



**ASTROFÍSICA, RELATIVIDAD Y MECÁNICA CUÁNTICA
PARA INGENIEROS INQUIETOS**

GRANDES DESAFÍOS DE LA FÍSICA. EL HOMBRE Y EL COSMOS



Structuralia

Este documento es de uso único e intransferible para el alumno matriculado en el curso. Cualquier reproducción física o digital del documento sin permiso de los autores vulnera los derechos de propiedad intelectual de los mismos.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	3
1. GRANDES DESAFÍOS DE LA FÍSICA. EL HOMBRE Y EL COSMOS.....	4
1.1 Grandes desafíos de la física	4
1.1.1. El origen de todo. El Big Bang.....	5
1.1.2. El problema de la masa inercial.	13
1.1.3. La estructura interna e intrínseca de la materia ¿Qué es la materia?.....	14
1.1.4. Infinita divisibilidad del espacio y el tiempo	15
1.1.5. El problema del determinismo	19
1.1.6. El trilema de Munchausen y el teorema de Gödel. Todos los sistemas de pensamiento flotan sin apoyo	23
1.1.7. El misterio de las matemáticas.....	28
1.1.8. La teoría del caos	61
1.2 El gran misterio de la entropía. La tendencia al desorden.....	75
1.2.1. La segunda ley de la termodinámica.....	76
1.2.2. La dinámica newtoniana.....	79
1.2.3. Qué es exactamente la entropía	80
1.2.4. Una disposición muy especial	87
1.2.5. La vida es extraordinariamente ordenada ¿No es una violación de la segunda ley?	92
1.3 El Principio Antrópico.....	100
1.3.1. El principio antrópico débil.....	102
1.3.2. Teoría del ajuste fino. El Principio Antrópico Fuerte	150
1.3.3. La solución de los multiversos.....	174
1.3.4. La filosofía de las causas finales.....	178
2. APÉNDICE. CÁLCULO DE LA ENTROPÍA DE UN AGUJERO NEGRO. HAWKING.	200

1. GRANDES DESAFÍOS DE LA FÍSICA. EL HOMBRE Y EL COSMOS

Antes de entrar de lleno en el capítulo 4, donde analizaremos la mecánica cuántica que es, sin duda alguna, el gran desafío de la ciencia actual¹, creo conveniente tener en cuenta que la física no es, ni mucho menos, un producto terminado.

Los físicos teóricos se afanan por encontrar una teoría unificada que dé respuesta a cualquier fenómeno que se da en el universo, pero lamentablemente existen aún retos gigantescos y la mecánica cuántica no acaba de encajar con la relatividad.

Pero, además, como veremos en este capítulo, hay otros muchos aspectos misteriosos por resolver. Haremos a continuación un repaso a algunos de estos misterios no resueltos, deteniéndonos en los que a mí me parecen más interesantes, en especial, el misterio de la entropía y el principio antrópico, que son, además, los dos grandes misterios filosóficos desde la antigüedad:

- El misterio de la existencia del orden.
- El misterio de la existencia del hombre.

1.1 Grandes desafíos de la física

En este apartado veremos como la ciencia moderna ha ido intentando dar respuesta a muchas de las preguntas que atormentaban a los griegos hace 2.500 años. Veréis que algunas de ellas siguen sin una respuesta convincente.

Hablaremos del origen del universo, del problema de la materia, del misterio del orden matemático y nuestra capacidad para entenderlo, de la búsqueda de una base cierta a partir de la cual comenzar a construir un sistema científico (de manera que no hagamos razonamientos en círculo), de la infinita divisibilidad del espacio y el tiempo y de la teoría del caos.

Según vayamos avanzando en los distintos desafíos le iremos dedicando algo más de tiempo, porque propongo ir de menos a más... Cada vez se irá poniendo todo esto más interesante.

¹ Y no solo de la ciencia, diría que también de la filosofía y del sentido común.

1.1.1. El origen de todo. El Big Bang

¿Cómo comenzó todo?

Esta es sin duda una de las preguntas que el hombre se cuestiona desde que tiene conciencia de sí mismo. Vamos a explicar muy sucintamente como la ciencia moderna ha dado con una teoría que parece acertada para explicar el origen de todo el universo. Pero verás que ¡no siempre fue aceptada!

Los antiguos griegos consideraban que el mundo era eterno. Nunca tuvo un comienzo, y no tendrá un final. Algunos pensaban que quizás podría ser cíclico, pero la idea de “creación” de cero era totalmente extraña a su cultura.

Es Agustín de Hipona, en el siglo IV, el primero que desarrolla la idea de la creación simultánea del espacio y el tiempo

“¿Quién no entiende que no habría existido el tiempo si no fuera formada la criatura, que sufriera algún cambio, algún movimiento? ... La sagrada escritura, sumamente veraz, afirma que al principio creó Dios el cielo y la tierra, que nada existía antes, ..., sin duda no fue hecho el mundo en el tiempo, sino con el tiempo... Y no podía haber nada pasado, puesto que no había criatura alguna por cuyos movimientos mudables se realizase el tiempo.... El mundo, en efecto, se hizo con el tiempo”. (San Agustín. Confesiones)

Pero el primero filósofo que argumentó racionalmente la imposibilidad de un universo con un pasado eterno fue el egipcio cristiano Filópono, en el siglo VI. Su argumento me parece bastante inteligente. Considera que el infinito es inabarcable en la realidad, es solo una “idea” que en la realidad no tiene cabida. Por tanto, si ahora mismo hay un tiempo presente, es obligado que haya habido un inicio de todo en el pasado. Si el pasado hubiera sido eterno, nunca habríamos alcanzado el tiempo presente. En el siglo XIII san Alberto Magno soporta de nuevo esta tesis. Esto fue confirmado por el gran matemático Hilbert en 1925 *“el infinito no existe por ningún lado en la realidad. Es solamente un concepto matemático (...) solamente una idea”* (Hilbert). Esto implicaría también que no puede existir tampoco lo infinitamente pequeño ni lo infinitamente grande, ni en el espacio, ni en el tiempo. Veremos en este capítulo del curso algo sobre esto cuando hablemos del griego Zenón, discípulo de Parménides.

Pero, por otra parte, el propio Parménides, en relación con el tema que nos ocupa, ya había afirmado en el siglo VI a.C. *“de la nada absoluta nada puede salir”*.

Este seguía siendo el estado de la cuestión hasta el mismísimo siglo XX. Una vez publicada la teoría de la relatividad, Einstein, influido quizás por la antigua filosofía griega, había dado por hecho que el universo era estable y eterno. No tenía un inicio. Pero no solo él, en realidad toda la comunidad científica consideraba que esto era lo más natural, y lo filosóficamente “sostenible”. El universo debía ser inmutable, infinito y eterno, sin límites en el espacio ni en el tiempo. De hecho, que existiera un inicio del universo planteaba problemas filosóficos y metafísicos bastante problemáticos, porque planteaba la pregunta de ¿cómo se habría producido ese inicio? ¿por qué? ¿cómo puede surgir algo de la nada?

Además, los avances de la física y la química ya habían demostrado que la materia, como la energía, ni se crea ni se destruye, solo se transforma. La cantidad de energía y materia del universo debía ser siempre constante. Pero si todo comenzó con un inicio, esto supondría que, en ese comienzo, se creó la materia y la energía de la nada, y eso incumpliría esta ley fundamental.

Ya en el siglo XIX Clausius había propuesto el segundo principio de la termodinámica, del que hablaremos en detalle en otro apartado de este capítulo, dada su enorme importancia. Según este principio, cualquier proceso natural aumenta el desorden. De acuerdo con esto, Clausius afirmó que el universo acabaría con una “muerte térmica” que supondría el desorden total. Pero también sospechaba que debía de haber habido un inicio del universo, porque si la entropía (desorden) siempre crece, y aún seguimos viendo las cosas muy ordenadas, entonces el universo no podía haber existido desde la eternidad.

Pero esta tesis del inicio del universo encajaba muy mal en la mentalidad filosófica y científica occidental de finales del siglo XIX, que básicamente era materialista. El 21 de marzo de 1869 Friedrich Engels alertaba a Karl Marx “*el estado de gran calor original a partir del cual todo se enfría es absolutamente inexplicable; es incluso una contradicción y esto presupone la existencia de Dios*”. Esto era inadmisibles para las tesis del materialismo marxista.

En 1909 el gran físico sueco y premio nobel Svante Arrhenius escribía “*si las ideas de Clausius fueran exactas, esa muerte calorífica ya tendría que haber ocurrido desde los tiempos infinitos en que existe el mundo. No se puede suponer que haya habido un comienzo, ya que la energía no se puede crear. Por consiguiente, es totalmente incomprensible*”.

Un universo con un inicio no encajaba, y tampoco encajaba el segundo principio de la termodinámica.

En 1917 Einstein, confundido por sus propios prejuicios, había introducido un “truco” en sus ecuaciones de la relatividad general (la “constante cosmológica”) para que las soluciones matemáticas dieran un resultado **de estabilidad** al universo, le parecía lo lógico. De esta manera quedó tranquilo, el universo seguía siendo eterno, pero fue, según reconocería mucho más tarde, “el mayor error de su carrera”. Y es que, en realidad, ningún científico es capaz de abstraerse totalmente de sus pensamientos “*a priori*”, es decir, de su ideología personal, su religión, o su planteamiento particular existencial.

En 1922 el ruso Alexander Friedmann repasó una por una todas las fórmulas de Einstein y se percató del truco de la constante cosmológica. Observó que, en realidad, no había necesidad alguna de incorporar esa constante en las ecuaciones, y las resolvió, pero esta vez sin ese artificio. Llegó a la conclusión de que las ecuaciones de la relatividad general conducían naturalmente a un universo en evolución, de hecho, sugerían un universo en expansión. Einstein reaccionó muy contrariado: “*¡Esta circunstancia de una expansión me irrita! ¡Admitir tales posibilidades parece insensato!*”. Y es que un universo en expansión a lo largo de toda su historia, como sugerían estos resultados, suponía un inicio en un punto. Einstein considera que los cálculos son equivocados y en una revista de prestigio afirma que “*la solución propuesta no satisface las ecuaciones de campo*”. Friedmann no se da por vencido y le escribe una carta personal; “*me permito presentarle mis cálculos (..) si los encuentra correctos, ¿tendría por favor la gentileza de informar a los editores? En tal caso, quizás podría rectificar su nota*”. El 21 de marzo de 1923 Einstein admitirá en la misma revista que tuvo “*un error de cálculo*”.

Pero esta aceptación le supondrá a Einstein muchos problemas en una Alemania que comenzaba por entonces a estar revuelta. Los científicos alemanes, premios nobel de física, Stark y Lenard, se proponen reducir a la nada la teoría de la relatividad que daba lugar a la idea absurda de una “creación” y la consideraban por esto una “física judía” incompatible con la “pura física aria”. Algo más tarde van más lejos y en una conferencia en la sala de la Filarmónica de Berlín se proponen “*limpiar la física de una vez por todas de las teorías judías de Einstein*”.

En ese mismo año de 1923, en la rusa soviética, Friedmann da un paso más en sus teorías de un universo en expansión. En su obra “El universo como espacio y tiempo” propone que el universo tuvo un comienzo en el que estaba contraído todo “*en un punto y luego, a partir de ese punto, había aumentado de radio*”.

Pero esto resultó intolerable para el gobierno bolchevique ruso dirigido por Lenin, cuyo totalitarismo obligaba a la creencia materialista radical, que suponía una materia y un universo

eterno. El régimen considera que estos supuestos son “*enemigos del estado bolchevique*”. Desde el invierno de 1923 Friedmann comienza a ser acosado y aparecen miembros de la policía política armados en sus clases. Cuatro de sus estudiantes (que serán luego eminencias de la física, entre ellos Tamarkin y Gamow) están dispuestos a plantarles cara.

En 1924 Friedmann ya es vigilado día y noche por la policía política, y en 1925 muere en circunstancias sospechosas de una extraña “fiebre tifoidea”. Gamow reconocerá más tarde que estaba convencido de que su maestro murió víctima de un complot. Tamarkin, convencido de que él sería el siguiente, abandona ese mismo año la Unión Soviética. Gamow no lo logró, aún.

Mientras tanto, en 1927 Lemaitre, un sacerdote católico de Bélgica resolvió para el mundo occidental las ecuaciones de la relatividad de Einstein, y como hizo Friedmann en el mundo soviético, concluyó que eran compatibles con la expansión del universo y sugirió que todo el universo tuvo un comienzo. Lo llamó la “Teoría del átomo Primigenio” o “el huevo cósmico”.



Lemaitre

Justo en ese año de 1927 se reunieron los más importantes científicos del mundo en el congreso Solvey (Bruselas)². Einstein, y un gran número de científicos, aún ridiculizaban la posibilidad de que el universo hubiera tenido un comienzo. En relación con las tesis de Lemaitre decía “*sus cálculos son exactos, pero su intuición física es abominable*”. Sus tesis las despreciaba como “*física de curas*”, “*No, eso no, ¡sugiere demasiado la creación!*”.

² Veremos la importancia que tuvo también este encuentro para la mecánica cuántica

Por su parte Eddington consideraba esta tesis “*absurda e increíble*”, hasta el punto de que se sentía “*indignado de que alguien pudiera creer en ello*”, “*filosóficamente me resulta repugnante la noción de un comienzo al orden presente de la naturaleza*”.

Pocos años después, ya vimos que los experimentos de Slipher y Hubble (1929-31) habían demostrado que la mayoría de las galaxias se alejaban de nosotros. Era lógico pensar que esto mismo ocurría para cualquier observador en cualquier lugar del universo, es decir, se expandía en todos los lugares igualmente (como un globo al hincharse). Algunos de los científicos se iban sumando a la idea de que el universo, después de todo, quizás sí tuvo un origen.

Para entonces en la URSS ya gobierna Stalin, el hombre de hierro, y no será tan condescendiente con estas ideas “*¡los falsificadores de la ciencia quieren hacer revivir el cuento de hadas del origen del mundo a partir de la nada!*”, son “*los agentes del abad Lemaitre*”. En 1931 se le confisca el pasaporte a Gamow para evitar que pudiera escapar como otros de sus colegas. Tras intentarlo en 1932, lo consigue en 1933 asistiendo a uno de los famosos congresos Solvay en Bruselas, para no regresar jamás a su patria. Muchos otros no tendrán tanta suerte y serán condenados a ser fusilados (Bronstein, Eropkine, Númerov, Balanovski, etc).

En esos años se complican las cosas para Einstein en Alemania donde en 1931 se publica un artículo titulado “*cien autores contra Einstein*”, que el genio desprecia “*¿Para qué ponerse cien en mi contra? Si me equivoco, ¡habría bastado uno solo!*”. Pero la cosa va a más. En 1933 Hitler es elegido canciller de Alemania justo en el momento en que Einstein está de viaje en USA. En Alemania se pone precio a su cabeza y sus libros se queman en las calles.

El nuevo dictador alemán, que es un materialista radical, se tomará este asunto de la ciencia en serio. Stern, seguidor de las ideas de Einstein, es revelado de su cargo de Director del Instituto de Física en la Universidad de Hamburgo. Antes de que todo empeore logra huir a USA quince días después. Y en efecto se pondrán las cosas peor. En 1942 el brillante matemático Hausdorff sufre persecución, se le confiscan los pasaportes de toda su familia. Una noche le arrestan a él y a toda su familia y son asesinados, como otras decenas de científicos brillantes.

Finalizada la Segunda Guerra Mundial, ya en 1948, Gamow, ahora exiliado en Estados Unidos, propuso que el universo se creó a partir de una **gran explosión inicial**, a partir de un punto **infinitamente pequeño**, pero **infinitamente denso**, y explicó, a partir de las ecuaciones de la nueva física la formación de los protones, los neutrones, y los átomos más ligeros como el hidrógeno, el helio, el litio y el berilio. Todo ello se habría formado en los primeros instantes del Big Bang, y probaba de manera irrefutable que el Big Bang tuvo efectivamente lugar.

Pero, increíblemente, todavía existía una corriente científica mayoritariamente contraria a esa propuesta, también en occidente. Muchos de los científicos no aceptaban el concepto “infinitamente” denso, ni “infinitamente” pequeño, y mucho menos que todo comenzara de la nada. Demasiado infinito. Y todo sonaba demasiado al “Génesis”. En 1949, en una entrevista en la BBC, de manera despectiva Hoyle llamó a esa teoría “la teoría del Big Bang”. La razón por la que él consideraba que los científicos se equivocaban es esta:

“La razón por la que a los científicos les gusta el “BIG BANG” es porque están eclipsados por el libro del Génesis. Está en lo profundo de la psique de la mayoría de los científicos creer en la primera página del Génesis” (Hoyle, 1949).

Lograr que el mundo aceptara la idea de un nacimiento del universo “de la nada” era una tarea de titanes. Gamow abandona la física para dedicarse a la biología, y sus alumnos abandonan la física teórica para entrar en el mundo de la empresa (General Electric, General Motors, etc.). Durante casi 20 años ningún científico de valía defiende con fuerza la teoría.

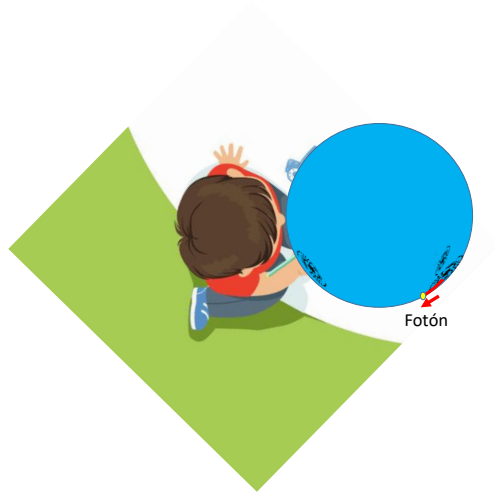
Pero en 1964 Dicke y Peebles reflexionaron y llegaron a la conclusión de que debería ser posible escuchar aún el “ruido” del Big Bang. Si el espacio mismo ha ido aumentando, esto quiere decir que el Big Bang ocurrió en todas partes. No ocurrió en un lugar concreto del espacio, sino en todo el espacio, solo que el espacio en ese inicio era infinitamente pequeño. Por tanto, en cualquier parte del espacio debería “oírse”.

Si hoy observamos muy lejos, y escuchamos el ruido que emite el espacio que se encuentra a 13.700 millones de años luz, deberíamos escuchar el ruido del Big Bang. Pero dado que esa región del espacio se aleja rapidísimamente de nosotros, nos llegaría en forma de microondas, por el efecto Doppler. Dicke y Peebles se pusieron a buscar las ondas de ese “ruido”.

Pero no fueron ellos quienes lo encontraron, si no Penzias y Wilson (en el mismo año de 1964). De manera accidental habían captado un “ruido” de microondas que venía, sin duda, del espacio profundo, más allá de las galaxias visibles.

Para poder entender cómo es posible que podamos escuchar el ruido del Big Bang, debemos imaginar un globo pequeño que un niño está inflando. En un inicio la superficie del globo es muy, muy caliente, y está emitiendo una luz cegadora que está por todas partes de la superficie del globo. El globo es pequeño en un inicio.

HACE 13.300 M de años



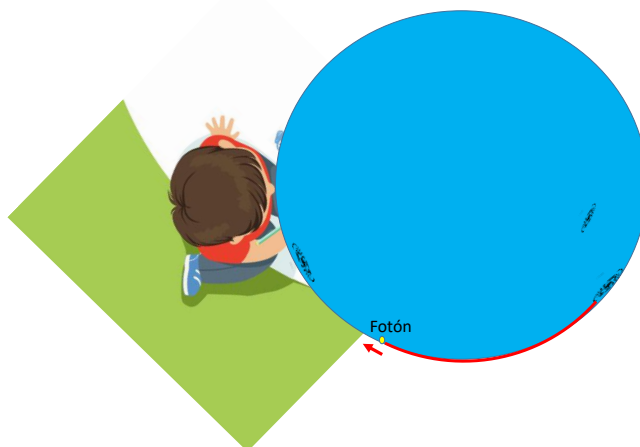
En el dibujo, nuestra galaxia, la Vía Láctea, es la de la izquierda del globo.

En el lugar donde estamos, lugar que hoy ocupa la Vía Láctea, hace 13.300 millones de años nos llegaba una luz cegadora de los puntos del espacio que estaban cerca nuestra.

Pero había lugares que estaban más lejos en el globo, que no eran capaces de enviarnos su luz porque el globo se estaba expandiendo a la vez, y por mucho que avanzaba el fotón, nosotros nos íbamos alejando también.

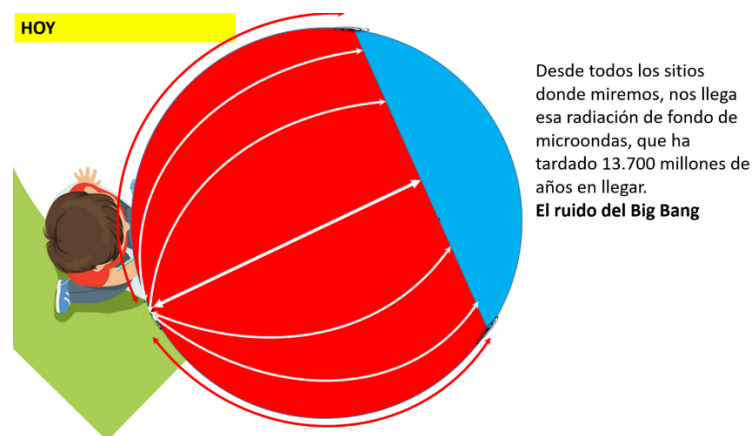
El espacio se expandía, haciendo cada vez más largo el camino que debía recorrer ese fotón. Hace 5.000 millones de años el fotón ya había avanzado una parte del recorrido, pero el espacio seguía expandiéndose por detrás y por delante de él.

HACE 5.000 M de años



Los fotones de la radiación de microondas del espacio profundo que nos están llegando ahora, han tardado 13.700 millones de años en llegar.

Esa radiación del espacio profundo, que comenzó su viaje en los primeros años de vida del universo, nos llega con una frecuencia bajísima por el efecto Doppler (dado que nosotros nos estamos alejando al expandirse el universo). La luz de los puntos que estaban aún más lejanos nos está llegando ahora mismo, con una frecuencia tan baja (microondas), que corresponde a una temperatura cercana al cero absoluto. Esos fotones que nos llegan ahora fueron emitidos en los momentos iniciales de la creación del universo. Por ejemplo, el conjunto de los fotones que fueron emitidos durante, digamos un periodo de 1 millón de años hace 13,700 millones de años, nos han estado llegando ahora durante los últimos mil millones de años, pero con una frecuencia muchísimo más baja que la original y una longitud de onda inmensa. Miremos donde miremos, en cualquier dirección a la que dirijamos nuestra antena, percibimos el ruido del “Big Bang” que ha tardado en llegarnos 13.700 millones de años:



Las observaciones que se están logrando con el telescopio espacial Hubble están confirmando que, cuando miramos a puntos muy lejanos, las galaxias se encuentran realmente apelotonadas. Dado que esas imágenes de galaxias apelotonadas han tardado más de 10.000 millones de años en llegar hasta nosotros, conseguimos demostrar que, en efecto, en los inicios, el universo era mucho más denso y mucho más pequeño. Es sin duda otro punto a favor de la teoría del “*Big Bang*”

Calculando la velocidad a la que se alejan las galaxias más lejanas, y su distancia, podemos estimar la antigüedad del universo. Actualmente hay un consenso científico que estima su antigüedad en 13.700 millones de años.

