosmológica.

El resultado final es siempre dejar el Universo atrapado en su último acuerdo de constantes expandiéndose en un estado con un

⁴²² J. D. Barrow y M. Dabrowski, «Oscillating Universes», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 275, p. 850 (1995).

fino equilibrio entre la tensión de la energía de vacío y todas las demás formas de materia del Universo, un poco como en nuestro propio Universo, de hecho.

§. Fin del viaje

Hasta la revolución científica del siglo XVII el significado fluía desde nosotros hacia el mundo; después de ella, el significado fluía desde el mundo hacia nosotros.

CHET RAYMÓ⁴²³

Nuestra mirada a las constantes de la Naturaleza empezó con lo más trivial pero nos ha llevado a las fronteras de nuestro Universo e incluso más allá, a un multiverso de otros mundos cuya existencia vemos sólo tenuemente reflejada en la del nuestro. La búsqueda de patrones que fueran humanamente convenientes y locales llevó al descubrimiento de patrones sobrehumanos y universales. Nuestro descubrimiento de las pautas con las que funciona la Naturaleza y las reglas por las que cambia nos llevó a los misteriosos números que definen la fábrica de todo lo que existe. Las constantes de la Naturaleza dan a nuestro Universo su sensación y su existencia. Sin ellas, las fuerzas de la Naturaleza no tendrían intensidades; las partículas elementales de materia no tendrían masa; el Universo no tendría tamaño. Las constantes de la Naturaleza son el último

⁴²³ C. Raymo, *Skeptics and True Believers*, Random House, Nueva York, 1999, p. 221.

baluarte contra el relativismo desenfrenado. Definen la fábrica del Universo de una manera que puede superar los prejuicios de una visión de las cosas centrada en el hombre. Si entráramos en contacto con una inteligencia en otro lugar del Universo, miraríamos primero hacia las constantes de la Naturaleza para tener una base común. Hablaríamos primero sobre esas cosas que las constantes de la Naturaleza definen. Las sondas que hemos lanzado al espacio exterior con información sobre nosotros y nuestro lugar en el Universo eligen las longitudes de onda que definen el átomo de hidrógeno para decir dónde estamos y lo que sabemos. Las constantes de la Naturaleza son potencialmente la mayor experiencia física compartida por seres inteligentes en cualquier lugar del Universo. Pero, conforme hemos seguido las autopistas y vericuetos de la búsqueda para descubrir su significado e importancia, hemos cerrado un círculo. Sus arquitectos las veían como un medio de elevar nuestra comprensión del Universo por encima de los antropomorfismos de la construcción humana para revelar la otredad de un Universo no diseñado para nuestra conveniencia. Pero estas constantes universales, creadas por la unión de realidades cuánticas y relativistas, han subrayado nuestra propia existencia de maneras que son a la vez misteriosas y maravillosas. Pues son sus valores, medidos con precisión cada vez mayor en nuestros laboratorios pero aún inexplicados por nuestras teorías, los que hacen del Universo un lugar habitable para mentes de cualquier tipo. Y es a través de sus valores como la unicidad de

nuestro Universo se imprime sobre nosotros por la facilidad con la que podemos pensar en alternativas menos satisfactorias.

¿Explicaremos alguna vez los valores de todas las constantes de la Naturaleza? Hasta ahora, la respuesta es poco clara, aunque presenta formas sugerentes. Nuestras más profundas teorías de las fuerzas y pautas de la Naturaleza sugieren que una teoría de todo abrirá una oportunidad. No todo quedará fijado por la mano inerte de la consistencia lógica. Hay algunas constantes que tienen la libertad de ser diferentes; que están escogidas al azar; y que podrían privar al Universo de vida y de luz para siempre si cayesen en el lado equivocado en lugar de en el correcto.

¿Y qué pasa con la Naturaleza misma de estas constantes? ¿Son verdaderamente constantes —las mismas ayer, hoy y siempre— o son meramente variables y fluyen lentamente con las mareas del tiempo? Cuando miramos con nuestros instrumentos más finos hemos empezado a ver los primeros indicios reveladores de un cambio en una de nuestras constantes de la Naturaleza más reverenciadas durante miles de millones de años de historia cósmica. ¿Qué significa esto para nuestra comprensión del rompecabezas que reunimos en nuestra imagen del Universo? ¿Cambiarán las constantes y destruirán las coincidencias entre sus valores en el futuro, dejando el árbol de la vida sin hojas y sin vida en el futuro muy lejano? ¿Están relacionadas nuestras constantes con el ritmo de expansión general de nuestro Universo o son verdaderamente constantes, aisladas de la evolución de la complejidad, la vida y el remolino de estrellas y galaxias gravitantes

que nos rodea? ¿Evolucionan y cambian de un ciclo a otro de un Universo en una historia que no tiene principio ni fin, que recorre todas las posibilidades, que genera un multiverso de mundos posibles, cada uno consistente en sí mismo, pero en su mayoría privados de vida e inconscientes de su propia existencia?

Estas grandes preguntas surgieron a partir de cuestiones menores. Paso a paso hemos ampliado nuestra visión de la realidad física, hemos profundizado en la red de eslabones entre sus partes que se diferenciaban en la superficie, y hemos encontrado que el Universo está modelado por nada más que números. Y los números son cosas que entendemos, en parte. Para algunos, esto puede suponer una decepción. Pero aunque las constantes de la Naturaleza sean números, no son simplemente números ni tampoco son sólo números. Son los códigos de barras de una realidad última, los números de identificación que desvelarán los secretos del Universo... algún día.

El autor

John Barrow, profesor de astronomía en la Universidad de Sussex, nació en Londres en 1952. Graduado en matemáticas en la Universidad de Durham, y doctorado en Astrofísica en la Universidad de Oxford.

Desde 1981 se desempeñó como profesor de astronomía en la Universidad de Sussex. En 1999 pasó a ser catedrático de matemáticas y de física teórica en la Universidad de Cambridge.

Ha escrito más de 325 artículos científicos sobre la astrofísica y cosmología, y ha publicado quince libros que exploran las implicaciones culturales y filosóficas del trabajo científico en la cosmología y la astrofísica.



Entre las obras más notables del profesor Barrow se encuentran: *El Principio Cosmológico Antrópico* (1988); *El mundo dentro del mundo* (1990); *Teorías del Todo* (1991); *Pi en el cielo* (1992); *La mano izquierda de la Creación* (1994); *El origen del Universo* (1994); *El universo como obra de arte* (1995); y *Las constantes de la naturaleza* (2002).