Pero recuerda que, ya antes que el descubrimiento de la radiación de fondo de microondas, la teoría del Big Bang se había visto confirmada por Gamow porque había sido capaz de predecir la abundancia de elementos ligeros en la naturaleza: hidrógeno, helio, deuterio y litio. Todos ellos se formaron a partir de los protones y neutrones primordiales durante los primeros minutos de la expansión del universo.

Recordemos también que el Big Bang ayudaba a resolver la paradoja de Olbers, que vimos en el primer capítulo. Nuestra experiencia diaria de ver el cielo oscuro, y no totalmente fluorescente en todas direcciones, se debe a que el universo tuvo un comienzo. Si hubiera sido eterno en el pasado, veríamos como si fuera un techo fluorescente.

Por último, tengamos en cuenta que este origen es el inicio, no solo de la materia y la energía, sino también del espacio y el tiempo. Es decir, no debemos imaginar que toda la materia estaba concentrada en un pequeño lugar dentro del espacio, sino que todo el espacio del universo era del tamaño de una manzana, que comenzó a hacerse inmensa creando el espacio en sí mismo, y el tiempo. Todo ello en consonancia con las ideas que ya en la antigüedad había expuesto San Agustín en sus confesiones.

En cualquier caso, a día de hoy, persiste el desafío metafísico y filosófico que supone la pregunta ¿cómo es posible que todo comenzara en un momento determinado? ¿cómo comenzó? ¿cuál fue la causa? Es sin duda una pregunta incómoda que no era necesario plantearse cuando pensábamos que el universo era eterno. Pero ya no hay marcha atrás porque la teoría del Big Bang es la base de toda la ciencia cosmológica, a pesar de los enormes esfuerzos realizados a lo largo de todo el siglo XX para refutarla:

“Ningún modelo cosmogónico ha sido verificado tan repetidamente en sus predicciones y tan confirmado por los intentos de su refutación, ni ha resultado tan concordante con los descubrimientos empíricos” (William Lane Craig, 2008).

1.1.2. El problema de la masa inercial.

Como hemos visto en el capítulo anterior, el enigma de la masa inercial sigue sin estar resuelto. Este problema fue planteado por primera vez por Newton quien, como vimos, consideraba que las fuerzas de inercia aparecen siempre que un móvil acelera. Me refiero al ejemplo clásico de un pasajero en un tren. Mientras el tren va a velocidad constante, no siente ningún tipo de fuerza. Pero si el tren acelera, entonces sí lo nota.

Esto se explica porque su masa **tiende** a continuar con velocidad constante (o en reposo, que es lo mismo). La gran incógnita está en ese “tiende”. No me refiero a la pregunta ¿tiende a continuar con velocidad constante respecto a qué? A lo que me refiero es a ¿por qué **tiende** tozudamente a mantener ese estado?

Newton diría que “tiende” a mantenerse a velocidad constante respecto al espacio absoluto, pero, por supuesto **no explica por qué “tiende”**.

Como vimos, para Leibnitz, Berkeley, Mach y Einstein el espacio absoluto no existe como tal. Por tanto, la aceleración tiene que ser con respecto al conjunto de masas del universo. Einstein de hecho consideraba que, si el sistema se separa lo suficiente del resto de masas del universo, la inercia se iría haciendo nula, y tenía la esperanza de que la Teoría de la Relatividad General ofreciera matemáticamente esa solución.

«En la consecuente teoría de la relatividad no se puede definir la inercia respecto al “espacio”, pero sí se puede definir la inercia de las masas una respecto a otra. Por eso, si alejamos una masa cualquiera a una distancia grande de todas las demás masas del Universo, la inercia de tal masa debería tender a cero». (Einstein)

Sin embargo, la Relatividad no ofreció una solución a este enigma. El Principio de Mach no cuadra con la física moderna, de manera que aún no se ha encontrado una respuesta a la razón de por qué las masas **tienden** a querer quedarse en “su lugar”. Y esto es especialmente paradójico desde que sabemos, por la teoría de la relatividad, que hablar de “un lugar” del espacio no tiene ya mucho sentido.

Dado que este tema fue ya expuesto en el capítulo de la relatividad, no nos detendremos más en él, pero me parecía importante recordarlo en este capítulo de los desafíos de la física.

1.1.3. La estructura interna e intrínseca de la materia ¿Qué es la materia?

Gran parte de los esfuerzos teóricos y experimentales del siglo XX han tratado de perseguir y descubrir la estructura más íntima y oculta que forma la materia.

Sin embargo, ya los antiguos griegos fueron conscientes de la paradoja que hay oculta dentro de este concepto.

Por mucho que imaginemos partículas pequeñas que integran la materia, siempre podremos pensar ¿de qué está hecha esa pequeña partícula?, por ejemplo ¿de qué está hecho el electrón?

Los físicos continuamente trabajan con los electrones. Son partículas que “se mueven”³, que interactúan con la materia, que tienen masa, ¿pero de qué están compuestos? Imaginemos por simplificar que son una esfera perfecta, muy muy pequeña ¿de qué está hecha esa esfera? Digamos que está hecha de “materia electrónica”, por ponerle un nombre. Aun así, siempre podremos imaginar que esa esfera podemos dividirla o machacarla para encontrar las partículas elementales que la constituyen ¿o no? ¿no tiene el electrón dimensiones?

- Si no tiene dimensiones ¿cómo es posible que se mueva? ¿qué es lo que se mueve entonces? ¿cómo es posible que exista siquiera?
- Y si tiene dimensiones ¿de qué está hecho por dentro? ¿por qué iba a ser inconcebible entonces que podamos encontrar las partículas que lo constituyen? Y si está constituido de otras partículas ¿no podríamos razonar respecto a esas partículas de idéntica manera hasta el infinito?

Por tanto, parece que es imposible saber qué es realmente la materia. Los griegos como Zenón estaban convencidos de que nunca llegaríamos a conocerla.

La persistente y perseverante búsqueda de la estructura interna de la materia que los físicos contemporáneos vienen realizando es desesperadamente parecido a una caza de fantasmas.

La esencia de la materia oculta un gran misterio, y cuando veamos la mecánica cuántica nos convenceremos del todo. El estudio de la mecánica cuántica nos adentrará al final de este curso en un mundo absolutamente increíble. Prepararos para cazar fantasmas.

1.1.4. Infinita divisibilidad del espacio y el tiempo

La infinita divisibilidad del espacio y el tiempo es un problema bien conocido desde hace 2.500 años. Zenón de Elea fue el primero en plantear las paradojas que muestran que el movimiento es algo “misterioso”, y desde luego no es obvio en absoluto. Ya hemos visto con la relatividad que, desde luego, el movimiento es mucho más complejo en realidad de lo que nos habían explicado en el colegio.

³ Cuando veamos la mecánica cuántica matizaremos este punto.

Zenón era discípulo de Parménides, quién a finales del siglo VI a.C. afirmaba que el movimiento y el cambio es, por lógica, imposible. Si algo “ES” no puede cambiar, debe SER siempre, no puede dejar de SER lo que era, ni dejar de ESTAR donde estaba. La experiencia nos muestra cambios, por tanto, los sentidos nos engañan.

Justo al contrario de lo que decía Heráclito, quien afirmaba que la experiencia confirma que absolutamente todo es “DEVENIR”, todo es cambio continuo.

Heráclito basaba sus afirmaciones en la experiencia. Parménides basaba sus afirmaciones en la razón.

Muchos filósofos de la siguiente generación ridiculizaban la postura de Parménides, puesto que bastaba abrir los ojos para ver el cambio y el movimiento continuamente. Es lo que cualquiera pensaría hoy en el siglo XXI.

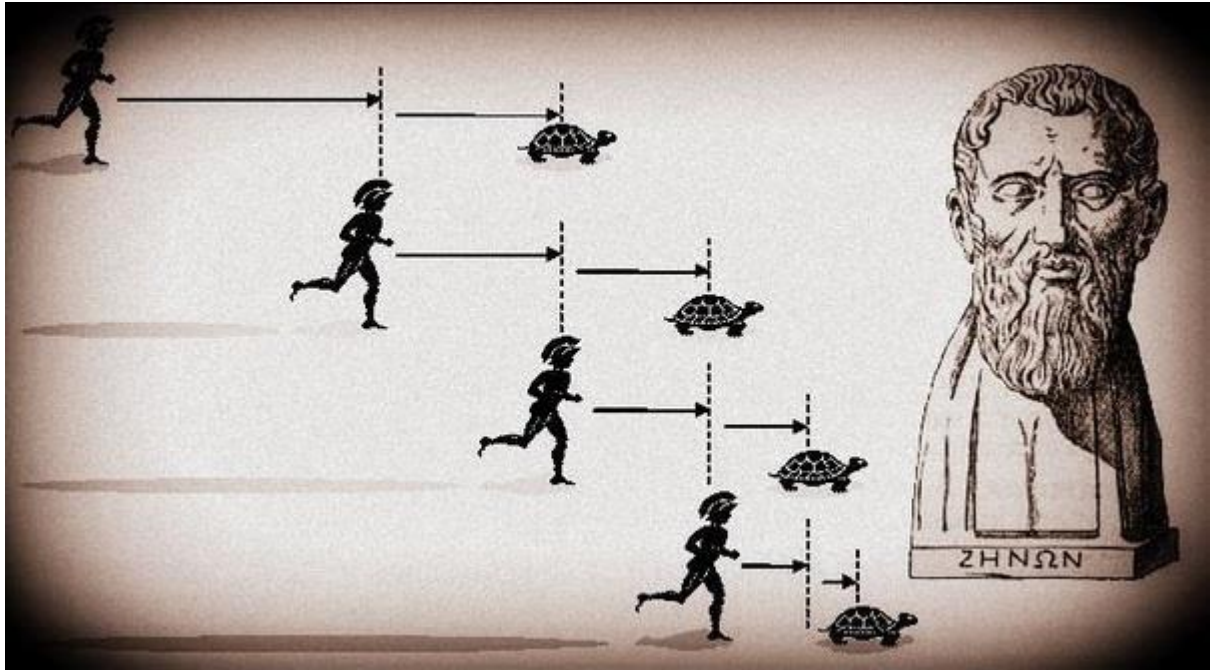
Pero Zenón de Elea, discípulo de Parménides, moverá “el alfil” haciendo jaque al rey, y aún no se sabe si es “jaque mate” o no. Hay diferentes paradojas planteadas por Zenón. Expondremos solo dos.

La paradoja de Aquiles

Aquiles deja 100 m de ventaja a la tortuga, y está muy seguro de que la adelantará. De hecho, en breves instantes ha logrado estar donde estaba antes la tortuga, pero cuando Aquiles llega a esa posición la tortuga se ha desplazado ya 10 m y está ya en una segunda posición, un poco más adelantada que antes.

En muy poco tiempo Aquiles vuelve a estar donde estaba la tortuga, pero para cuando Aquiles ha llegado, la tortuga ha vuelto a desplazarse.

Y así podemos seguir el proceso de manera infinita y el pobre Aquiles jamás puede alcanzar a la tortuga.



Fuente: [Смартсма КБ-11](#)

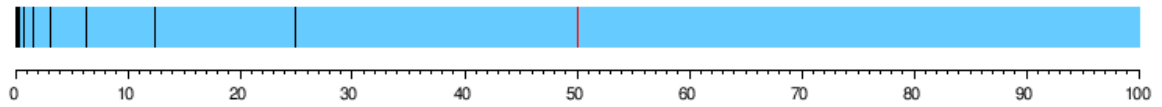
Esta paradoja nos muestra que Aquiles tiene que realizar un número infinito de tareas antes de poder alcanzar a la tortuga.

La experiencia desde luego nos muestra que cualquier corredor puede adelantar a una tortuga, pero para Zenón, eso no es una respuesta válida que refute su propuesta, puesto que él considera que la experiencia nos engaña y nos está mostrando cosas ilógicas.

Antes de intentar refutar a Zenón, mostremos otra de sus famosas paradojas. Esta segunda es aún más radical.

Paradoja de la dicotomía, o división en dos partes.

Supongamos que Parménides quiere levantarse y dar un paseo hasta el final del jardín. Él sabe que, antes de llegar al final del camino, tendrá que pasar antes, inevitablemente, por el punto que está justo en la mitad del paseo. Y antes de llegar a ese punto deberá pasar, lógicamente, por la mitad de la mitad del paseo. Y antes de eso por su mitad, y antes por su mitad, etc... Esto muestra que si quiere avanzar siquiera un milímetro tiene que realizar infinitas tareas antes. Sería por tanto imposible iniciar el movimiento.



Diógenes el cínico refutaba estos argumentos de Zenón levantándose y comenzando a andar. Pero no es tan sencillo, porque Zenón diría de nuevo que los sentidos nos deben estar engañando.

Zenón nos invita a que refutemos su propuesta usando la razón, no andando.

En ingeniería nos encontramos con problemas similares a estos de continuo. Los resolvemos fácilmente con el cálculo infinitesimal que nos enseñaron Leibnitz y Newton. Los ingenieros estamos familiarizados con el uso de límites e integrales.

Sabemos por ejemplo que el problema que acabamos de describir se resolvería en ingeniería de la siguiente manera. Si queremos andar un tramo x , pero nos imponen primero llegar a su mitad, y antes a su mitad, etc. podemos escribirlo matemáticamente así:

$$\frac{x}{2} + \frac{x}{4} + \frac{x}{8} + \frac{x}{16} + \frac{x}{32} + \frac{x}{64} + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x}{2^n} = x$$

Pero Zenón tampoco se quedaría nada convencido con esta respuesta. Es más, se quedaría asombrado de que pensemos que esto es una posible solución. Zenón nos diría que Leibnitz y Newton idearon unas notaciones matemáticas para simplificar el problema y, dieron por hecho, que ese sumatorio infinito era igual a x , puesto que eso es lo que la experiencia les mostraba. Es decir, Leibnitz y Newton responden con el mismo argumento que Diógenes, pero con notaciones matemáticas. Pero ni Leibnitz ni Newton pueden explicar por qué esas infinitas sumas pueden dar lugar a un número finito.

Zenón nos advierte de que, para que el movimiento sea posible, es necesario que exista un número discreto y finito de posibles instantes de tiempo. Si en efecto, hubiera un número discreto de posibles instantes de tiempo, y no un número infinito, la carrera de Aquiles no podríamos dividirla en infinitos instantes y por tanto adelantaría a la tortuga sin problemas.

Y también es necesario un número discreto de posiciones en el espacio para poder iniciar cualquier movimiento. En el paseo de Parménides, si hubiera un número discreto de posiciones, y no un número infinito, no podríamos dividirlo en infinitos intervalos, y por tanto podría iniciar el movimiento sin problemas.

Todo esto está muy relacionado con lo que ya comentamos en apartados anteriores de este capítulo, Hilbert nos demostró matemáticamente en 1925 que el infinito no puede existir en la realidad. Y, por tanto, tampoco puede existir lo infinitamente pequeño, ni en el espacio, ni en el tiempo.

La mecánica cuántica ha llegado a un límite discreto en el espacio llamado “longitud de Planck”, y a un límite discreto en el tiempo llamado “tiempo de Planck”. Por debajo de estos límites los cálculos y la lógica clásicos no funcionan. Quizás la mecánica cuántica esté encontrando una solución para los dolores de cabeza de Zenón.

Hollywood se enfrentó a este mismo reto en los inicios. Y lo resolvió con un número discreto de fotogramas cada segundo. Es decir, no hay infinitos instantes sino unos pocos. Y exactamente igual, en las pantallas de televisión de hoy en día, tenemos que definir un número determinado de píxeles. No hay infinitos píxeles, sino un número determinado. También la vista del ser humano solo puede captar un número determinado de imágenes por segundo (hasta un máximo de 60 fotogramas por segundo), y también la retina del ojo humano tiene un número limitado de píxeles que puede captar (la retina tiene 576 Megapíxeles).

1.1.5. El problema del determinismo

Ya vimos en el primer curso que los atomistas, comenzando por Demócrito, imaginaban el mundo constituido de diminutas bolitas (que llamaban átomos) que chocaban unos con otros de manera inevitable. Estos choques aleatorios originaban los cambios que vemos en la naturaleza. Los animales muertos se descomponen, y entonces los átomos se desagrupan para formar materia orgánica que fertiliza el suelo, materia que absorben las plantas y pasan a formar parte de su ser, reagrupándose de nuevo. Estas plantas se las comen los animales, etc. Todo esto se explicaba con bolitas, con átomos.

El choque de las bolitas, según Demócrito, obedecía a una “necesidad” pero no existía una finalidad.

Es decir, si existía un tigre, o existía una ballena, o un hombre, era por pura casualidad, efecto del caos, efecto de que las bolitas están eternamente chocando. A veces forman cosas maravillosas **por azar**, pero la mayoría de las veces son simplemente caos.

Los atomistas se aventuraron a considerar que los mundos se forman y se disuelven y se vuelven a formar. Veremos más adelante como esta idea ha sobrevivido.

Como es lógico, esta visión científica del mundo tuvo una repercusión importante en los sistemas filosóficos de todas las épocas. En concreto Bertrand Russell (1872-1970) afirmaba:

“El hombre es el producto de causas ajenas a lo que ellas produjeron (causas inconscientes); que su origen, su crecimiento, sus esperanzas, su amor, y sus creencias son el resultado de un ensamblaje accidental de átomos; que ningún fuego, ningún heroísmo, ni la intensidad del pensamiento o la pasión, puede preservar una vida más allá de la tumba;

Los sofistas de la antigua Grecia eran seguidores de estas ideas de Demócrito y consideraron que no es posible el conocimiento científico porque todo es fruto del caos. De manera que los sofistas nos llevan hacia un camino en el que no hay leyes naturales e inmutables.

De hecho, Epicuro de Samos, seguidor de las ideas de Demócrito, no era partidario del estudio de las ciencias, puesto que en su opinión todo era caos y azar. Excluyó de su escuela el estudio de la lógica, las matemáticas, la historia, ... Pero, sobre todo, era especialmente hostil a la astronomía. De manera que, como vimos en el primer curso de astronomía, la rama de pensamiento que proviene de Demócrito quedó estéril para la ciencia durante casi 20 siglos. Un pensamiento que no cree en un orden, no lo busca.

Ya sabemos que fueron las ideas de Platón y Aristóteles, y no las de los atomistas y los sofistas, las que pusieron en marcha la revolución científica griega en Alejandría entre los siglos III y I a.C., dado que estos dos grandes filósofos si consideraban que todo ocurría de acuerdo con unas **leyes naturales** (había un orden, un COSMOS, y no un caos), leyes naturales que además era posible **conocer**.

Los estoicos, herederos de esta corriente de pensamiento, consideraron que el hombre estaba justo en el vértice de la jerarquía de los seres existentes, y consideraron que el resto del universo existe para su beneficio (Cicerón).

Al finalizar la Edad Media, tras el redescubrimiento de todas las obras científicas de la antigüedad, y tras una lenta asimilación de estas ideas, comienza la revolución científica del siglo XVII, el avance de la ciencia que puso en marcha Galileo (y Descartes) y que llegará a uno de sus puntos culminantes con Newton.

Las leyes de Newton tuvieron tanto éxito a la hora de predecir los movimientos celestes y terrestres, que provocó un cambio importante en la visión filosófica del mundo. El atomismo volvía a tener sentido. Al fin y al cabo, probablemente todo estaba formado por bolitas que chocaban unas con otras, pero esta vez sí, obedeciendo a las leyes de Newton, de manera inevitable, y durante toda la eternidad. Cada choque debe cumplir la conservación de la cantidad de movimiento, $f=ma$, y otras leyes. El universo se concebía como una gigantesca mesa de billar donde las bolitas chocan unas contra otras, siguiendo leyes inmutables.

El auge de la física y las matemáticas fue tal que en 1814 Laplace llegó a aseverar que, si se conociera la velocidad y posición de todas las partículas del universo en un instante dado, se podría predecir todo el futuro por el resto de los siglos, y se podría conocer todo el pasado⁴.

Pero esta forma de pensar nos conduce a algunos problemas complicados, especialmente si pensamos en la esencia del ser humano. Si todo lo que existe está constituido por bolitas que chocan siguiendo leyes inmutables, el hombre está también constituido por eso mismo.

Pero entonces ¿podemos considerar acaso que el hombre es libre? Realmente ¿qué existencia tiene la conciencia del hombre? ¿dónde queda la libertad del hombre? Y si el hombre no es libre ¿qué sentido tiene hablar de generosidad, egoísmo, valentía, amabilidad, etc? ¿qué sentido tiene hablar de culpabilidad o responsabilidad? No existirían la culpabilidad ni la responsabilidad, puesto que no hay libertad y todo obedece a leyes inmutables que son inevitables. El hombre estaría haciendo y pensando, en última instancia, todo lo que sus genes le dictan (química, al fin y al cabo), y todo lo que su red neuronal le impone, una red neuronal que se fue formando y reprogramando a lo largo de su vida en función del conjunto de las experiencias que le fueron pasando. El hombre obedecería a las leyes químicas y físicas igual que las obedecen el nitrógeno y el oxígeno cuando hacemos experimentos en un laboratorio.

Según esta visión determinista ¿vale más el ser humano que una piedra?

⁴ Para más información investigar sobre “el demonio de Laplace”.

El sentido común nos dice que, sin duda, sí, pero ¿en qué podemos basar la dignidad del hombre si no es libre, si es solo un conjunto de partículas obligadas a cumplir leyes universales? ¿quizás en que el hombre, aunque es solo química, es algo extraordinario fuera de lo común? Si tenemos en cuenta que ya somos casi 7.000 millones de personas en este planeta, este argumento queda débil, son mucho más extraordinarios los lince ibéricos, que son muchos menos ¿Tiene más dignidad un lince ibérico que el ser humano? El determinista atomista respondería que valen lo mismo, al fin y al cabo, no son más que átomos obligados a cumplir leyes omnipresentes. Y, sin embargo, todos estamos de acuerdo en que la libertad es nuestro bien máspreciado.

Por otra parte, según el determinismo, el futuro está ya “determinado”. Solo es necesario calcularlo en función de las condiciones iniciales.

Por supuesto, el determinismo dejaba también a Dios sentado en el banquillo. En el siglo XVII el teísmo consideraba que Dios solo había hecho falta para escribir las leyes naturales y para crear la materia y darle el primer empujón. A partir de ese momento Dios no hace ninguna falta, y puede echarse a descansar, o puede dejar de existir. De manera que la ciencia comenzó a incrementar su seguridad en sí misma, y dejó los asuntos de Dios para teólogos y curas. Si bien, sin darse cuenta, estaba colocando en el olimpo de los dioses a la propia materia y a las leyes naturales, por considerarlas eternas e increadas. Pero ¿por qué las leyes naturales son eternas e increadas? ¿dónde están “escritas” y cómo se “escribieron”? ¿cómo logran las leyes naturales universales que toda la materia del universo cumpla lo legislado? ¿cómo logran ser omnipotentes y omnipresentes? ¿cómo saben todo lo que ocurre en todas partes, cómo logran ser omniscientes?

Existen otros enigmas relacionados con el determinismo. Si nos paramos un minuto a pensarlo, en un sistema determinista, tanto sentido tiene decir que el sistema final está condicionado por el sistema inicial, que decir que ¡el sistema inicial está condicionado por el sistema final! Es decir, si nosotros sabemos la velocidad inicial de una pelota, y sabemos la altura a la que se encuentra, y sabemos su masa, podemos calcular exactamente la trayectoria de tiro parabólico que describirá volando por encima de la casa. Pero también, si conocemos la velocidad con la que ha impactado en el suelo, y conocemos su masa, podemos saber exactamente las condiciones iniciales de las que partió, y conocer la trayectoria que realizó en el pasado.

Es decir, en un sistema determinista, se puede decir que las condiciones finales quedan determinadas por las condiciones iniciales, pero también que **¡las condiciones iniciales vienen determinadas por las condiciones finales!**

En cualquier caso, a pesar de todo lo dicho, el determinismo radical ha quedado herido por la segunda ley de la termodinámica (que veremos en este capítulo), quedó después malherido por la teoría del caos (que también veremos en este mismo capítulo) y finalmente ha quedado definitivamente fuera de combate para siempre con la mecánica cuántica, como demostraremos en el último capítulo de este curso.

1.1.6. El trilema de Munchausen y el teorema de Gödel. Todos los sistemas de pensamiento flotan sin apoyo

En este tema analizamos lo problemático que es poder basar nuestro conocimiento en una base cierta y rigurosa. Veremos que, ni siquiera las matemáticas, se salvan de esta maldición.

Nos sirve para esto el mito del Barón de Munchhausen, quien decía haber logrado escapar de un pantano con arenas movedizas, tirando de su propia coleta hacia arriba. Es evidentemente algo imposible. Para poder salir necesitas apoyarte en algo que está fuera de ti, y fuera del pantano.



Barón de Munchhausen, por Oscar Herrfurth

El llamado “trilema de Munchhausen” nos advierte de que lo mismo ocurre con cualquier sistema de pensamiento filosófico que construyamos. Necesitamos basarlo en algo exterior al sistema.

Cualquier proposición que algún sabio haga debe basarla en algo. Siempre podremos preguntarle ¿en qué te basas para decir A? Y el sabio podrá responder: “Me baso en B”. Y podremos preguntarle ¿en qué te basas para decir B”. Y el sabio responderá “me baso en C”. Y así podemos seguir mucho tiempo hasta que llegamos siempre a una de las siguientes tres opciones:

- 1) Que nos responda “Me baso en A”, de donde ya habíamos partido, y por tanto volvemos a un círculo, que flota en el vacío y que no tiene una base en dónde apoyarse.
- 2) Que nos responda “Me baso en V, y no me preguntes por V porque es evidente por sí mismo”, y por tanto nos encontramos ante una base dogmática que tratan de imponernos
- 3) O bien continúa este gran sabio encontrando siempre nuevas e ingeniosas respuestas, que no se repiten, y así hasta encontrarnos finalmente de nuevo con la opción 1) o la 2) en algún momento.

Es decir, toda construcción filosófica humana, todo el conocimiento, en realidad, parece flotar en el vacío, sin poder apoyarse en algo fijo y sólido.

Los escritores de la enciclopedia en época de la ilustración se encontraron con este mismo desafío. Cuando trataban de definir algo, por ejemplo, la palabra “animal”, debían tratar de definirlo sin citar esa palabra en la definición, evidentemente. Decían por ejemplo “un animal es un ser orgánico que está vivo, y se mueve por propio impulso”. Pero enseguida se les presentaba la dificultad de definir algo que “está vivo”, sin citar la palabra “animal”. Y ahí comienzan las dificultades. Según la RAE, la “vida” es la “propiedad esencial de los animales y las plantas”. Es decir, la definición de animal es “ser orgánico que está vivo”, y la definición de vida es “propiedad esencial de los animales y las plantas”. Nos han bastado solo dos definiciones para empezar a dar vueltas en círculo... Quizás no te habías dado cuenta hasta ahora que el diccionario y la enciclopedia, en realidad, flotan en el vacío... No existe una base que sostenga el conocimiento humano, salvo el “**sentido común**”, que es “inexpresable”, o la propia experiencia individual e intransferible.

Curiosamente, la palabra que eligieron los ilustrados franceses para su ambicioso diccionario universal fue “enciclopedia” que significa, en griego, (*en kiklos paideia*), “conocimiento en círculo”.

Esto lo explicaba muy bien Pascal un siglo antes del desafío de la enciclopedia:

“Es evidente que los primeros términos que habría que definir supondrían otros anteriores que sirviesen para explicarlos, y de manera análoga, las primeras proposiciones que se quisiese comprobar supondrían otras anteriores; por lo tanto, es evidente que jamás se llegará a las primeras. Así remontándose cada vez más en las investigaciones, se llega por fuerza a palabras primitivas que ya no se pueden definir”. “Los hombres se hallan en una impotencia natural e inmutable para tratar cualquier ciencia” (Pascal).

Seguro que estáis pensando que, al menos las matemáticas, se libran de esta maldición. La verdad es que tampoco se libran, el teorema de Gödel acabó con esas esperanzas para siempre. Profundizaremos un poco en ello, dada la importancia que tiene.

En el siglo XIX grandes matemáticos como Hilbert, Cantor y Poincaré habían realizado enormes progresos en las demostraciones matemáticas, trabajando en fundamentar bajo piso firme todos y cada uno de los pasos del sistema. Muchas de estas demostraciones implicaban trabajar con conjuntos con un número infinito de elementos. Pero en 1902 el lógico y filósofo Bertrand Russell hizo añicos la confianza en toda esa construcción. Demostró que el uso de conjuntos con un número infinito de elementos daba lugar a paradojas.

La paradoja de Russell es fácil de entender, y parece un acertijo de los que aparecen en las películas como la historia interminable, pero este pequeño “juego de niños” puso en jaque el progreso y la fundamentación de las matemáticas. La paradoja consiste en lo siguiente:

- Definimos R como el conjunto de todos los conjuntos que no son miembros de sí mismos. Por ejemplo, el conjunto de los conjuntos infinitos es claramente miembro de sí mismo, puesto que el conjunto de los conjuntos infinitos es, en sí mismo infinito.
- Y Russell pregunta ¿es R un conjunto de sí mismo?
- Si R fuera un conjunto de sí mismo, no podría pertenecer a R , porque R es el conjunto de los conjuntos que no son miembros de sí mismo.
- Entonces R no es un conjunto de sí mismo, luego por la definición de R ¡debería pertenecer a R !

¿En serio esta “broma inocente” puso en un brete a las matemáticas? Desde luego que lo hizo, porque muchos de los desarrollos que Hilbert y Cantor estaban realizando para formalizar todo el sistema matemático estaban utilizando conjuntos infinitos del mismo tipo que el que utiliza Russell en su paradoja.

Hilbert se embarcó entonces en la tarea de establecer un sistema donde fuera imposible llegar a paradojas y contradicciones como la de Russell, de manera que todos los razonamientos fueran siempre correctos. Pero en realidad estaba cayendo, sin saberlo, en la misma ingenuidad que Munchhausen.

El 7 de octubre de 1930, en el coloquio final de un congreso de matemáticas en Königsberg, un chaval tímido de 25 años (Kurt Gödel) se levantó en las últimas filas y afirmó lo siguiente “...*Se pueden construir proposiciones matemáticas que con contextualmente verdaderas pero indemostrables...*”. Nadie en la sala entendió ese galimatías, salvo el gran matemático y físico von Neumann, que vio enseguida que esto significaba el fin del plan de Hilbert. En efecto, ese programa de fundamentación que los mejores matemáticos del mundo estaban intentando lograr para tratar de salvar a las matemáticas del “dogmatismo” o de la ambigüedad sería un camino a ninguna parte, si Gödel tenía razón.

Gödel demostró que, basta con que el sistema matemático que construyamos incluya proposiciones aritméticas simples para que sea inevitable que contenga **enunciados verdaderos** que **ni son demostrables, ni indemostrables dentro del sistema**.

¿Pero cómo podemos saber que algo es verdad, pero no poder demostrarlo? Esta es exactamente la conclusión a la que se llega con el teorema de incompletitud de Gödel.

Esto supone que “existen afirmaciones matemáticas verdaderas acerca de las cuales nunca podremos demostrar que son verdaderas”, y esto dinamita el proyecto que Hilbert quería construir.

No nos detenemos en explicar la demostración de Gödel, es del estilo a la de Russell, pero esta vez sin escapatoria posible. La demostración fue demoledora porque lo que Hilbert estaba tratando de construir era un sistema tan lógico y bien construido que no fuera necesario siquiera entender las matemáticas. Bastaría con seguir las reglas del sistema para saber si una proposición está bien construida, o saber si era verdadera o falsa. Es decir, a lo que Hilbert aspiraba es a prescindir de la intuición del matemático. Evidentemente el propio Hilbert era consciente de que siempre necesitaría esa intuición para definir los primeros principios:

- Los axiomas de donde todo parte: Serían un número pequeño de proposiciones generales que Hilbert y otros matemáticos entendieran como “autoevidentes”. Por ejemplo, para toda pareja de valores x, y se da que $x + y = y + x$.

- Y por otra parte, las reglas del sistema. Serían como las leyes que indican lo que está permitido y lo que no está permitido hacer dentro del sistema. Solo podrían incluir aquellas reglas que a Hilbert y otros grandes matemáticos, les parecieran reglas autoevidentes.

Partiendo de los axiomas, y siguiendo las reglas, podríamos, a partir de cadenas de proposiciones válidas, llegar a conclusiones demostradas que llamaríamos teoremas. Este era el plan de Hilbert.

Gödel demostró que, no importa qué tipo de sistema construyamos, por muy formales que seamos, siempre existirán proposiciones que **sabemos que son verdaderas** y que no podrían ser demostradas dentro del sistema. Es decir, esa proposición que nosotros **sabemos** que es verdadera, daría un error en cualquier software de ordenador que operara según el sistema.

En conclusión, para estar seguros de que un sistema (como el matemático, por ejemplo) hace correctamente lo que se supone que hace, necesitamos intuiciones procedentes del exterior del sistema.

Y es imposible sistematizar estas intuiciones que tenemos las personas, no es posible expresarlas con algoritmos. Una máquina nunca tendrá “*sentido común*”.

El teorema de Gödel es uno de los puntos fuertes en los que se basa el premio nobel Roger Penrose para concluir que nunca una inteligencia artificial podrá alcanzar la inteligencia de un ser humano, y mucho menos la conciencia⁵. Como el propio Penrose dice “*el concepto de verdad matemática no puede ser encapsulado en ningún esquema formalista*” “*hay algo absoluto e infuso en la verdad matemática*”. “*Es el acceso directo al mundo platónico lo que confiere a la mente (humana) un poder superior al de todo dispositivo cuya acción se fundamenta únicamente en el cálculo*”.

De acuerdo con Roger Penrose, el cerebro humano no funciona algorítmicamente, parece haber algo que trasciende o que está en un nivel superior de conocimiento al puramente algorítmico.

Es evidente que tanto Roger Penrose como Gödel tienen un concepto “platónico” de las matemáticas. Consideran que, de algún modo, el ser humano es capaz de captar una “*verdad matemática*” que tiene existencia autónoma, que existe por sí misma.

⁵ La nueva mente del emperador. 1989

“No he ocultado mis fuertes simpatías por el punto de vista platónico de que la verdad matemática es absoluta, externa y eterna, y no se basa en criterios hechos por el hombre; y que los objetos matemáticos tienen una existencia intemporal por sí mismos, independiente de la sociedad humana o de objetos físicos particulares” (Roger Penrose).

“El materialismo es falso”. “No creo que el cerebro haya aparecido de manera darwiniana. De hecho, se puede refutar. Un mecanismo simple no puede conducir al cerebro”. El Darwinismo “es un prejuicio de nuestro tiempo que será refutado (...) la refutación tomará la forma de un teorema de matemáticas que mostrará que la formación a lo largo de los tiempos geológicos de un cuerpo humano gracias a las leyes de la física (o de otras leyes de la naturaleza), a partir de una distribución aleatoria de partículas elementales, es tan poco probable como la separación por azar de la atmósfera en sus diferentes componentes” (Gödel). Es decir, Gödel considera que el Darwinismo no puede explicar, a base de cambios aleatorios, la formación de un ser humano en 3.000 millones de años.

Gödel ha sido considerado por von Neumann, Oppenheimer y muchos otros como *“el más grande lógico desde Aristóteles”*.

Es evidente que este mundo platónico de las matemáticas oculta un gigantesco misterio. En el siguiente tema profundizaremos en este otro gran desafío.

1.1.7. El misterio de las matemáticas

En este tema nos detendremos para profundizar con cierto detalle en el misterio de las matemáticas y para ello analizaremos algunos de los casos más paradigmáticos que encontramos en la propia naturaleza.

Los griegos fueron los primeros en reflexionar ampliamente en este misterio, como vamos a ver, pero es en el siglo XVII cuando el éxito de la ciencia nos hace plantearnos algunas preguntas filosóficas importantes. Las leyes físico-matemáticas de Newton fueron tan exactas en sus predicciones que el mundo occidental no pudo evitar preguntarse ¿por qué es tan exacta la física? ¿por qué los planetas y satélites obedecen las matemáticas de Newton indefectiblemente? ¿el universo es matemático o es el hombre el que es matemático? ¿o son ambos? ¿las matemáticas las vamos descubriendo? ¿o las vamos inventando?

Como hemos visto, el matemático físico de Oxford, Roger Penrose, considera que los teoremas de Gödel argumentan sólidamente la existencia de un mundo matemático platónico, de alguna manera desconocida, más allá del mundo material.



Configuración geométrica y matemática de la estructura interna de la pirita

En el segundo curso ya nos hicimos algunas preguntas sobre este misterio de las matemáticas. Apolonio, en el siglo III a.C. había ido construyendo unas curvas matemáticas extrañas que nadie había visto nunca en la naturaleza. Estas curvas solo surgían cuando seccionamos un cono, y fueron llamadas cónicas (elipse, parábola, hipérbola). Mil novecientos años después, un “fundamentalista” obsesionado por la presencia de las matemáticas en el universo, Kepler, estaba completamente convencido de que, dado que Dios era un ser racional, los planetas tenían que seguir una trayectoria matemáticamente definida.

“Las cosas matemáticas son las causas de las físicas porque Dios desde el principio de los tiempos llevaba dentro de sí en abstracción simple y divina los objetos matemáticos como prototipos de las cosas materiales” (Kepler).

Ese convencimiento radical y dogmático le llevó a Kepler a probar con distintas curvas, y finalmente probó con esas extrañas curvas que un griego había *descubierto* mil novecientos años antes. Y en efecto, funcionó. Todos los datos cuadraron a la perfección, los planetas trazaban elipses.

Pero ¿cómo es posible que los planetas trazaran curvas que habían sido descubiertas (¿o inventadas?) por un matemático griego mil novecientos años antes, sin ningún tipo de relación con la astronomía?

Las curvas matemáticas que descubrió Apolonio se habían considerado solo una curiosidad, un juego de entretenimiento de matemáticos, y resultó que los planetas las conocían.

Este fundamentalismo matemático de Kepler, junto con el trabajo de Galileo (contemporáneo suyo), puso en marcha el método científico actual, que consistía en tomar una gran cantidad de datos (que en el caso de Kepler habían sido tomados por Tycho Brahe captando la posición de Marte en distintos momentos a lo largo de varios años), para poder proponer una tesis matemática general que tratara de modelar el proceso natural estudiado, es decir, la trayectoria del planeta (*inducción*), y luego, a partir de dicho modelo, proponer un caso particular en condiciones específicas (*deducción*), es decir, predecir donde iba a estar Marte exactamente dentro de tres meses. Y finalmente, comprobar con experimentos que, efectivamente, los resultados del modelo para esas condiciones particulares y específicas encajan con los resultados medidos en la naturaleza (*verificación*).

Los esfuerzos heroicos de Kepler para intentar encajar las observaciones que Tycho Brahe había hecho de Marte en una órbita definida matemáticamente (una elipse matemáticamente perfecta) son **el nacimiento de la ciencia moderna**, y este paso solo fue posible darlo a partir de una creencia ciega en un orden matemático natural preestablecido.

Las matemáticas parecen estar presentes de algún modo en el universo. Hay infinitos ejemplos de este tipo, pero nos detendremos brevemente en dos de los que a mí me parecen más espectaculares; la proporción áurea y el panal de abeja.

La proporción áurea

Como siempre, para poder ahondar en este nuevo y apasionante misterio debemos comenzar siempre con la Grecia clásica. Por supuesto con anterioridad a los griegos, los egipcios y los babilonios habían dominado las matemáticas, pero éstas eran concebidas como unas “recetas” o “reglas” que les permitían realizar cálculos específicos prácticos, para comerciar, administrar, repartir, etc.

Pitágoras, en el siglo VI a.C. fue el primero en entender los números como **entidades abstractas** con existencia propia. Para él, el 2, el 5, el 9, etc... tenían una existencia propia y autónoma. Se atribuye a Pitágoras haber acuñado las palabras “filosofía” (amor por la sabiduría) y “matemáticas” (lo que se aprende).

Los pitagóricos encontraron un sinnúmero de relaciones matemáticas en la naturaleza. En particular, demostraron que las distintas notas armónicas tenían una relación matemática precisa entre ellas. La octava se obtenía por una proporción 1:2 de las longitudes de la cuerda. Una cuerda igual de tensa, pero con la mitad de longitud, sonará una octava armónica por encima de la primera. Y si una cuerda produce la nota Do, entonces una cuerda con una longitud 6/5 de la anterior, producirá la nota La.

Los pitagóricos consideraron que, no solo la armonía de la música podía expresarse de manera matemática, sino que en realidad, todos los objetos del universo se podían expresar matemáticamente. Los números eran eternos e inmutables, y eran por fuerza la primera causa de todo.

Pitágoras influyó en Platón, de ahí el increíble desarrollo de las matemáticas en el mundo griego a partir del siglo IV a.C., especialmente en la Biblioteca de Alejandría. Platón consideró que las matemáticas debían ser obligatorias en la educación de cualquier líder de estado. La inscripción a la entrada de la Academia decía *“que nadie que carezca de geometría atraviese mis puertas”*.

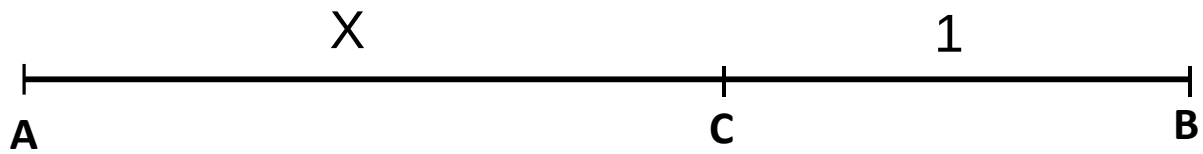
La importancia que, tanto Platón como Aristóteles, concedieron a las matemáticas fue la base para que los griegos de los siguientes siglos realizaran progresos en este ámbito más sorprendentes aún que los que realizaron en el ámbito de la filosofía, el arte o ninguna otra ciencia.

La excelencia griega en matemáticas fue debida a que lo consideraban como un conocimiento puro, en sí mismo. No se estudiaba por aplicación práctica, sino porque se consideraba un conocimiento que acercaba al mundo platónico y divino. Todo el tratado de geometría de Euclides, o los estudios de las curvas cónicas de Apolonio, fue una investigación **pura** sin ningún tipo de aplicación práctica inmediata ni evidente. Las curvas cónicas solo sirvieron para algo 1.900 años después.

Como ejemplo paradigmático de la presencia de las matemáticas en la naturaleza nos centraremos en la proporción áurea.

Llamamos “proporción áurea” a aquella que cumple que:

$$\frac{AB}{AC} = \frac{AC}{CB} = \varphi$$



Es decir, la relación entre el segmento total y el segmento mayor es igual a la relación entre el segmento mayor y el segmento pequeño.

Es fácil calcular el valor matemático de la proporción áurea. Si consideramos que CB vale 1. Y llamamos AC = x, entonces la proporción áurea cumple:

$$\frac{x+1}{x} = \frac{x}{1}$$

$$x^2 - x - 1 = 0$$

$$x = \frac{1+\sqrt{5}}{2} = 1,6180339.... = \varphi$$

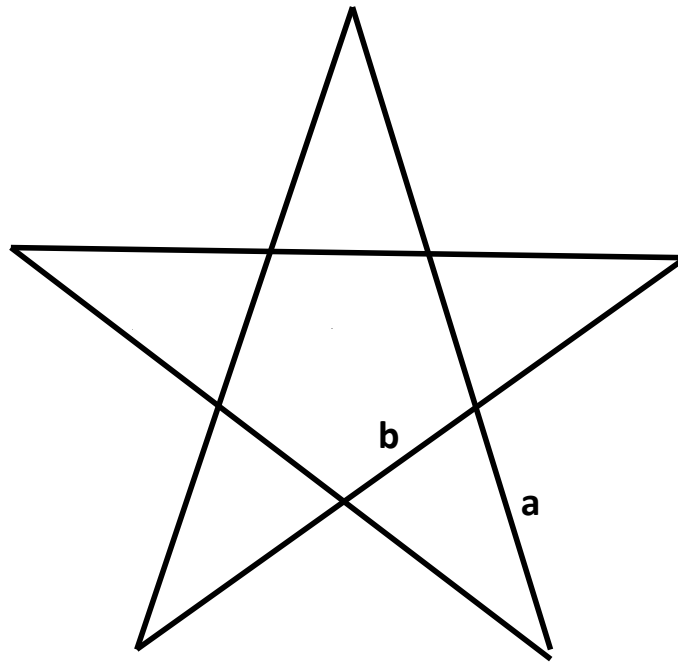
En el siglo V a.C. Hipaso de Metaponto descubrió, para sorpresa de todos, que la proporción áurea (φ) era un número que no era ni entero (1, 2, 3...) ni una proporción de números enteros (1/2, 3/5, ...etc). Es decir ¡no era un número racional! ¿Cómo puede existir un número que no se puede construir? Esto provocó una crisis filosófica profunda, especialmente entre los pitagóricos, quienes estaban convencidos de que los números enteros eran la causa de todo lo que existe.

Esto significa que nunca podremos encontrar una misma medida que pueda servir para medir AC y AB. Por muy pequeña que hagamos la medida (un dedo, una uña, un milímetro, una micra, etc...) nunca lograremos un número entero para la longitud de AC y de AB con la misma medida. Son números *incommensurables*.

Los números irracionales más conocidos son π , φ , e. Estos números aparecen con enorme frecuencia en los cálculos que realizamos para entender y tratar de predecir el comportamiento natural de las cosas, así como sus medidas.

Profundicemos ahora en el misterio del número φ .

Una de las figuras matemáticas más interesantes es la estrella pentagonal, o estrella pitagórica o pentagrama. Esta interesante figura guarda una estrecha relación con el número ϕ , y por ello con muchos fenómenos naturales, como vamos a ver.

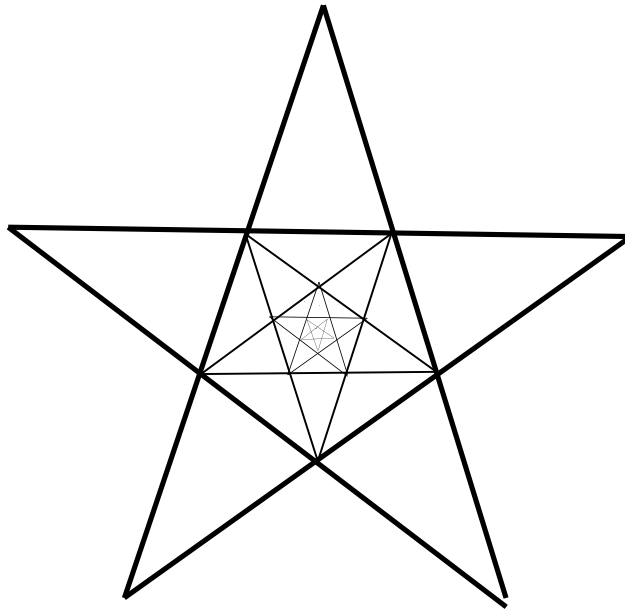


Esta figura cumple que $a/b = \phi$

Para ir “abriendo boca” os presento la manera en que se disponen las pepitas de una manzana:

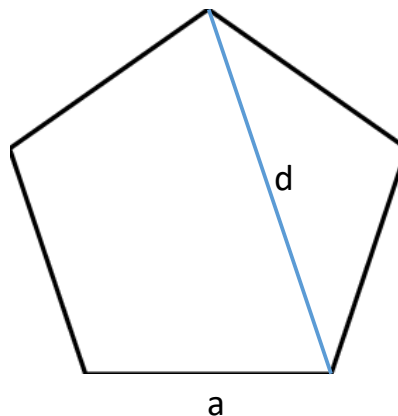


El pentagrama se puede construir a partir de un pentágono regular. Y el pentágono regular se puede construir a partir del pentagrama, de manera que es posible dibujar esta construcción de manera progresiva, haciéndola infinitamente pequeña:



O bien infinitamente grande.

En esta figura infinita vemos estrellas (pentagramas) y también pentágonos regulares, porque también en el pentágono regular está presente la proporción áurea, puesto que la relación entre la diagonal y el lado es exactamente φ .



$$d/a = \varphi$$

En 1202, un viajero de Pisa llamado Leonardo Fibonacci introdujo el sistema de numeración indo-arábigo en Europa, es decir, los números que todos nosotros conocemos (0,1,2,3,4,5,6,7,8,9). Pero lo que nos interesa de Fibonacci es la serie de números que él propuso, y que cumplía que un término se construye como la suma de los dos anteriores. De manera que, si empezamos por 0 y 1, la serie sería:

$$\begin{aligned}0 \\1 \\1+0 &= 1 \\1+1 &= 2 \\2+1 &= 3 \\3+2 &= 5 \\5+3 &= 8 \\&\dots\end{aligned}$$

La serie sería 0,1,1, 2, 3, 5, 8,13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377, 610, 987...

Lo curioso de la serie es que, si dividimos un número de la serie entre el anterior encontramos que tiende a acercarse cada vez más al valor de ϕ .

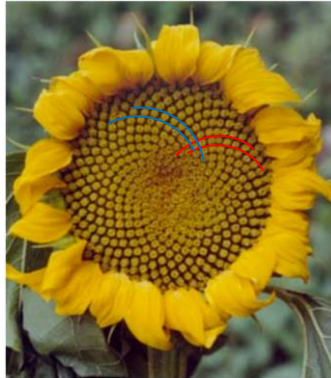
$$987/610 = 1,618033$$

Por tanto, si queremos sacar muchos decimales de la proporción áurea, basta con seguir construyendo la serie de Fibonacci tanto como queramos.

El número ϕ y la serie de Fibonacci están presentes en muchos de los seres vivos.

Por ejemplo, en el caso del girasol, siempre encontraremos que sus semillas (pipas) están dispuestas formando un número de espirales que tiene que formar parte de la serie de Fibonacci.

Lo habitual es encontrar 34 espirales en sentido horario (rojas) y 21 en sentido antihorario (azules). O bien 55 en sentido horario y 34 en sentido antihorario. Pero se han llegado a encontrar girasoles con 89/55 e incluso con 144/89.

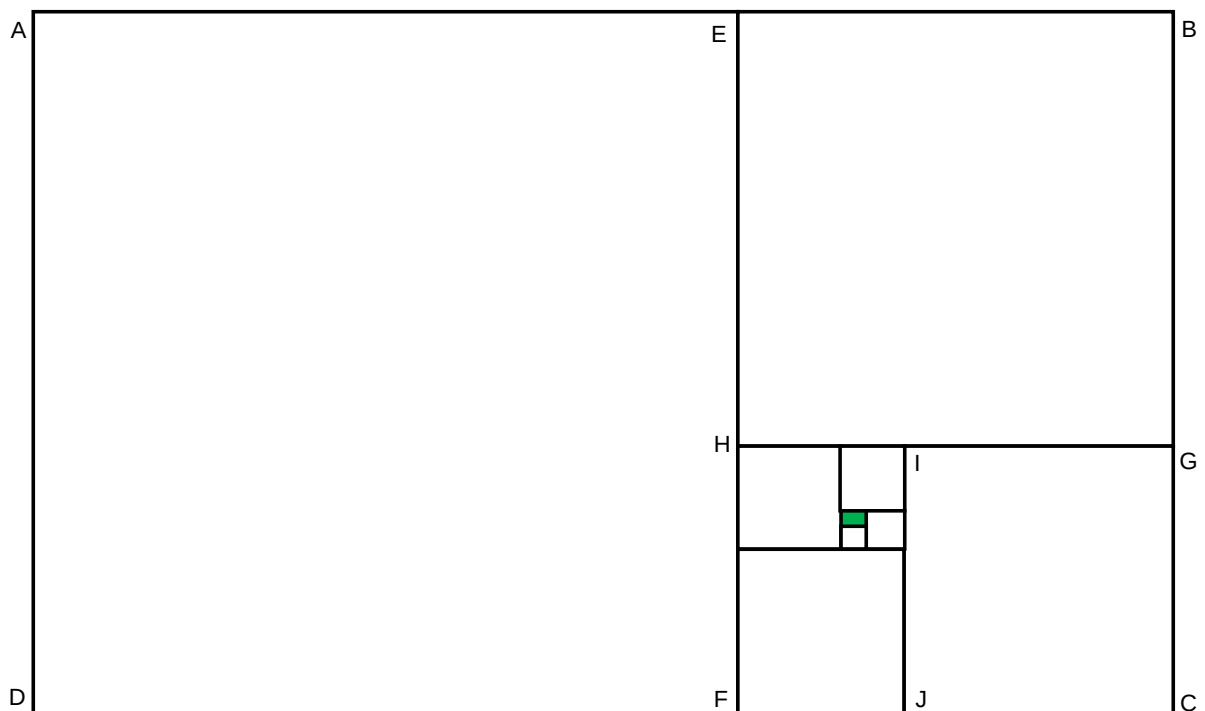


En esta flor de girasol encontraremos 34 espirales como las rojas y 21 espirales como las azules

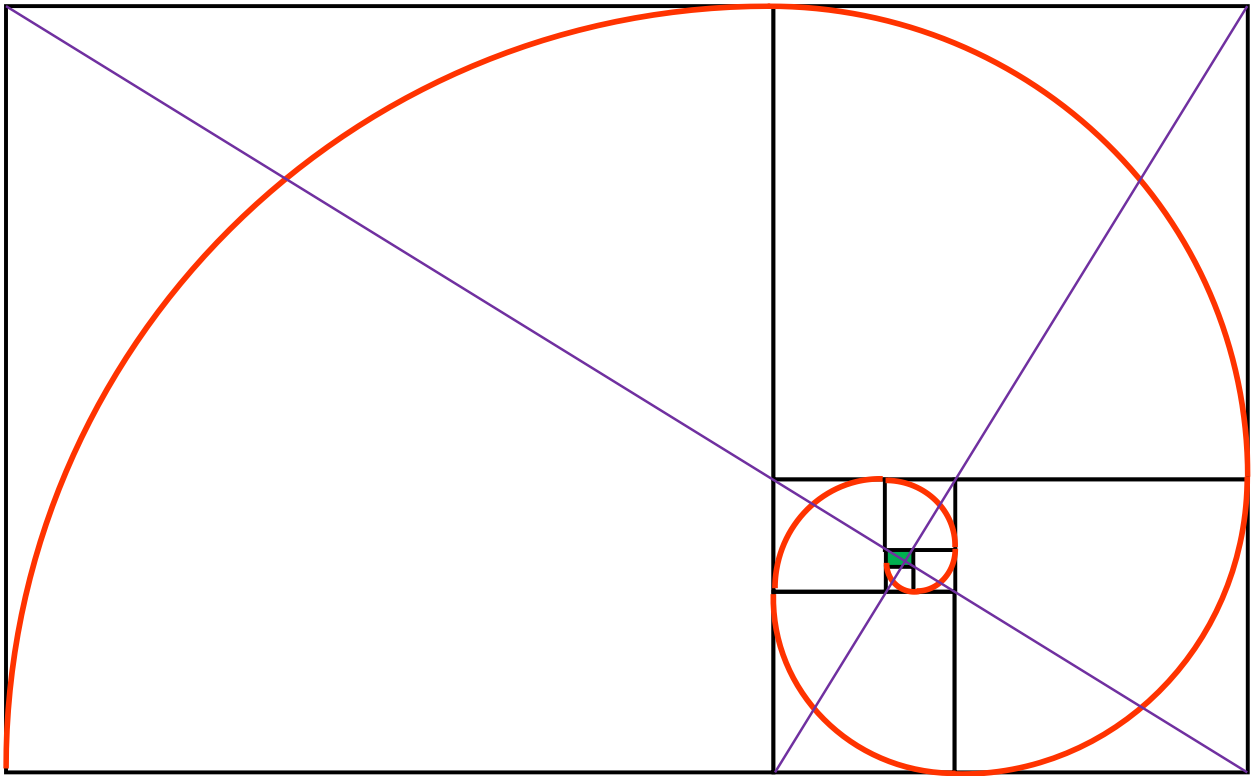
Un análisis similar podríamos hacer con las semillas de las piñas, las alcachofas, etc.

Pero, además, el tipo de espiral que forman las semillas es una espiral de Fibonacci que está también íntimamente relacionada con la proporción áurea.

Construir una espiral de Fibonacci es sencillo. Partimos de un rectángulo áureo (que cumpla que la relación entre el lado mayor y el lado menor sea igual a ϕ). Si le quitamos el cuadrado (AEFD), nos encontramos de nuevo con un rectángulo áureo (EBCF). Si a este le quitamos un cuadrado (EBHG), encontramos de nuevo un rectángulo áureo (HGFC). Y así sucesivamente.



Si ahora trazamos arcos de circunferencia en cada cuadrado, podemos desarrollar la espiral de Fibonacci, también llamada la curva de Durero.

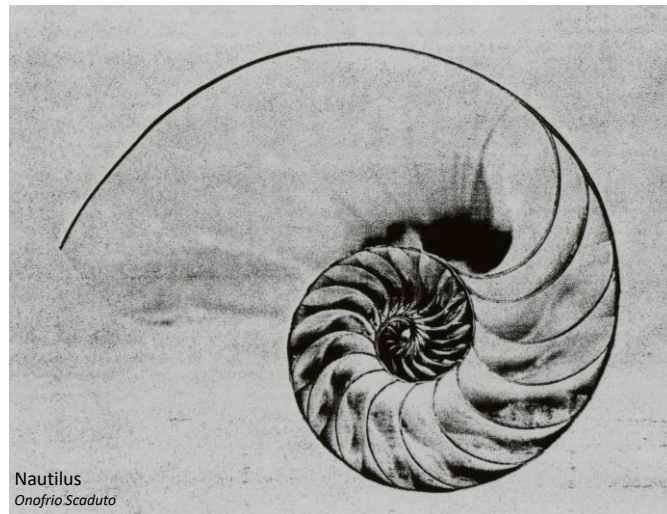


Se forma así una curva infinita que nunca acaba y que tiende hacia el punto donde se cruzan las dos diagonales moradas del dibujo.

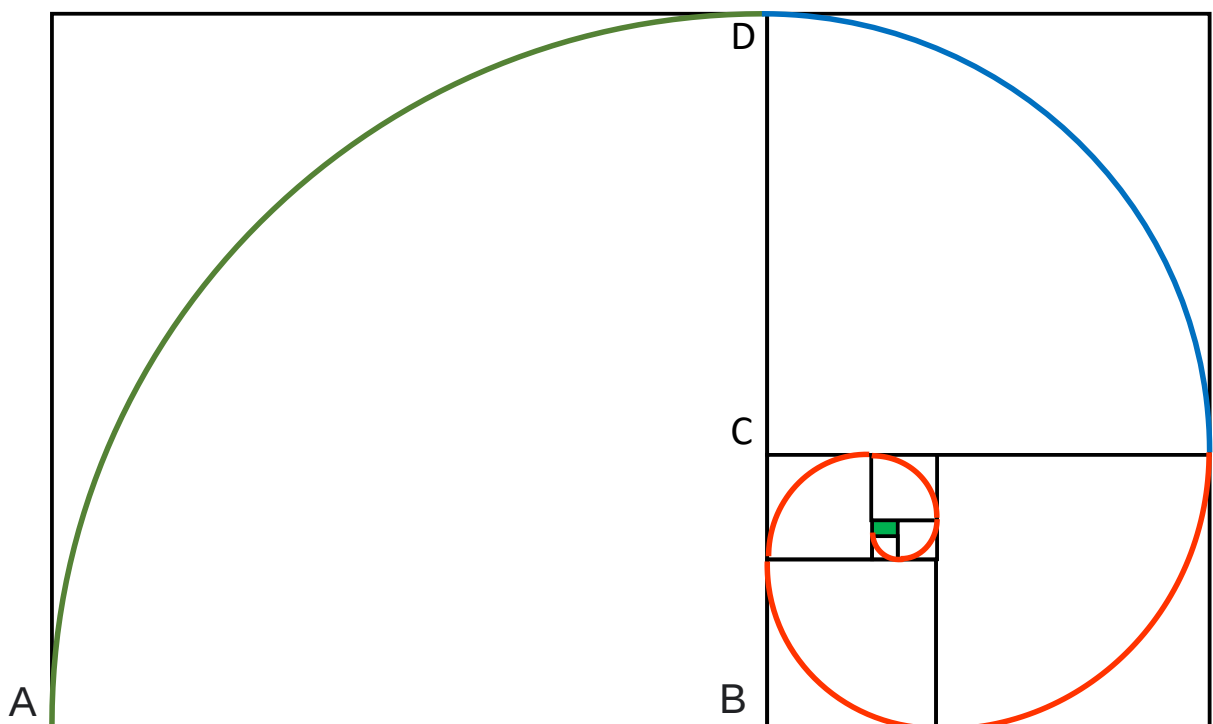
La espiral de Fibonacci siempre mantiene la misma forma, aunque nos acerquemos infinitamente hacia el centro de la espiral. Es una curva autodefinida⁶.

En la naturaleza encontraremos muchas veces esta espiral, porque es la que permite crecer manteniendo siempre la misma forma. Por ejemplo, el nautilus crece, y mantiene siempre la misma forma de su casa.

⁶ Ojo con este video hipnótico, puedes quedarte horas viéndolo e intentando entenderlo... https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:GoldenSpiralLogarithmic_color_in.gif

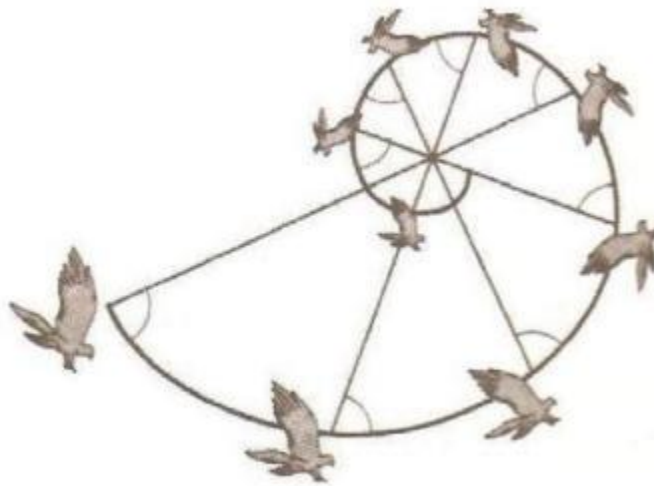


La espiral de Fibonacci es una aproximación a la espiral áurea, que es una espiral logarítmica. Las espirales logarítmicas aumentan su radio en proporción al ángulo girado. En el caso de la espiral áurea el radio se multiplica por ϕ cada 90 grados que gira. Es muy fácil ver como en la espiral de Fibonacci que hemos construido, el radio de giro se multiplica por ϕ al girar 90 grados. Es decir, el radio de la curva verde (AB) es ϕ veces más grande que el radio de la curva azul (CD).



Pero en la espiral áurea, que es perfectamente logarítmica, no habría saltos de discontinuidad. Por eso la espiral de Fibonacci es solo una aproximación de la espiral áurea.

La espiral logarítmica se llama también *espiral equiangular* porque cumple además la propiedad de que, si trazamos una línea desde el centro de la espiral hacia cualquier lugar, siempre cortará a la curva formando el mismo ángulo. Por esta razón los halcones trazan esta curva cuando se lanzan hacia su presa. Al no tener ojos de frente (los tienen a los lados), eligen uno de los ojos para mantener siempre a la presa a la vista, y mantienen el ángulo de visión óptimo a lo largo de todo el descenso.



Esta curva logarítmica permite que el halcón mantenga siempre una velocidad de traslación constante en todo momento, de manera que la aceleración tangencial es nula. Por supuesto, la velocidad angular será cada vez mayor. Se puede demostrar que, si el halcón y la presa fueran infinitamente pequeños, el halcón daría infinitas vueltas antes de alcanzar a su presa, **¡pero la alcanzaría en un tiempo muy corto!** Es decir, de nuevo nos encontramos con una paradoja similar a las de Zenón.

Las galaxias en espiral también mantienen esta misma forma. Es un misterio que mantengan su forma a lo largo del tiempo. Las estrellas más cercanas al centro deberían girar con una velocidad angular más rápida que las que están más lejos, como ocurre en el sistema solar donde Júpiter tarda 12 años en dar la vuelta mientras Mercurio tarda solo 88 días. Por tanto, la forma no podría mantenerse y se emborronaría.

Pero se ha descubierto que, por alguna razón desconocida, las estrellas de la galaxia, tanto las más exteriores como las más interiores, mantienen la misma velocidad de rotación con independencia de su distancia. Así consigue la galaxia mostrar siempre la misma forma, aunque pasen millones de años el dibujo no se “emborrona”.

El sol tarda en dar una vuelta a la galaxia 230 millones de años, y por tanto, en realidad, la mayoría de las estrellas de la galaxia han dado ya más de 20 vueltas. Si aún vemos una forma definida en las galaxias solo puede ser porque todas las estrellas giran a la misma velocidad angular alrededor de su centro.

¡Y qué bonitas quedan para los ojos humanos cuando las vemos desde aquí! Si las vemos tan bonitas es porque, a lo largo de los últimos miles de millones de años, han mantenido su forma.



Galaxia espiral NGC 1566. NASA

Pero ¿por qué nos parecen tan asombrosamente bellas las galaxias? Una cosa es evidente, no nos parecen bellas por ninguna razón relacionada con nuestra evolución biológica, puesto que nadie las ha visto nunca antes del siglo XX. Alguien podría decir que una puesta de sol nos parece bella por selección natural, porque aquellas especies de homínidos que se veían atraídos por las puestas de sol tendrían a expandirse hacia el oeste, y al expandirse y diversificarse esa

especie tenía más probabilidades de prosperar ¿pero por qué nos parecen tan increíblemente bellas las galaxias o Saturno?

La proporción áurea también nos servirá para explicar un concepto matemático fundamental, que nos será de gran utilidad cuando estudiemos la teoría del caos. Se trata de los fractales.

Fractales

El fractal es un objeto geométrico cuya estructura se repite a diferentes escalas. La espiral logarítmica que vimos antes es un fractal, porque su forma se repite continuamente en distintas escalas hasta el infinito. Podemos verlo claramente en este [gif animado](#).

La construcción de estrellas y pentágonos que vimos antes es también un fractal, porque mantienen las mismas formas en distintas escalas.

Estos fractales que hemos estudiado están íntimamente relacionados con la proporción áurea debido a que el propio número ϕ tiene, de manera inherente, una naturaleza matemática fractal. En efecto, ϕ se puede calcular también de esta manera:

$$1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \dots}}}}} = \phi$$

Es fácil ver que, efectivamente, esta serie cumple la fórmula fundamental de la proporción áurea:

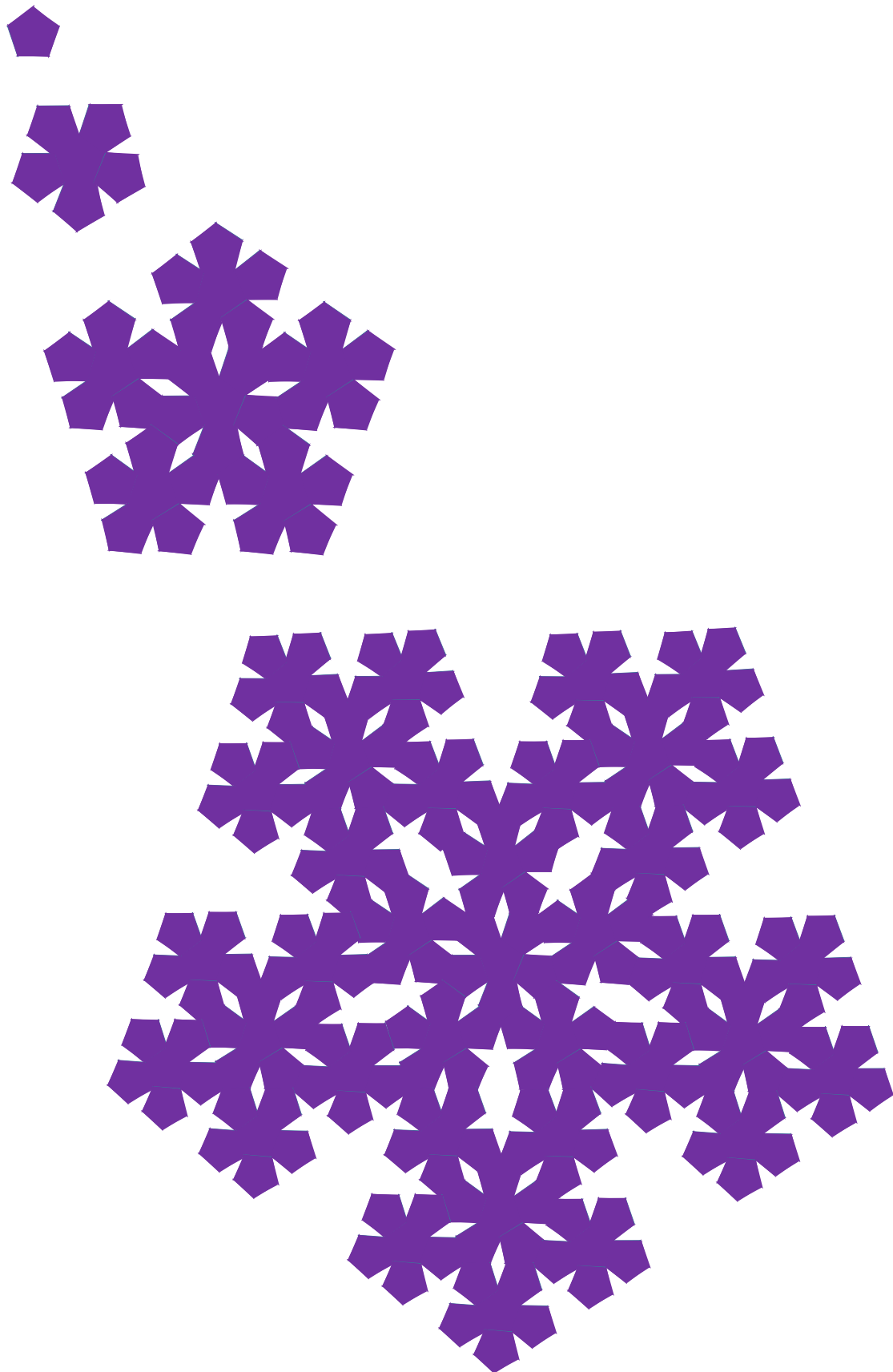
$$\phi = 1 + \frac{1}{\phi}$$

Aunque el concepto de fractal es muy posterior, es evidente que Kepler ya se había percatado de estas extrañas propiedades en la proporción áurea:

“Creo que esta proporción sirvió de idea al Creador cuando introdujo la creación de una apariencia a partir de otra apariencia, que también continua indefinidamente” (Kepler).

Esta naturaleza fractal de la proporción áurea es fácilmente visible en la siguiente figura geométrica, desarrollada a partir del pentágono. Es conocido también como el fractal de Durero.

Empezamos con un pentágono regular. A sus lados dibujamos otros cinco pentágonos regulares, y la figura resultante la volvemos a repetir cinco veces. Y procedemos así sucesivamente.



El comportamiento fractal de esta construcción es evidente. La proporción áurea la encontramos, no solo en la forma en que se construye el pentágono (relación entre la diagonal y el lado), también está presente en las estrellas de Pitágoras (pentagramas) de color blanco que van quedando en los huecos.

Ahora entendemos por qué la naturaleza se sirve del concepto matemático de fractal en los seres vivos. El nautilo tiene la misma forma en las distintas escalas de su crecimiento, porque tiene la forma fractal de la espiral logarítmica.

Los fractales están presentes en la naturaleza por todas partes. Hay ejemplos de todo tipo:

- Puedes coger una pequeña piedra de granito, una roca pequeña, una roca grande, una colina, y un paisaje granítico. Todas tendrán la misma forma aparente.

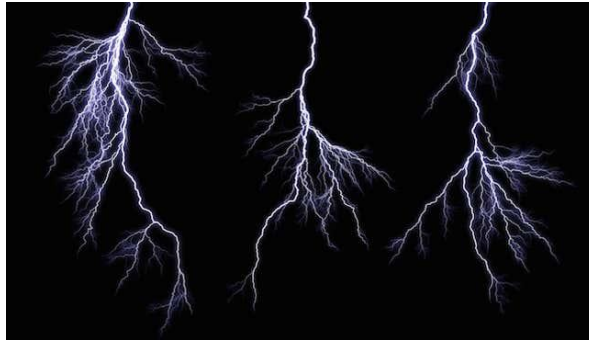


- El brócoli tiene la misma forma si lo miras de lejos, que si lo miras de cerca, que si lo desmenuzas en piezas más pequeñas cada vez.



■

- Los rayos tienen naturaleza fractal. Si los miramos de cerca veremos pequeños rayos que salen del tronco principal. Y si hacemos zoom a esos rayos, veremos de nuevo lo mismo.



- Por supuesto la ramificación de las ramas de los árboles (y de sus raíces) también tiene naturaleza fractal.



Fuente: icog.es

Al fin y al cabo, como el propio Mandelbrot descubrió, la naturaleza no suele seguir formas geométricas definidas. La naturaleza forma fractales.

“Las nubes no son esferas, las montañas no son conos, las costas no son círculos y la corteza de los árboles no es lisa, ni los rayos viajan en línea recta”.
(Mandelbrot).

Cuando en navidad hacemos un Belén en el salón, utilizamos la naturaleza fractal. Unas piedras parecerán montañas, las ramitas de una planta nos sirven de árboles, un pequeño salto de agua por la roca nos sirve de río o de gran cascada, un pequeño charquito es un gran lago, un poco de musgo parece una maleza impenetrable, etc.



Figuritas de Belén

Actualmente, los desarrolladores de juegos de ordenador utilizan la matemática fractal para poder construir con algoritmos computacionales paisajes y vegetación ultrarealista.

Parece que las matemáticas están en las galaxias, en la forma de los animales, en las órbitas que trazan los planetas... Pero ¿qué me diríais si os digo que hay animales que nos han aventajado en cálculo avanzado matemático desde hace milenios?

La conjetura del panal

Sin lugar a duda, el premio nobel de matemáticas en la naturaleza se lo adjudicamos a la abeja. Sus panales han maravillado a los geómetras y matemáticos desde hace más de dos mil años, y el estudio sobre el misterio matemático que encierran se ha llamado “la conjetura del panal”.

Como sabemos, la abeja recolecta el néctar de las flores y lo regurgita para fabricar la miel y la cera. La propia estructura del panal está construida con cera, y para fabricar un litro de cera, necesita 8 litros de miel.

Para fabricar solo un litro de miel la abeja necesita visitar ¡tres millones de flores! Todo esto supone un enorme esfuerzo para la colmena. Pero veremos cómo las abejas, a lo largo de centenares de miles de años, han optimizado ese esfuerzo al máximo.

El panal está constituido por hexágonos perfectamente regulares.



Fuente: tareaswiki.com

Cada hexágono es la puerta de la casita de una larva, está construido con cera, y está relleno de miel, que será el alimento de la larva.



Larvas de abeja en cada celda del panal. Filmado por Anand Varma en el Centro de Investigación Harry Laidlaw Honeybee en UC Davis con la ayuda de Billy Synk. Música de Rob Moose (@mooseofrob)

La pregunta que todos nos hacemos es ¿por qué las abejas complicaron tanto el esquema geométrico y no fabrican sus panales con formas cuadradas y cúbicas? Nuestras casas tienen forma de cubo, nuestras habitaciones también ¿por qué no lo hicieron así las abejas? Veremos que las abejas, no solo son unas arquitectas geniales, sino que además resolvieron un problema de ingeniería increíblemente complicado para optimizar su propio esfuerzo energético en la construcción.

En torno al 36 a.C. un erudito romano llamado Marcus Terentius Varro fue el primero en escribir sobre el problema matemático de los panales de las abejas. En primer lugar, cabía preguntarse por qué las entradas de las celdas de los panales no tienen forma circular, de manera que la celda fuera cilíndrica. En esta imagen vemos las cabecitas de cada abeja bebé, y como van creciendo dentro de cada celda. Las celdas cilíndricas podrían ser una buena idea, en principio:



Larvas de abeja en cada celda del panal. Filmado por Anand Varma en el Centro de Investigación Harry Laidlaw Honeybee en UC Davis con la ayuda de Billy Synk. Música de Rob Moose (@mooseofrob). Es muy interesante ver el video para entender mejor cómo funciona un panal: [Video](#)

Además, tanto el círculo, como el cuadrado, como el hexágono optimizan la superficie encerrada con el **mínimo** perímetro (con el mínimo esfuerzo constructivo).

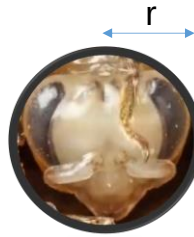
En los tres casos se cumple que Superficie/Perímetro = $r/2$, siendo r el diámetro de la cabeza de la abeja bebé.



$$\text{Superficie} = (2r)^2 = 4r^2$$

$$\text{Perímetro} = 8r$$

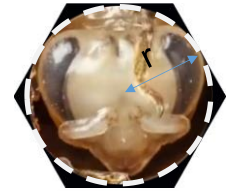
$$S/P = \frac{r}{2}$$



$$\text{Superficie} = \pi r^2$$

$$\text{Perímetro} = 2\pi r$$

$$S/P = \frac{r}{2}$$



$$\text{Superficie} = 2r^2\sqrt{3}$$

$$\text{Perímetro} = 4r\sqrt{3}$$

$$S/P = \frac{r}{2}$$

La humanidad siempre construyó sus casas cuadradas o circulares. De esa manera se optimiza el espacio de una casa con el menor esfuerzo constructivo (el menor perímetro posible).

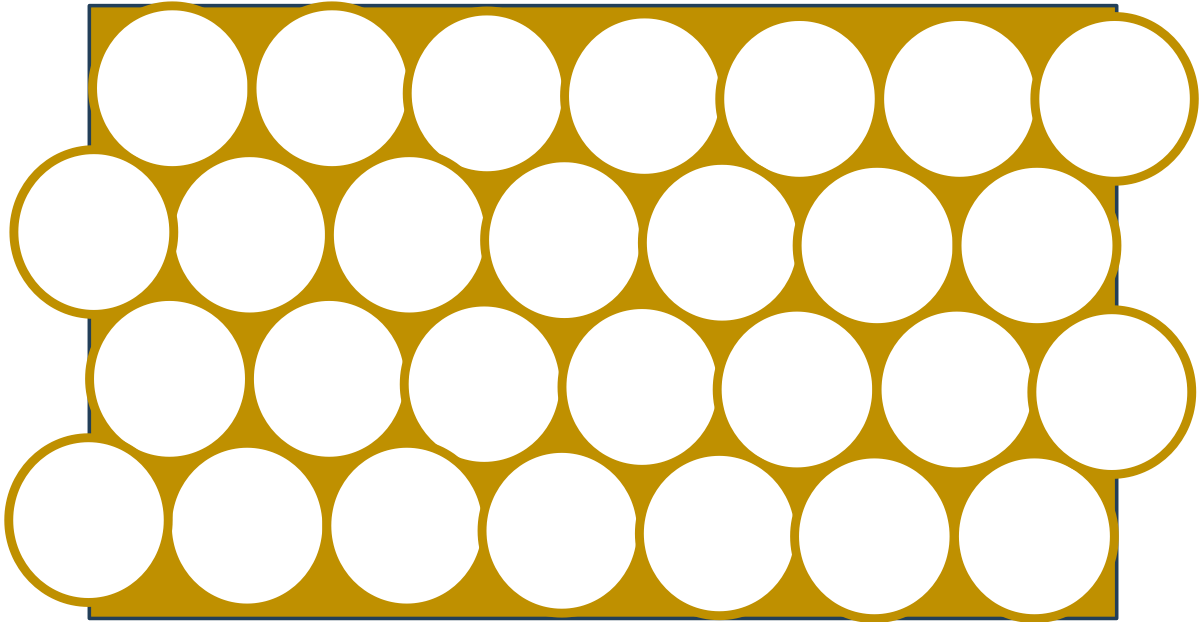


Casas cuadradas y circulares en el castro de Borneiro, Galicia. España. Fuente: perderelrumbo.com

Pero para la casa de la abeja bebé, cabe preguntarse hasta qué punto la superficie que hay en las esquinas de los cuadrados y de los hexágonos es **útil** para el animal. Parece que la celda circular sería la óptima puesto que toda la superficie sería útil.

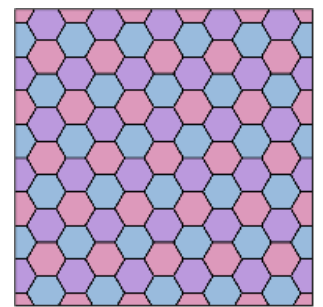
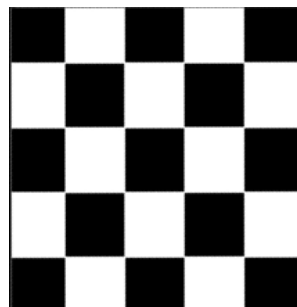
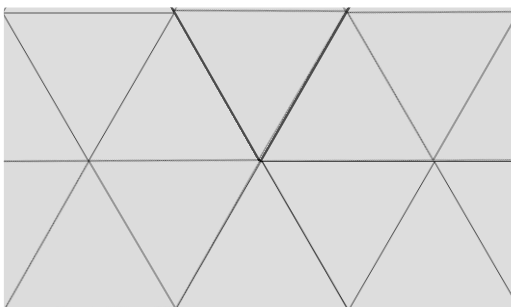
¿Por qué entonces las abejas hacen sus celdas hexagonales?

Las abejas saben muy bien por qué. La complicación añadida viene cuando queremos aprovechar la pared para la casa vecina. Si las celdas fueran circulares el panal tendría este aspecto:



Vemos que, de esta manera, las abejas tendrían que fabricar muchísima cera para rellenar el espacio que quedaría entre cada una de las celdas circulares, ya que los círculos no encajan unos con otros, y no teselan el plano.

Solo tres polígonos regulares son capaces de teselar un plano: el triángulo, el cuadrado y el hexágono.

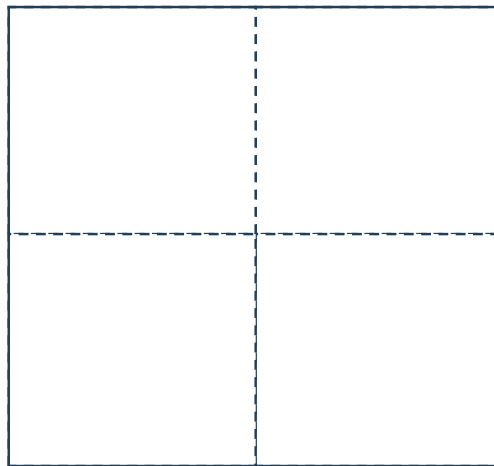


Teselado de triángulos equiláteros, cuadrados y hexágonos regulares. Los tres tipos de polígonos que son capaces de teselar el espacio sin dejar huecos.

Ahora ya entendemos por qué la humanidad se decidió por las casas cuadradas. Las casas cuadradas teselan el espacio y podemos poner una casa seguida de la otra, y comparten una pared común (chalets pareados, por ejemplo).

Además, una casa la dividimos en cuatro cuartos y optimizamos así el esfuerzo constructor. La palabra “cuarto” en castellano sirve para designar la cuarta parte, y también significa “habitación”.

Además, en el momento en que la humanidad comenzó a incorporar muebles (que siempre eran rectos por estar fabricados con madera), estos encajaban mal en las casas circulares y se desaprovechaba espacio.

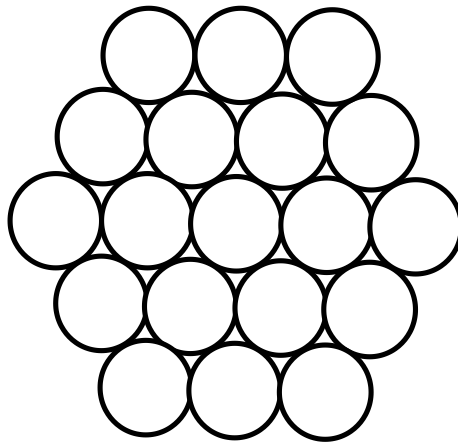


Casa dividida en cuatro cuartos, que comparten las paredes

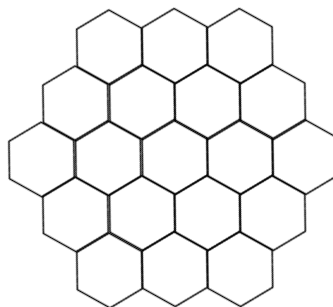
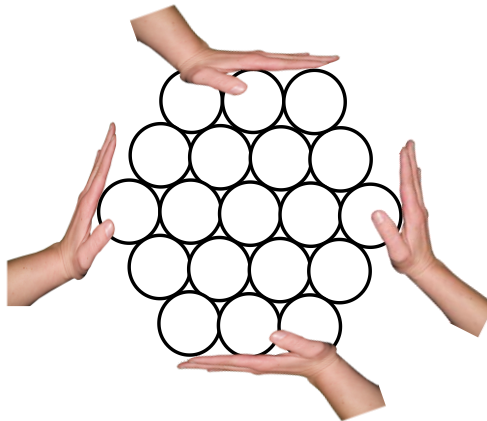
Dado que la abeja tiene forma cilíndrica, el triángulo es una muy mala idea como celda. A la abeja le sobrarían las esquinas y se perdería mucho espacio. Y con el cuadrado parece que ocurre lo mismo.

Con la figura del hexágono las abejas encontraron la solución a ambos problemas. Por una parte, hacían sus celdas casi “cilíndricas”, como son sus cuerpos, y por otra teselaban el espacio sin dejar ningún hueco entre celdas de manera que optimizan el enorme esfuerzo que les supone fabricar la cera, que es su material de construcción.

Con este ejemplo gráfico se entenderá lo ingeniosas que fueron las abejas hace cien millones de años. Si colocamos muchos cilindros juntos, por ejemplo, botes de pelotas de tenis sin las tapas, vemos que cada cilindro estará en contacto con seis cilindros a su alrededor.

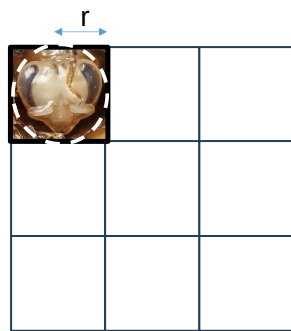


Si apretamos el conjunto aumentando la presión, cada cilindro se deformará hasta convertirse en un prisma hexagonal, de manera que ya no habrá espacios vacíos entre los botes de pelotas de tenis.

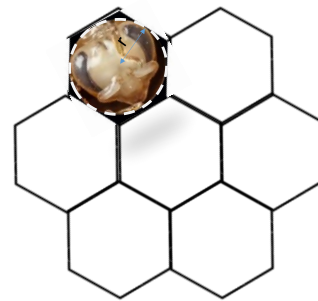


El hexágono es la figura que mejor aprovecha el espacio para una larva de forma cilíndrica, y además **tesela el plano sin dejar huecos**. Al ser la larva y la abeja de forma cilíndrica, cuanto más se parezca la sección a un círculo, más cómodas están y más se aprovecha el espacio de las celdas, de manera que más larvas caben en un mismo espacio.

Pero, además, dado que los hexágonos comparten paredes con seis celdas, la optimización es máxima como vamos a ver. Comparemos las dos teselas más inteligentes, el cuadrado y el hexágono:



$$\begin{aligned} &9 \text{ larvas de radio } r \\ &\text{Perímetro} = 24(2r) = 48r \\ &\frac{P}{N^{\circ} \text{ larvas}} = \frac{16}{3} r = 5,33 r \end{aligned}$$

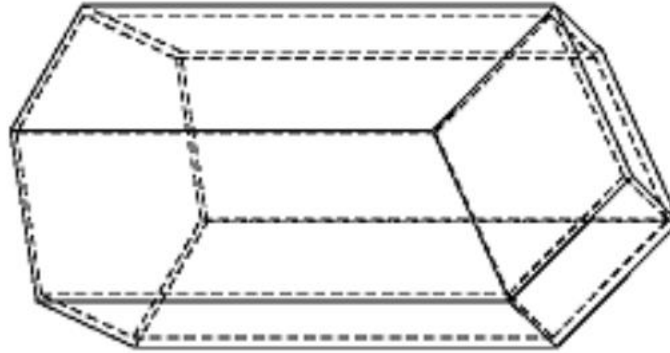


$$\begin{aligned} &7 \text{ larvas de radio } r \\ &\text{Perímetro} = \frac{60}{\sqrt{3}} r \\ &\frac{P}{N^{\circ} \text{ larvas}} = 4,95 r \end{aligned}$$

En un panal de cuadrados el esfuerzo obrero para construir el perímetro de la celda de cada larva es mayor que en un panal de celdas hexagonales. En el caso de las celdas cuadradas el esfuerzo de construir paredes es de 5,33 r, mientras que en el caso de las celdas hexagonales el esfuerzo es de 4,95 r.

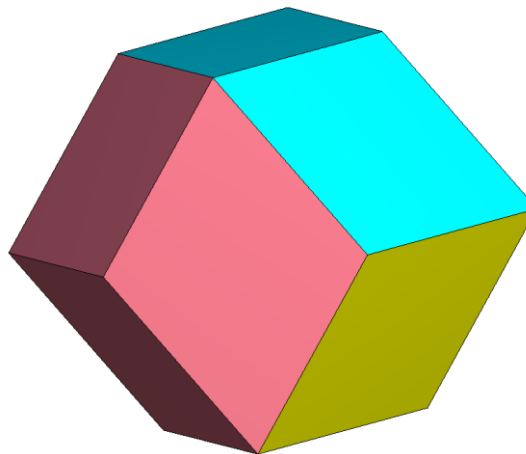
¡Pero lo más sorprendente está escondido dentro del panal!

Como hemos dicho, cada una de las “casitas” de cada larva tiene forma de prisma hexagonal, pero en el fondo de la casita se haya escondido un tesoro increíble. El prisma finaliza en tres rombos que encajan perfectamente con el prisma hexagonal.



La celda de la larva en un panal de abeja. La entrada tiene forma de hexágono, y el fondo de la celda se cierra con tres rombos

Esto inspiró a Kepler para encontrar la figura del dodecaedro romboidal (doce caras formadas por rombos). Con los rombos especiales de los paneles de las abejas era posible construir todo un dodecaedro, que nadie jamás había descubierto antes.



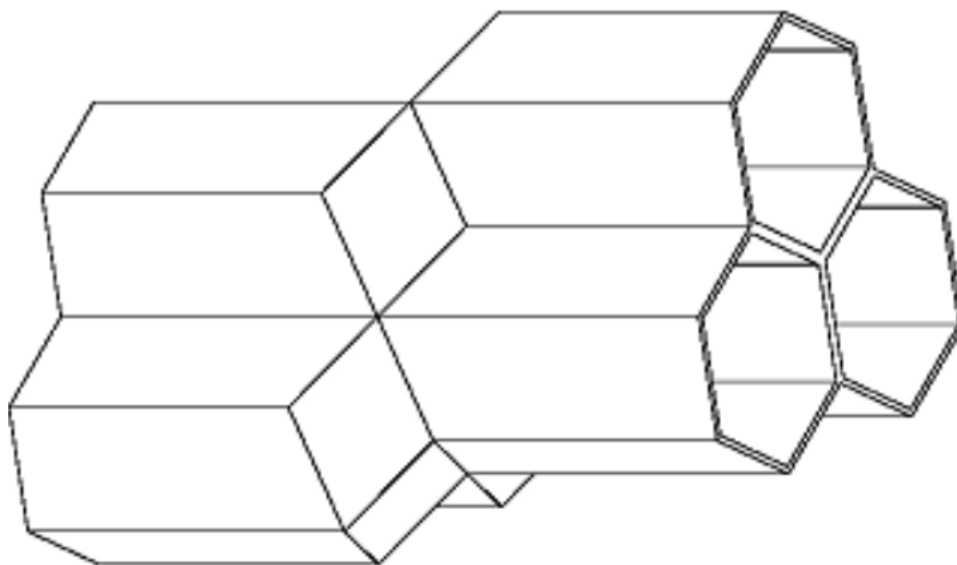
Dodecaedro romboidal descubierto por Kepler. Inspirado en las celdas de los panales de abejas. (Fuente: Tomruen)

Lo sorprendente es que este dodecaedro romboidal es el único, junto con el cubo, que es capaz de teselar el espacio en tres dimensiones.

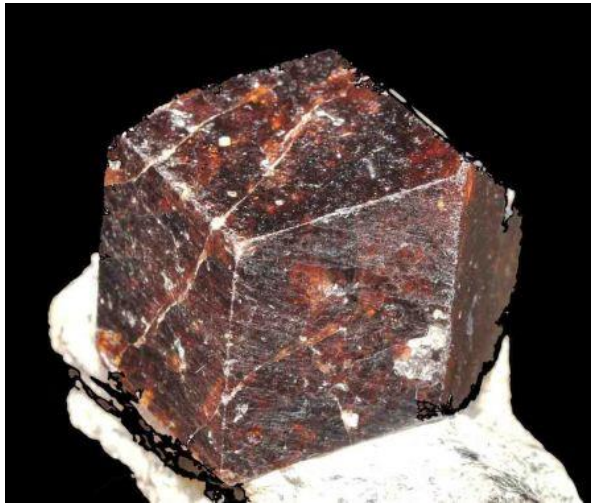


Dodecaedros rómbicos teselando el espacio sin dejar huecos. Fuente: culturacientifica.com

Esta propiedad la utilizan las abejas para encajar el fondo de una celda con el fondo de la celda del lado opuesto del panal, sin dejar huecos, de manera que se optimiza de nuevo el esfuerzo constructivo.



Hasta que Kepler no observó los paneles de abejas nadie había encontrado esta figura geométrica del dodecaedro romboidal ¿Nadie? Bueno, no es del todo exacto... La naturaleza ya había dado con esta solución en la cristalización del granate. Pero también en otros lugares, como vamos a ver.

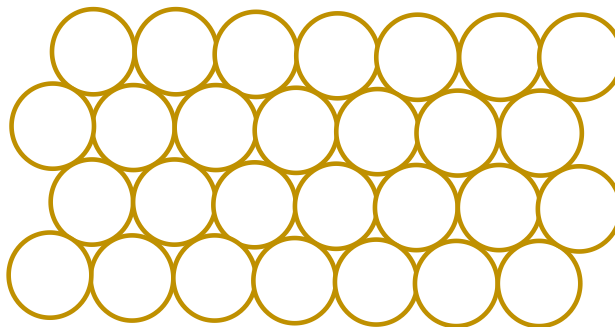


Dodecaedro rómbico. Mineral: Granate. Fuente: <https://mateturismo.wordpress.com/>

Este mineral fue llamado así por los romanos, por su parecido a los granos de la granada. Y, en efecto, la granada nos mostrará otro misterio matemático relacionado con todo esto. Vamos a explicarlo, os va a encantar.

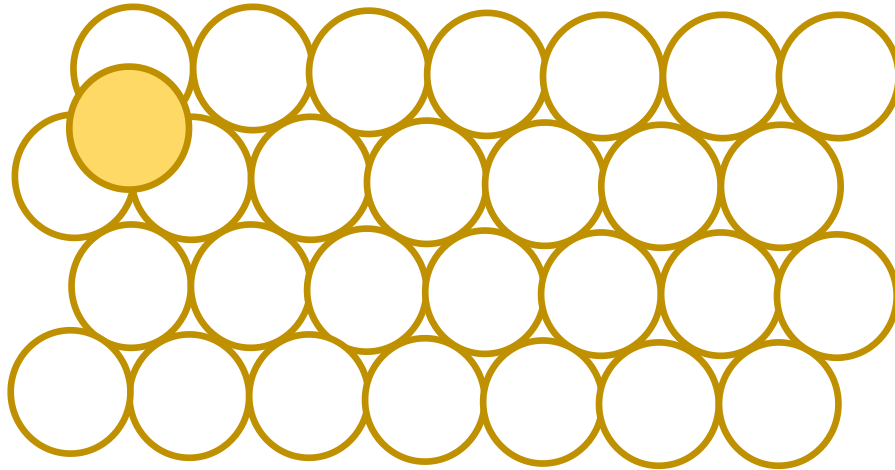
De nuevo fue Kepler quien se interesó en ello. Estuvo pensando la mejor manera de apilar las balas de cañón y no tardó en darse cuenta de que, la mejor manera, era apilar las balas de cañón como se hace en los barcos:

- Primera capa del apilamiento (vista desde arriba).

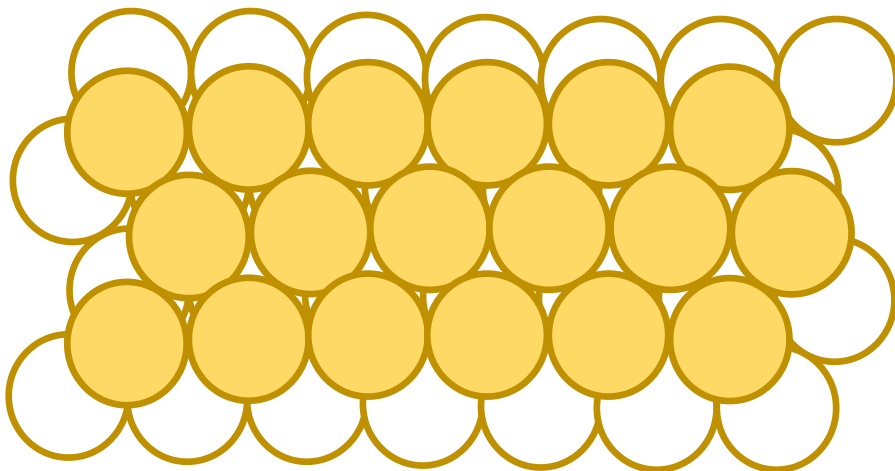


Es importante fijarse bien en la figura anterior. En una misma capa, cada bala de cañón está en contacto con otras **seis** balas.

- En la segunda capa, encima de la anterior, colocamos una bala apoyada en el hueco que queda entre tres balas de las de abajo. Así:



- Al ir rellenando la segunda capa irá quedando así:



Por supuesto, en este segundo piso de balas de cañón, que es idéntico al de abajo, también se cumple que cada bala está en contacto con otras **seis** en su mismo plano. Pero, además, cada bala está en contacto con otras **tres** balas de la capa de abajo.

- Cuando coloquemos las siguientes capas se irá cumpliendo que cada bala estará en contacto con **tres** balas debajo, **seis** en su capa (en su piso), y otras **tres** balas encima. En total **doce**.



Balas de cañón apiladas. Fuente: (c) Rama, Cc-by-sa-2.0-fr

- Y ahora el toque final. Esas balas dejan muchos huecos de aire entre ellas porque las esferas no teselan el espacio.

Si esas balas fueran deformables y las apretáramos las unas contra las otras para intentar no dejar huecos, cada una de ellas se deformaría apareciendo **doce caras** planas en cada “bola”, que encajarían perfectamente con las **doce bolas** con las que cada una está en contacto:



¡Y cada bola tendría así la forma de un **dodecaedro rómbico**!



Y esto es lo que sucede en la granada.



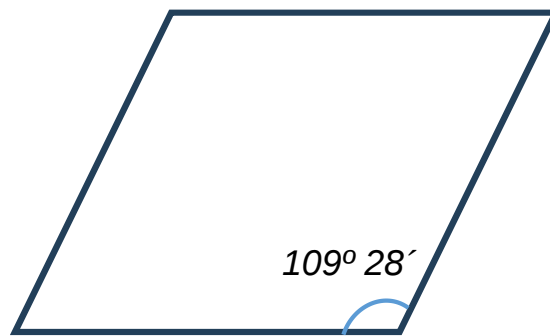
Los granos de la granada son inicialmente esféricos, pero al crecer y espachurrarse unos con otros sin dejar huecos en el espacio, acaban tomando la forma del dodecaedro rómbico.

Fuente: <https://metabolicas.sjdhospitalbarcelona.org/>

Esto mismo ya lo habían descubierto las abejas. Cada celda es un hexágono, de manera que cada larva tiene **seis** vecinas en su plano. Pero al construir el fondo de las celdas con forma de dodecaedro rómbico consiguen que encaje cada celda con otras **tres** celdas que tienen debajo (como las balas de cañón apachurradas). Lo explica mucho mejor Kepler, que fue quien se dio cuenta:

“La arquitectura es tal que cualquier celda comparte no sólo seis paredes con las seis celdas que lo rodean en la misma capa, sino también con las superficies planas de la base de las otras tres celdas de la capa contrapuesta. El resultado es que cada abeja tiene nueve vecinas” (Kepler).

Pero aún no han acabado las sorpresas. El dodecaedro rómbico se forma con un rombo muy específico. No vale cualquier rombo. En el siglo XVIII, de nuevo otro astrónomo, Maraldi, se obsesiona con el misterio de la conjetura del panal, y en concreto examina en profundidad los tres rombos del fondo del panal que, según Kepler, son capaces de formar un dodecaedro romboidal. Al medir el ángulo mayor de esos rombos descubre que, considerando la totalidad de celdas existentes en el panal que estaba examinando, el ángulo tiene que ser de $109^{\circ} 28'$



Pocos años después son los matemáticos los que pasan a obsesionarse con esta cuestión. En 1739 Koenig hizo los cálculos teóricos para ver cuánto debería medir ese ángulo del rombo en un dodecaedro romboidal. Para ello manejaba las tablas logarítmicas disponibles en aquella época. El ángulo teórico resultó ser de $109^{\circ} 26'$. Todos celebraron la increíble precisión de las abejas que prácticamente habían acertado con el ángulo de máxima optimización.

Pero la historia no acaba aquí. El matemático suizo Cramer se interesa por este asunto y calcula con sus propios medios el ángulo mayor del rombo del dodecaedro, de manera que se optimice el trabajo de las abejas. Resulta ser de $109^{\circ} 28'$.

Los resultados están divididos entre unos matemáticos y otros, hasta que acontece un hecho casual y fortuito justo en esos mismos años del siglo XVIII. Un barco naufraga en las costas inglesas y el capitán justifica que hizo todo correctamente y siguiendo las tablas logarítmicas que estaban a su disposición. Estas mismas tablas son las que habían sido usadas por Koenig en 1739. Cuando las tablas logarítmicas se corrigieron y se volvió a calcular cuál debía ser el ángulo del rombo, resultó ser de $109^{\circ} 28'$.

¡Las abejas tenían razón desde el principio!

Resulta difícil llegar a comprender cómo las abejas han podido llegar a ser tan extraordinarias arquitectas e ingenieras.

Intentemos un momento entender como habría funcionado la selección natural. Imaginemos que las abejas, en un inicio, hace 100 millones de años, hacían los panales cuadrados, por ejemplo. Y por azar, una de ellas nace con ganas de hacerlos hexagonales (que ya es difícil de comprender). Lo lógico es que el resto de la colmena la expulse o la mate, porque los panales hexagonales solo tienen sentido si todas las abejas a la vez están perfectamente coordinadas y construyen todas ellas las celdas de la misma forma, del mismo tamaño, y a las distancias precisas. Para que todo funcionara la abeja con ganas de hacer celdas hexagonales tendría que convencer al resto de abejas para que los hicieran como ella propone. Seguro que no fue así, pero cuesta imaginarse como se llegó a ese nivel de precisión siguiendo solo las reglas de evolución de Darwin y las reglas genéticas de Mendel. Si pensamos además en el misterio de la forma romboidal del fondo de las celdas y el ángulo preciso del rombo, el misterio es totalmente desconcertante.

Para terminar este apartado diremos que todos los grandes científicos y matemáticos se han mostrado maravillados desde antiguo por esta sorprendente aparición de las matemáticas en la naturaleza.

“La verdad matemática tiene una naturaleza absoluta y yace más allá de cualquier sistema de reglas específicas” “el desconcertante papel subyacente del mundo platónico en el mundo físico sigue siendo un misterio” (Roger Penrose).

“La enorme utilidad de las matemáticas en las ciencias naturales es algo que linda con lo misterioso, y no hay una explicación racional para ello” Eugene Wigner

“Llegados a este punto, surge el problema que tanto ha preocupado a los científicos de todos los tiempos. ¿Cómo es posible que las matemáticas encajen con tanta perfección en los hechos de la realidad, siendo un producto del pensamiento humano independiente de toda experiencia?” Albert Einstein. Geometría y Experiencia.

“Un milagro que seguramente va más allá de la comprensión humana” Schrödinger

“El universo no se puede entender a no ser que uno primero aprenda a comprender su lenguaje e interprete lo que en él se ha escrito. Está escrito en el lenguaje de las matemáticas” Galileo Galilei.

El misterio sigue sin desvelarse. Los grandes matemáticos de la historia (Euclides, Apolonio, Hilbert, Gauss, etc) han inventado, o descubierto según queramos mirarlo, numerosos objetos de matemáticas puras sin tener en mente ninguna aplicación futura para las mismas.

Décadas más tarde, y a veces más de mil años más tarde, se descubrió que dichos desarrollos de matemáticas “platónicas” daban soluciones prácticas a problemas de física reales.

Y la viceversa es también un misterio. Los desarrollos que la naturaleza ha ido realizando en optimización de figuras geométricas en minerales, casas de animales, galaxias, etc han resultado tener una base matemática descubierta recientemente.

“Dios es un matemático de primer orden, y utilizó matemáticas muy avanzadas para construir el universo” (Paul Dirac. Premio Nobel de física).

¿Por qué son tan poderosas las matemáticas para explicar el universo?

Los que consideran las matemáticas como una invención humana deben tener presente que el matemático se ve totalmente obligado por unas reglas que limitan en gran medida lo que puede o no puede hacer. Por poner un ejemplo, el hecho sorprendente de que la proporción de los números sucesivos de la serie de Fibonacci converge hacia la proporción áurea fue un descubrimiento, no un invento. Vino **impuesto**, el matemático no pudo elegir. Los objetos matemáticos tienen propiedades reales que no se pueden atravesar. En este sentido, las reglas matemáticas son tan infranqueables como las paredes de una habitación.

En el siguiente apartado veremos como las matemáticas en la naturaleza se pueden complicar hasta el extremo.

1.1.8. La teoría del caos

Según los positivistas, el objetivo de la ciencia no es explicar cómo es la naturaleza, ni explicar cuál es la esencia de las cosas. Su objetivo es desarrollar leyes y teorías para entender y **predecir** los fenómenos.

El caos no supone un problema teórico puesto que los sistemas caóticos se entienden bien con la ciencia, porque son deterministas, es decir, conocidas las condiciones iniciales, basta con aplicar las fórmulas para, en teoría, conocer los resultados finales. Sin embargo, son un desafío importantísimo a la hora de poder **predecir** el comportamiento de la naturaleza, que es el objetivo fundamental de la ciencia.

En la novela de Parque Jurásico el carismático matemático Ian Malcolm vaticinaba un final impredecible y probablemente catastrófico en la isla. Hammond, el fundador del parque, le insistía en que había un equilibrio perfectamente medido y que no había nada de qué preocuparse, pero ese equilibrio resultó ser **inestable**, cualquier imprevisto por leve que fuera

podía conducir todo el sistema hacia situaciones totalmente impredecibles y de magnitud desconcertante. Entenderemos en este capítulo como pudo Ian Malcolm lograr predecir algo así.

En 1963 el meteorólogo y matemático Edward Lorentz analizaba en su ordenador las condiciones meteorológicas que esperaba encontrar en los próximos días. Al introducir las variables de gradientes temperatura existentes en los distintos lugares del mapa para el día presente, el modelo calculaba las condiciones atmosféricas que se esperaban en el futuro. En un momento determinado le llamó la atención que el resultado le había salido totalmente distinto de lo que el ordenador había calculado la vez anterior, a pesar de que estaba convencido de haber metido las mismas variables iniciales. Al revisarlo con cuidado, se dio cuenta que la primera vez había introducido para una variable el valor 3,1543 mientras que la segunda vez había introducido 3,15434. Y este pequeño cambio había producido que el resultado fuera totalmente distinto.

A partir de aquí, comenzó a estudiarse lo que fue llamado “la Teoría del caos”. Como siempre se dice, una mariposa batiendo sus alas en Japón influirá, un tiempo después, en la meteorología de Nueva York. Veremos por qué se habla en concreto de *una mariposa*.

Por tanto, como hemos dicho, en los sistemas caóticos, un cambio infinitesimal en las condiciones iniciales produce un efecto desproporcionado en los resultados finales. Esto hace que sea imposible predecir resultados en sistemas caóticos, porque, aunque el modelo fuera exacto, y el ordenador fuera infinitamente potente, la medida que hacemos de las condiciones iniciales nunca será suficientemente precisa.

Seguramente podéis pensar que la teoría del caos solo aplica a problemas complejos, como el tiempo atmosférico, donde muchas variables interaccionan las unas con las otras. Pero no es así. Os propongo que analicemos un sistema muy simple para que podamos ver como el caos afecta enseguida.

Pensemos por ejemplo un sistema formado por unas bolas moviéndose y chocando en una mesa de billar. Preparamos el tapete de la mesa y las bolas de tal forma que la fuerza de rozamiento es mínima. Obviamente es un ejemplo físico totalmente determinista y fácil de calcular. Dadas las velocidades iniciales y las masas de las bolas, es muy fácil calcular matemáticamente el estado futuro del sistema, basta con aplicar fórmulas de la conservación de la cantidad de movimiento, la conservación de la energía, etc. Y, sin embargo, bastan **unos pocos segundos** de choques entre las bolas para que todo lo calculado deje de cumplirse. Cualquier defecto minúsculo e imperceptible en alguna de las bolas, o en el tapete, o alguna minúscula diferencia entre la masa real de una bola concreta y la que hemos introducido en el modelo, harán que esa

bola, al chocar con otra, se desvíe un ángulo imperceptible. A partir de ese momento, al andar la pelota con un ángulo ligeramente desviado, el error se multiplica con la distancia recorrida, y si recorre 30 cm golpeará con otra pelota de un modo muy distinto a lo calculado inicialmente. Y a partir de ahí, estas dos pelotas saldrán rebotadas en ángulos distintos de los previstos y, al interaccionar con las otras estarán incorporando errores en el sistema de la mesa de billar, contaminando ese error a cada pelota con la que choquen. En solo unos pocos segundos, ya serán muchas pelotas las que se están comportando de una forma totalmente distinta de lo inicialmente previsto, y los resultados reales serán totalmente diferentes a los calculados.

En realidad, la mayor parte de los modelos que hacemos de la naturaleza son caóticos. En estos sistemas caóticos, la imprecisión de una predicción aumenta exponencialmente con el tiempo transcurrido.

Por ejemplo, imaginemos que el meteorólogo es capaz de decirnos el tiempo que va a hacer mañana, con un 90% de probabilidades de acierto. Entonces, la predicción del tiempo para dentro de 10 días tendrá una probabilidad de acierto de

$$(90\%)^{10} = 34\%$$

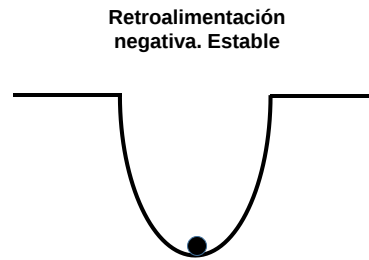
Es decir, no sería capaz de predecir el tiempo que va a hacer dentro de 10 días.

El tiempo en que un sistema es predecible se llama **tiempo de Lyapunov**. Indicamos algunos ejemplos que ya hemos comentado en estos cursos:

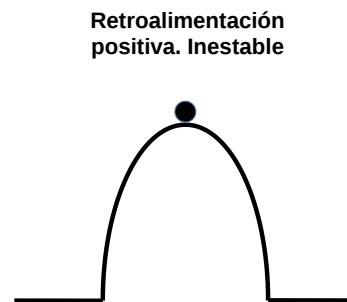
- En los choques de muchas pelotas de billar: solo podremos predecir el comportamiento del sistema durante **unos segundos**.
- En sistemas meteorológicos: La predicción es acertada solo con unos **pocos días de antelación**.
- El comportamiento de los planetas en el sistema solar, debido a la interacción gravitatoria entre los planetas y satélites, solo es predecible **durante 5 millones de años**.

En los sistemas caóticos pueden existir fenómenos que tienden a la estabilidad del sistema (retroalimentación negativa), y otros que tienden a la inestabilidad del sistema (retroalimentación positiva).

Un ejemplo de sistema estable con retroalimentación positiva es una pelota situada en el interior de un agujero curvo. Perturbaciones en el estado de la pelota no modificarán de manera exagerada su posición, porque la pelota tiende a quedarse en su sitio. De manera que es muy fácil predecir dónde estará la pelota en un tiempo determinado, con muy poco error.



Sin embargo, una pelota situada en lo alto de un montículo curvo es inestable. Cualquier perturbación que sufra la pelota (por ejemplo, una pequeña ráfaga de aire) hará que la pelota se desvíe de su posición de manera irremisible. Si esa ráfaga de aire imprevisible mueve la pelota a la derecha podemos encontrarla al cabo de un rato muy lejos por la derecha. Y si se hubiera movido a la izquierda la encontraríamos muy lejos a la izquierda. Y no podemos predecir en cuál de los dos lugares puede aparecer.



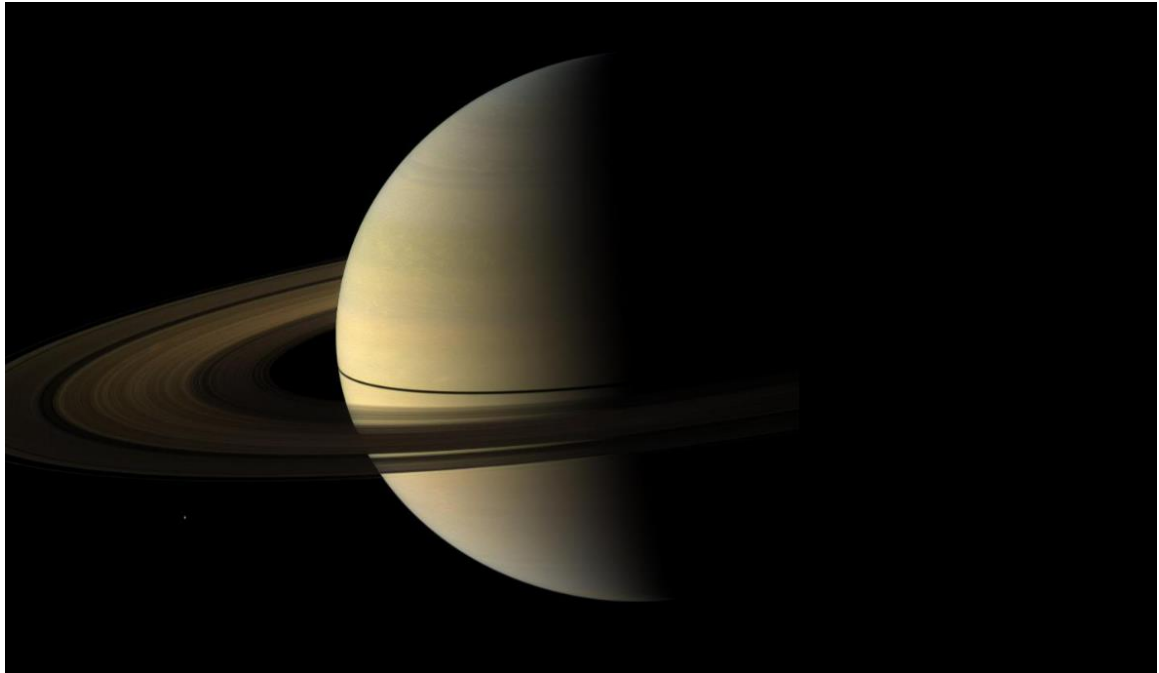
En muchos sistemas caóticos se dan retroalimentaciones positivas y retroalimentaciones negativas.

Las resonancias que se dan entre los planetas del sistema solar, de las que hablamos en el curso pasado, y que volveremos a comentar en este capítulo, pueden ser un ejemplo de retroalimentación positiva, pero también de retroalimentación negativa.

Por ejemplo, Mimas, el satélite de Saturno produce una resonancia desestabilizadora en el material de los anillos de este planeta a una distancia concreta, de manera que existe un hueco en el interior de los anillos, la conocida *división de Cassini*.

Los anillos de Saturno están formados de partículas de polvo y hielo que orbitan alrededor del planeta. Las que partículas de polvo que están más lejos tardan más en dar una vuelta completa, y las que están más cerca tardan menos, esto ya lo vimos en el curso pasado. En concreto, a una distancia de 120.000 km del centro no hay polvo, ni hielo, ni partículas, hay un agujero en los anillos, una discontinuidad, ¿por qué?

A esa distancia si un cubito de hielo estuviera en órbita tardaría 11 h en dar una vuelta⁷. El planeta Mimas, que se encuentra a una distancia de 185.000 km del centro de Saturno, tarda 22 h en dar una vuelta al planeta. De manera que, cada 22 h, el cubito de hielo y Mimas se encontrarían siempre en la misma posición relativa, creando una resonancia desestabilizadora que expulsaría al cubito de hielo de esa órbita.



En esta imagen se percibe muy bien la división de Cassini en el anillo de Saturno. El punto blanco es el satélite Mimas, responsable de dicha singularidad. Fuente Cassini Imaging Team.

Pero también existen, como digo, resonancias estabilizadoras⁸. Los sistemas, en general, tienden a encontrar un ritmo, tienden a ir acompasados. Es como cuando bailamos al son de la música.

⁷ En el segundo curso aprendimos a calcular lo que tardar un cuerpo en órbita al dar una vuelta completa. Para obtener una buena aproximación basta con igualar la fuerza gravitatoria a la fuerza centrífuga. De esta manera obtenemos que la velocidad angular depende de G, la masa del planeta **y la distancia**. No depende de la masa del cuerpo en órbita $\frac{GMm}{D^2} = \frac{mv^2}{D}$

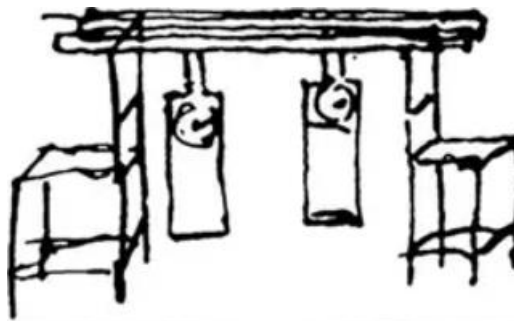
⁸ En el capítulo del Principio Antrópico repasaremos algunas de estas resonancias que se dan entre los planetas y que ya adelantamos en el anterior curso.

El ejemplo más conocido de esta sincronización a la que tiende la naturaleza es el de los relojes de Huygens. En 1656 este famoso científico inventó el reloj de péndulo. Se dio cuenta de que cualquier péndulo de longitud L tardaba un tiempo p en realizar la oscilación completa, valor que dependía de la raíz de L .

$$P = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

Para $L = 1$ m el tiempo que tarda el péndulo es dos segundos (un segundo en su movimiento hacia un lado, y un segundo en su movimiento hacia el otro lado). Y no importa la masa que pongamos en el péndulo, solo importa la longitud. Lo curioso es que tampoco importa cuánto alejes el péndulo de su posición de equilibrio en el inicio. De manera que, aunque vaya perdiendo altura y energía con el rozamiento, el periodo de oscilación no cambia. Huygens aprovechó esta circunstancia para fabricar sus relojes.

Pero lo interesante para lo que nos ocupa es que, por alguna misteriosa razón, los péndulos de los distintos relojes de la habitación ¡tendían siempre a ir acompasados! Él los dejaba desacompasados, y ¡al cabo de un tiempo volvían a quedar acompasados! Dedujo, con razón, que este acompasamiento se debía a las pequeñas vibraciones que se transmitían entre los soportes, las paredes, etc, de reloj en reloj.



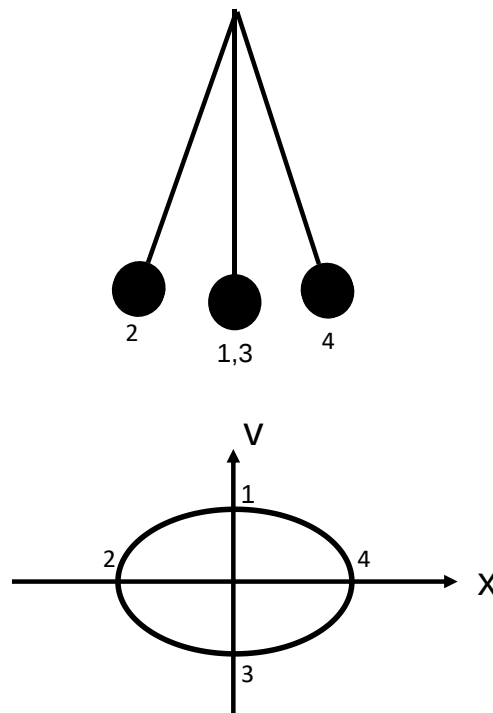
En efecto, todo tiende a ir acompasado. El caos tiende a ordenarse de manera casi misteriosa. Como veremos más adelante, también los planetas tienden a acompasarse en sus órbitas, de manera que buscan resonancias estabilizadoras y mantenerse así en órbitas estables.

Para poder seguir comprendiendo algo más sobre el caos, analizaremos el concepto de “atractor”.

Siguiendo con el ejemplo del péndulo, podemos tratar de representar en una gráfica como varía la velocidad en función de la posición de la masa del péndulo.

La velocidad resulta ser máxima cuando el péndulo pasa por el punto medio, y es nula justo cuando el péndulo alcanza su máxima elongación.

Esa gráfica tendría esta forma, si ponemos en el eje de ordenadas la velocidad, y en el eje de abscisas la desviación respecto al punto de equilibrio.



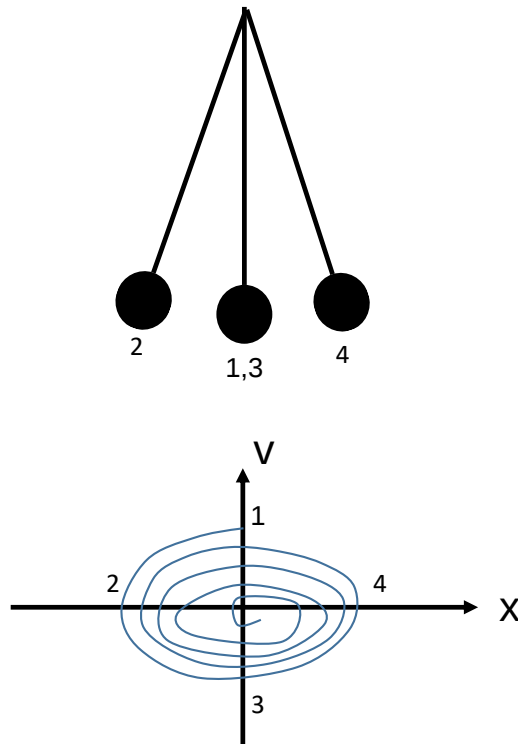
En el punto 1 el péndulo lleva máxima velocidad, pero la distancia respecto al punto de equilibrio es nula.

En el punto 2 tiene máxima elongación y la velocidad es nula.

En el punto 3 la velocidad es máxima, pero en sentido de retorno (distinto signo) y la distancia al punto de equilibrio es nula.

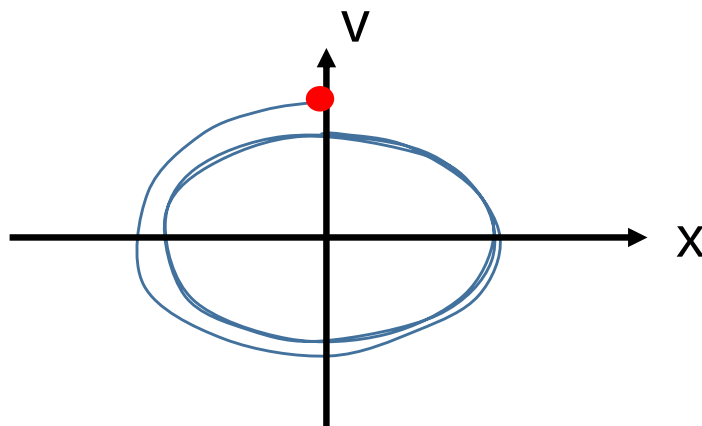
En el punto 4 alcanza máxima elongación y la velocidad es nula.

En condiciones ideales el péndulo mantendría este movimiento eternamente, pero en la realidad acaba perdiendo energía por el rozamiento con el aire, de manera que su movimiento es similar a este:

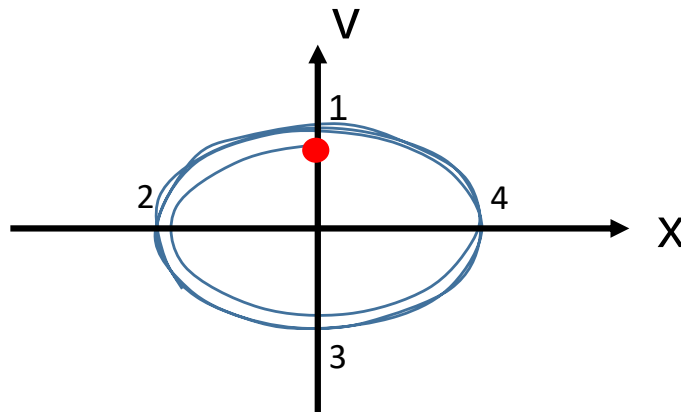


Vemos que el sistema se ve atraído por el punto de máxima estabilidad, hasta que, después de miles de oscilaciones, habrá perdido toda su energía, y quedará quieto en la posición estable.

Para que los relojes duren más tiempo funcionan con un sistema de pesas, que además de darles la energía para durar más tiempo, el sistema les “obliga” a funcionar con una determinada amplitud constante. Da igual que el péndulo lo iniciemos con una amplitud mayor o menor, tenderá a oscilar según la amplitud de su diseño. Si lo iniciamos con una amplitud excesiva (punto inicial rojo), el comportamiento sería este:



Si, por el contrario, lo iniciamos con una amplitud demasiado corta, el comportamiento sería este:



Vemos que el sistema se siente **atraído** por un movimiento de amplitud determinada para el que ha sido diseñado. En este caso la elipse que se ve en la figura será el “atractor” al que tiende el sistema.

Ahora estamos en disposición de poder entender el maravilloso concepto de los “atractores extraños” que aparecen en la teoría del caos.

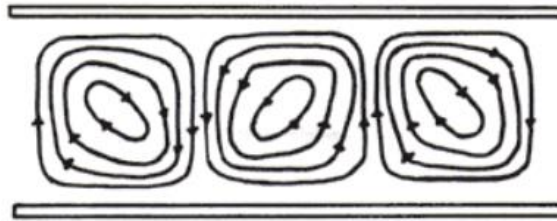
Los atractores extraños

En los sistemas **caóticos** es posible identificar también estos atractores, pero son llamados “atractores extraños”.

Volvemos ahora al meteorólogo Lorentz para entender algo más acerca de cómo se comporta el caos. Si el caos es solo caos ¿cómo es posible que se estudie? ¿cómo es posible que haya una ciencia que estudia el caos? Porque como decía Ian Malcolm en Parque Jurásico, “existe un orden subyacente en los sistemas caóticos”.

Lorentz simplificó al máximo el problema del comportamiento de la atmósfera. Modeló en su computadora un ejemplo sencillo en el que existía un gradiente de temperatura, es decir, la temperatura en altura era más baja que la temperatura al ras del suelo. Esto es habitual porque el suelo está más caliente por contacto con la superficie. Pensó en simplificar al máximo el modelo y lo hizo bidimensional, es decir, solo había ancho y alto.

Como el aire de abajo está en contacto con el suelo se calienta y se hace menos denso, y tiende a subir. Se genera así un movimiento de convección en el aire que modifica a su vez el propio gradiente. Debía de ocurrir algo similar a esto:



Lorentz pretendía ir más allá, quiso modelar este comportamiento y ver cómo evolucionan con el tiempo esas celdas de convección que aparecen en el dibujo. Se dio cuenta de que el propio flujo de convección modificaba el gradiente de temperatura, y el cambio en el gradiente modificaría el flujo de convección, de manera que el sistema sería **dinámico** y cambiaría continuamente.

A partir de un determinado gradiente de temperaturas inicial, el modelo matemático computarizado debía calcular como evolucionaría el sistema en el futuro, como consecuencia de los movimientos que se originarían en el aire por convección. Los diferentes posibles estados de este sistema los coloca en coordenadas tridimensionales, siendo:

- X, un valor indicativo de la velocidad del fluido y su sentido de giro en la celda de convección (negativo si circula en sentido antihorario y positivo si circula en sentido horario).
- Y representa el gradiente de la temperatura (variación de la temperatura en sentido vertical)
- Z indica cuanto se desvía el gradiente de la linealidad. Cuando z es mayor que cero, el gradiente cerca del suelo y en la parte más alta es más acusado.

Las fórmulas que establece Lorentz las obtiene del análisis físico del sistema:

$$\frac{dx}{dt} = \sigma (y - x)$$

$$\frac{dy}{dt} = \rho x - y - xz$$

$$\frac{dz}{dt} = xy - \beta z$$

Siendo ρ , β y σ variables que dependen de las condiciones físicas del fluido, y de las dimensiones del modelo.

Atractor Extraño

X: Velocidad de convección

Y: $T_1 - T_2$

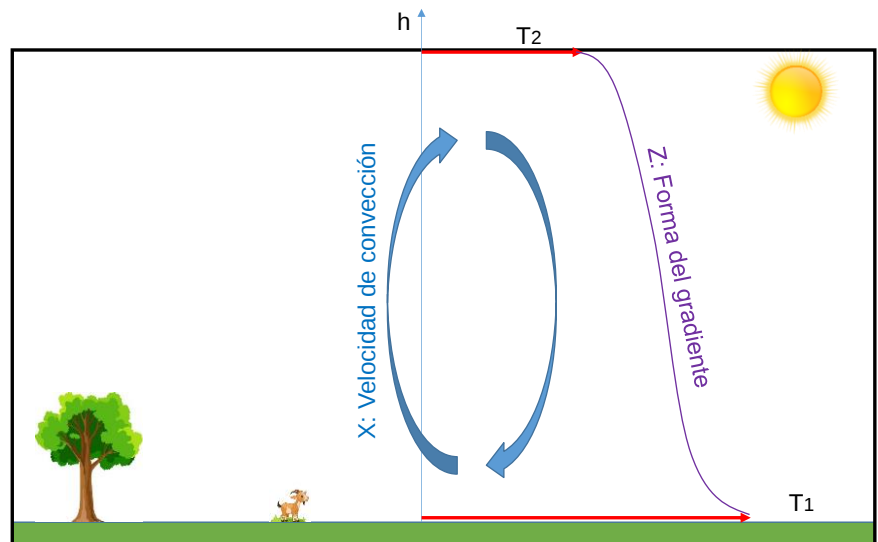
Z: Forma del gradiente

$$\frac{dx}{dt} = \sigma (y - x)$$

$$\frac{dy}{dt} = \rho x - y - xz$$

$$\frac{dz}{dt} = xy - \beta z$$

σ, ρ, β son constantes que dependen del fluido y del tamaño del modelo



Es fácil calcular las situaciones de equilibrio de este sistema dinámico. Si igualamos a cero las tres ecuaciones, significa que las derivadas de X, Y, Z respecto al tiempo son cero, y por tanto, significa que X, Y, Z no cambian con el tiempo y por tanto quedan en equilibrio.

Al igualarlas a cero obtenemos tres soluciones posibles (tres puntos de equilibrio):

Punto de equilibrio 1: (0,0,0)

Punto de equilibrio 2: $(\sqrt{\beta(\sigma-1)}, \sqrt{\beta(\sigma-1)}, (\sigma-1))$

Punto de equilibrio 3: $(-\sqrt{\beta(\sigma-1)}, -\sqrt{\beta(\sigma-1)}, (\sigma-1))$

El punto de equilibrio 1 es fácil de entender. La temperatura arriba es igual a la de abajo, y por tanto no hay gradiente ($Y = 0$). Tampoco hay ningún movimiento del aire ($X=0$). Y la forma del gradiente es lineal, es una recta ($Z=0$). En cualquier caso, se trata de un equilibrio inestable. Cualquier leve modificación en la temperatura o en la velocidad del aire pone en marcha el ventilador⁹.

⁹ Siempre que los parámetros σ, ρ, β que dependen del fluido y de la geometría, hagan caótico el sistema.

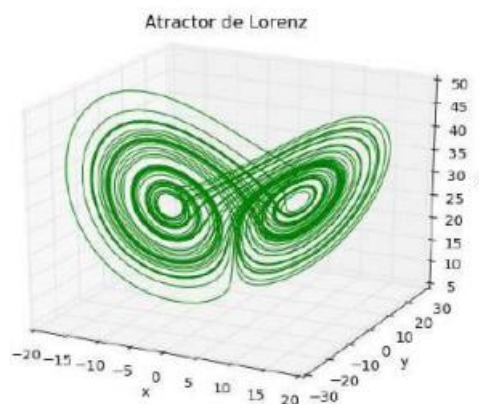
Los otros dos puntos de equilibrio son unas condiciones muy, muy singulares en donde la velocidad de convección del aire y el gradiente tiene unos valores que podrían permanecer eternamente, siempre que no hubiera ningún tipo de perturbación, por mínima que sea. Pero cualquier perturbación en la temperatura o en la velocidad del aire sacaría al sistema del punto de equilibrio **para no regresar jamás**.

Lorenz se llevó varias sorpresas cuando programó su computador para representar el movimiento del sistema en esos ejes x,y,z.

Resultó que los valores nunca se repiten. La gráfica evoluciona sin llegar, jamás, a adquirir los mismos valores nunca. Es una gráfica que jamás se corta a sí misma pero que se mantiene siempre en un entorno acotado.

Si en algún momento se repitieran los valores (si se cortara a sí misma) se convertiría en un ciclo, dado que los valores del instante siguiente dependen de los valores del instante anterior.

Pero lo más sorprendente de todo fue la forma de *mariposa*¹⁰ que tomaba la gráfica de tres dimensiones:

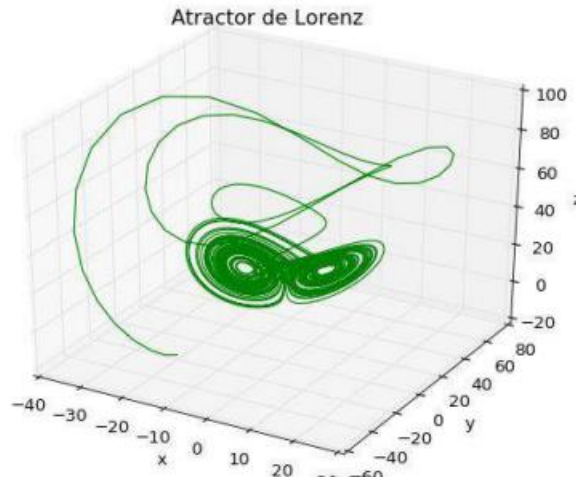


Fuente: Soledad Represa

El sistema se mueve en ese volumen x,y,z acotado, sin repetirse nunca, y sin que la curva se corte nunca, y parece girar alocado alrededor de los dos puntos de equilibrio inestables.

¹⁰ La famosa mariposa de la teoría del caos.

Si iniciamos el sistema en un punto muy alejado de los puntos de equilibrio, el comportamiento es este que vemos en el gráfico. Es decir, tiende hacia su “atractor extraño” en forma de mariposa.



Fuente: Soledad Represa

Pero lo más interesante es que el modelo manifestaba una inestabilidad exponencial. Una variación infinitesimal suponía que, al cabo de 5.000 posiciones, el resultado de los valores de x,y,z era totalmente distinto. Si realizamos una modificación de una millonésima parte en x, los resultados que encontramos son increíblemente dispares¹¹:

$P_0 = (1,1,1)$	$P_{5000} = (8.34068322, 13.90654651, 17.03616983)$
$P_0 = (1.000001, 1, 1)$	$P_{5000} = (-3.94262129, -5.58201512, 26.77400018)$

En efecto, el error se amplifica de manera exponencial. Si el error se duplica al tercer día, se multiplica por 300 al cabo de un mes, por 100.000 al cabo de dos meses, y por 10^{30} al cabo de un año.

Y, sin embargo, a pesar de esa imposibilidad para predecir el comportamiento del sistema, podemos ver en la gráfica un cierto orden en el caos.

¹¹ Fuente: <http://casanchi.org/fis/elorenz01.pdf>

Da igual que empecemos con unas condiciones iniciales muy exageradas, el sistema tiende a comportarse dentro de su “atractor extraño”, pero sin pisar nunca una línea anterior y, por tanto, sin repetirse jamás.

Es muy interesante ver el comportamiento del modelo de Lorenz en este [gif](#) animado¹².

Si vemos el modelo y lo dejamos unos segundos le vemos crear unas “formas” con un determinado aspecto. Si lo dejamos durante días seguirá creando formas similares, pero nunca iguales. Y si lo dejamos funcionando durante años seguirá creando esas formas “similares”, pero nunca iguales.

El atractor extraño de Lorenz es un fractal, es decir, un objeto geométrico cuya estructura básica se repite a diferentes escalas.

Con Lorenz comenzó por primera vez el estudio del caos, pero será Mandelbrot quien le dará un gran empujón a la teoría en 1975, cuando define el concepto de fractal, que ya hemos visto en el apartado anterior.

Los fractales son ampliamente utilizados en la teoría del caos. Se ha demostrado que los sistemas caóticos tienden a auto reproducirse en distintas escalas de tiempo y de espacio.

Cuando vemos un remolino en día caluroso en el campo seco, tiene la forma de un gran tornado, que a su vez tiene la forma de un gran huracán.

Los estorninos

El físico italiano Giorgio Parisi ha sido galardonado en 2021 con el premio nobel de física debido a sus estudios del comportamiento caótico de las bandadas de estorninos. Estos pájaros forman bandadas de muchos millares de individuos y el comportamiento del conjunto es fantásticamente dinámico, adquiriendo formas caprichosas continuamente, que recuerdan a las formas de dos líquidos viscosos mezclándose.

Este comportamiento fantásticamente caótico se debe a unas reglas muy simples que sigue cada estornino. Cada uno de estos pájaros sigue el vuelo de los siete pájaros que tiene a su alrededor.

¹² Los interesados en recrear este modelo en su ordenador pueden hacerlo siguiendo las pautas de este documento: <http://casanchi.org/fis/elorenz01.pdf>

Cuando por algún motivo, un individuo de la bandada gira de manera anormal (normalmente un estornino del extrarradio), en medio segundo este leve movimiento ha sido comunicado a 400 pájaros de la bandada. Esto hace que el grupo sea extremadamente sensible a cualquier variación en las corrientes de aire, y no digamos a la existencia de un posible depredador.

En este video podréis disfrutar del comportamiento hipnótico de los estorninos (recomiendo a partir del minuto 1:20). Creo que es un buen final de este apartado de la teoría del caos.

https://www.youtube.com/watch?v=OxYn3e_imhA

Pasamos ahora a detenernos los dos grandes misterios por antonomasia:

- El misterio de la existencia del cosmos, del orden en la naturaleza. El misterio de la entropía.
- El misterio de la existencia del hombre. El principio antrópico.

1.2 El gran misterio de la entropía. La tendencia al desorden

¿Por qué hay orden y no caos?

Hemos visto en el apartado anterior que, incluso en los sistemas de la naturaleza que más caóticos parecen ser, existe un orden inherente. La propia ciencia se basa, precisamente, en que existe un orden en la naturaleza. El firme convencimiento de los griegos de que existía ese orden puso en marcha el fenómeno de la ciencia occidental. Los científicos se asombran cada día con maravilloso orden del funcionamiento del cuerpo humano, la interrelación entre las distintas especies dentro de un mismo ecosistema, el orden existente en los minerales y la química en general, etc. Este misterio es tan increíble que le dedicaremos algo más de tiempo, porque me parece realmente interesante, y estoy seguro de que a vosotros también os lo va a parecer.

El otro día mi hijo me hacía la siguiente pregunta, “Papá ¿no te parece increíble que todo lo que el hombre ha construido, los satélites, los teléfonos móviles, los sensores de presencia, los ordenadores, los coches, etc. funcionan con materiales que hemos sacado de las piedras? ¿No es increíble que el ser humano haya logrado que las piedras se comporten de esa manera?”

La verdad que me dejó reflexionando un buen rato y me llevó a esta otra pregunta “¿no es aún más increíble que las plantas, los tigres, las ballenas y los seres humanos estemos también hechos del material de las piedras? Que seamos polvo de estrellas en realidad”.

En este capítulo afrontaremos uno de los mayores enigmas de la física y de la ciencia ¿cómo es posible que exista algo tan increíblemente ordenado como la vida? ¿cómo es posible que exista algo tan increíble como el ser humano? ¡Todo ello hecho a base del material de las piedras y la tierra!



Pero este análisis también nos llevará, irremisiblemente, a un análisis del sentido del tiempo, que siempre parece ir en una misma dirección. Bienvenidos al misterio de la entropía.

1.2.1. La segunda ley de la termodinámica

El primer principio de la termodinámica es muy conocido para todos. La materia y la energía no se pueden crear ni destruir, solo se transforma. Por ejemplo, el agua cae, y con su energía, mueve una turbina, que genera energía eléctrica, que cargará una batería en forma de energía química, que moverá un coche eléctrico, que luego al frenar, generará calor en las ruedas y el asfalto. En ninguno de estos casos la energía desaparece, se transforma todo el tiempo.

Sin embargo, esas transformaciones no siempre son reversibles. Es más, en sentido estricto, nunca lo son. Es decir, esas transformaciones solo pueden producirse en una determinada dirección, y no podemos volver al sistema inicial. Nunca. Lo explicaremos bien a lo largo de todo este capítulo.

La Segunda Ley de la termodinámica dice así: “cualquier proceso que se produzca en el universo, incrementa la entropía”. Y la entropía es “desorden”.

Esta ley es la más importante de toda la física.

“Pienso que la ley que supone que la entropía siempre aumenta ocupa una posición superior entre las leyes de la naturaleza. Si alguien le demuestra que la teoría que desarrolló se encuentra en desacuerdo con las ecuaciones de Maxwell., entonces, pues qué importan las ecuaciones de Maxwell. Pero, si su teoría contradice el segundo principio de la termodinámica, no puedo concederle a usted ninguna esperanza” (Eddington).

“La primera ley de toda la ciencia” (Einstein).

Pero cuando decimos que el desorden siempre aumenta ¿a qué nos referimos? ¿qué es el desorden? Lamentablemente esa pregunta es muy complicada y trataremos de ir respondiéndola poco a poco.

Empecemos por un ejemplo muy sencillo. Tenemos cierto orden en nuestra cocina. En un recipiente tenemos agua caliente, y en otro tenemos agua fría. Nuestro hijo, jugando, los ha mezclado en un recipiente más grande, y el agua ha quedado templada. Y nosotros nos enfadamos, pero él no entiende por qué nos enfadamos, y nos dice “no pasa nada papá, sepáralos de nuevo, y guardamos otra vez el agua caliente en uno de los frascos y el agua fría en el otro”. Pronto aprenderá que las cosas que suceden son definitivas, no tienen marcha atrás.

El universo tiende a un equilibrio térmico, tiende según este principio a convertirse en una sopa inmensa y templada que sería el máximo nivel de entropía. Un sistema del que no se podría salir jamás. Esto es conocido como “la muerte térmica del universo”, la gran sopa templada final, o las cenizas de las estrellas y las galaxias ya apagadas.

En el universo la entropía crece continuamente, y nunca decrece. Este desenlace de la muerte térmica, que predice el segundo principio de la termodinámica, causó un hondo desasosiego y desesperanza en determinados sistemas filosóficos occidentales. Es muy interesante leer, de nuevo, a Bertrand Russell (1872-1970):

“Todo el trabajo de todas las épocas, toda la devoción, toda la inspiración, todo el resplandor meridiano del genio humano, están destinados a la extinción en la vastedad de la muerte del sistema solar, y el templo de los logros humanos va a ser inevitablemente enterrado bajo los escombros del universo en ruinas. Todas esas cosas, si acaso no están totalmente probadas, son tan ciertas que ninguna filosofía que las rechace puede ser tomada en serio. Sólo en el andamio de esas verdades, sólo sobre el firme soporte del desespero sin tregua, puede ser construida la habitación del alma” (Russell).

Pero dejemos por el momento a Russell y su desesperación, y centrémonos de nuevo en el enfoque físico del dilema.

Ya hemos comentado que el hecho de que aún veamos mucho orden en el universo debería presuponer que el universo tuvo un comienzo, porque si hubiera existido desde siempre, ahora veríamos un desorden infinito (puesto que el desorden siempre crece).

Y en este punto nos surge una nueva pregunta. Si el desorden crece continuamente, entonces en el inicio ¡había un orden impresionante! De alguna manera, en los momentos más tempranos de la historia del universo había un orden inherente perfecto.

“Uno de los mayores enigmas de la cosmología es de dónde procede la organización que vemos en el universo, y en qué forma el Big Bang era tan organizado” (Ciclos del Tiempo. Prólogo. Roger Penrose)

“Es misterioso el hecho de que el universo fuera creado con este elevado grado de orden”
“cualquier teoría cosmológica viable debería explicar en última instancia esta contradicción de la entropía”. (Alan Lightman).

¿Pero qué es exactamente la entropía?

Pongamos un ejemplo...

Cuando vemos un video que marcha hacia atrás, en seguida nos damos cuenta de que suceden cosas mágicas. La niña sube por el tobogán marcha atrás, los cristales rotos en la alfombra se organizan mágicamente y dan un salto para colocarse encima de la mesa, la espuma de afeitar se introduce mágicamente dentro del bote.¹³

En cada uno de estos procesos que vemos en “*modo rewind*” se están cumpliendo absolutamente TODAS las leyes de la física; la conservación de la energía, la conservación de la cantidad de movimiento, la fuerza de atracción gravitatoria, la ley de inercia, todas las leyes de la química. Absolutamente todo. Lo único que no se cumple cuando vemos el video marcha atrás es la segunda ley de la termodinámica.

En efecto, nos damos cuenta de que el video va marcha atrás porque se producen violaciones flagrantes de la segunda ley de la termodinámica. Vemos, por tanto, que esta segunda ley está íntimamente relacionada con la dirección del tiempo.

La dirección hacia la que transcurre el tiempo no es otra cosa que la segunda ley de la termodinámica en acción.

¹³ Recomiendo ver este magnífico video <https://www.youtube.com/watch?v=r3q2XXeasAA>

Pero ¿por qué? ¿por qué no es posible que un proceso vaya al revés? Al fin y al cabo, la energía calorífica del agua templada es la misma que la suma del agua fría y el agua caliente por separado ¿por qué no es posible una transformación física que respete perfectamente la primera ley, que mantenga las mismas cantidades de materia y energía y que vuelva a separar el agua fría y el agua caliente? Vamos a intentar responderlo a continuación.

1.2.2. La dinámica newtoniana

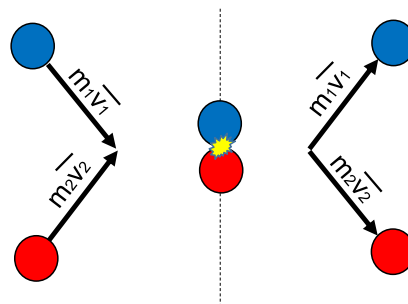
Imaginemos una mesa de billar con bolas chocándose unas a otras. Algo similar al concepto que Newton tenía del universo, el concepto de los atomistas. En la mesa de billar las pelotas chocan unas contra otras, respetando en todo momento la primera ley, la conservación de la masa y la energía, y otras leyes físicas.

Fórmulas de un choque:

Antes del choque: $m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + \dots$

=

Después del choque: $m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + \dots$



Un sistema así concebido podría ser totalmente reversible. De hecho, si vemos un video de las bolas de billar chocando, al principio no sabríamos decir si el video está transcurriendo hacia adelante o hacia atrás. Tendríamos que dejarlo un rato largo, hasta darnos cuenta de que las bolas se van organizando misteriosamente y acaban formando un triángulo perfecto en el centro de la mesa de billar. ¡Ahí nos daríamos cuenta de que el video en realidad iba hacia atrás!

De acuerdo con las leyes de la cantidad de movimiento de Newton, cada choque particular de las bolas es totalmente reversible. Si vemos un choque en particular y lo ponemos marcha adelante y marcha atrás es perfectamente válido en ambos sentidos. Si a nivel particular el

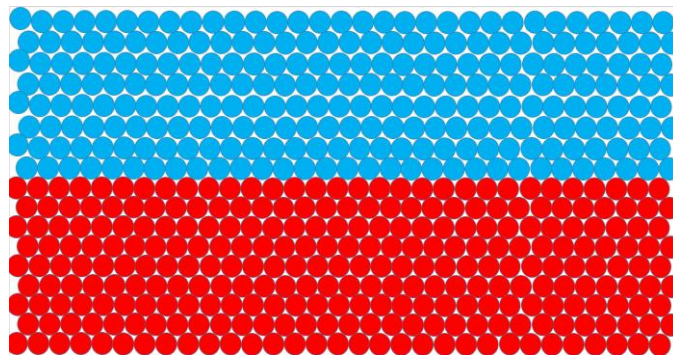
choque de dos bolas de billar es perfectamente reversible ¿por qué no lo es a nivel global cuando analizamos todo el conjunto de las bolas de la mesa? ¿por qué el final del video rebobinado de la mesa de billar “*canta*” y nos damos cuenta de que va marcha atrás? Vamos a intentar responder a esta difícil pregunta a lo largo de los siguientes apartados.

1.2.3. Qué es exactamente la entropía

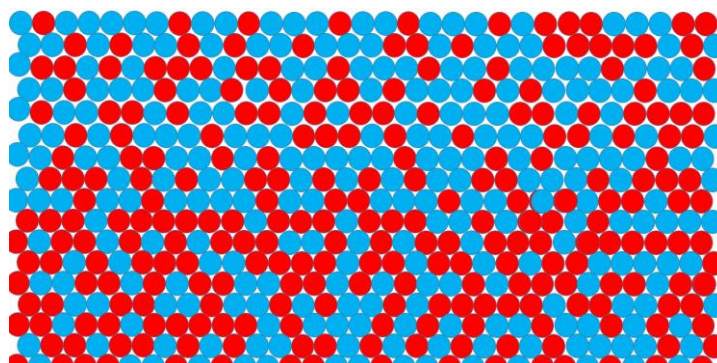
Cualquiera de nosotros nos damos cuenta enseguida de que el concepto “desorden” es realmente ambiguo. ¿Cómo es posible que la ciencia maneje una magnitud tan poco seria que se llame “desorden”? ¿cómo se mide el desorden? ¿y a qué nos estamos refiriendo exactamente?

El concepto de desorden está íntimamente relacionado con el concepto “aleatorio”. Veremos ahora de qué manera.

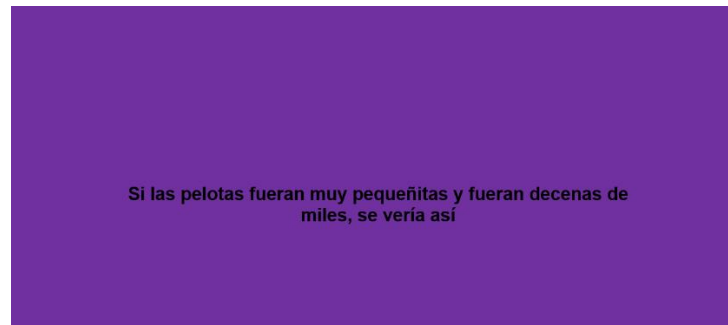
Imaginemos que tenemos un gran recipiente de cristal con canicas muy pequeñas. Unas rojas y otras azules. Las rojas están abajo, y las azules arriba. Todas perfectamente ordenadas:



Agitamos el recipiente durante unas horas ¿qué sucede?



Si las pelotitas fueran muchas más, y mucho más pequeñas, el resultado habría sido que el recipiente se habría quedado con un color morado tan uniforme que es indetectable ver ninguna parte más azul, o más roja.



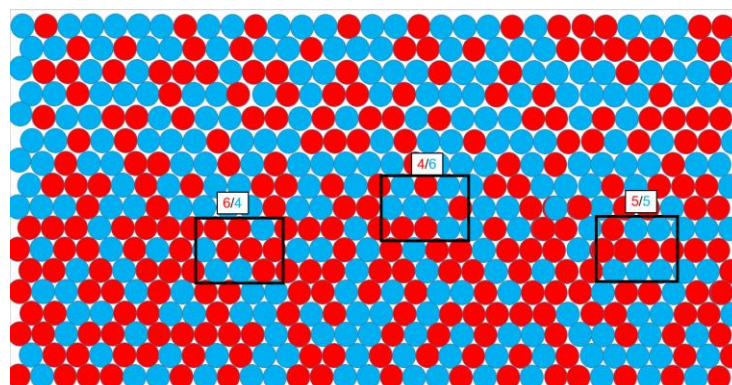
Si lo agitamos de nuevo ¿es posible que todas las rojas queden de nuevo abajo y las azules queden de nuevo arriba? En principio ¡si es posible! Pero ¿es probable? ¡No! ¡Es muy improbable!

Pero ¡ojo!, insisto, es perfectamente posible que ocurra que, tras agitar el recipiente, queden todas las azules arriba y las rojas abajo, porque es un proceso perfectamente compatible con las leyes de la física.

Pero la flecha del tiempo, es decir, el aumento constante del desorden (de la entropía), nos va llevado a una configuración del sistema mucho más aleatorio, mucho más desordenado. De manera que, cuantas más veces agitamos el recipiente, más se desordenan las bolitas.

Fue Boltzmann quien ideó una manera matemática de calcular la entropía de un sistema. Y para entenderlo, nuestro ejemplo de las canicas es perfecto. Veamos:

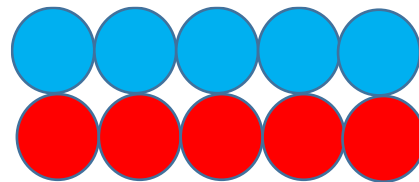
Volviendo a nuestro recipiente de canicas rojas y azules, una vez agitadas, imaginemos que seleccionamos una pequeña parte de 10 canicas.



Vemos que en un caso tenemos 4 rojas y 6 azules. En otro caso tenemos 6 azules y 4 rojas. Y en otro caso tenemos 5 y 5. Será muy difícil encontrar un rectángulo que escoja 10 pelotitas que tengan una proporción destacada de uno de los dos colores (que tenga por ejemplo dos azules y 8 rojas).

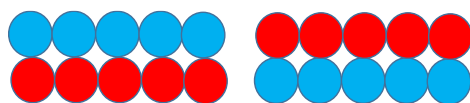
Si hacemos las pelotitas mucho más pequeñas y mucho más numerosas, podemos hacer que cada uno de los tres rectángulos, en lugar de contener 10, contendría 1,000 pelotitas, y serían por tanto perfectamente morados, y la proporción de pelotas rojas y moradas en cada uno de esos tres rectángulos sería un 50%-50% prácticamente perfecto.

Vamos a tratar de simplificar ahora el problema para poderlo modelizar matemáticamente. Consideramos ahora un recipiente donde caben solo 5 pelotas rojas y cinco azules



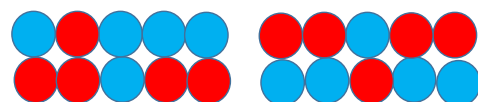
Si lo agitamos un rato, tendremos las siguientes opciones:

- Las cinco del mismo color arriba y las otras cinco del otro color abajo. $2/232 = 0,8\%$
- Solo una canica falla arriba y abajo: $50/232 = 21,5\%$
- En una fila tenemos 2/3 y en la otra 3/2: $180/232 = 77,6\%$



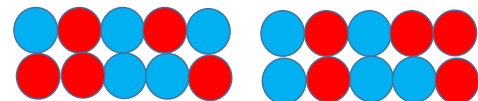
$$2/232 = 0,8\%$$

Segregación total



$$50/232 = 21,5\%$$

Solo una falla



$$180/232 = 77,6\%$$

Máxima mezcla

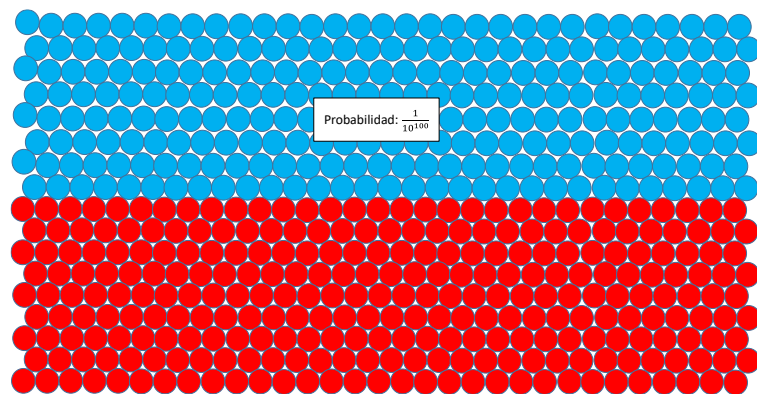
Vemos por tanto que, con solo 10 pelotas, si las agitamos un rato y paramos a ver cómo han quedado, las probabilidades de volver a una disposición ordenada son solo de un 0,8%.

Empezamos a comprender que lo que el ser humano entiende como “ordenado” está muy relacionado con “improbable”. Ahora es más fácil entender que la naturaleza tiende hacia el desorden en cada proceso o transformación que se da, puesto que es, sin duda, lo más probable.

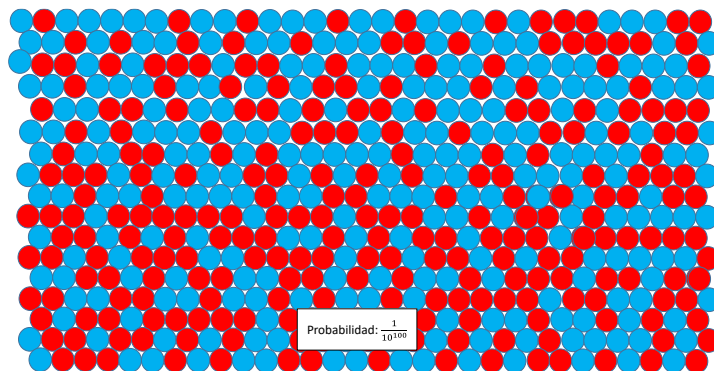
Pero ¿estamos seguros de que “orden” equivale a “improbable”?

Si volvemos al ejemplo de las 265 pelotas rojas y las 265 pelotas azules, nos encontramos con que tenemos ¡más de 10^{100} opciones distintas de combinarlas!

Por tanto, la probabilidad de esta disposición concreta que muestro debajo es de : $\frac{1}{10^{100}}$

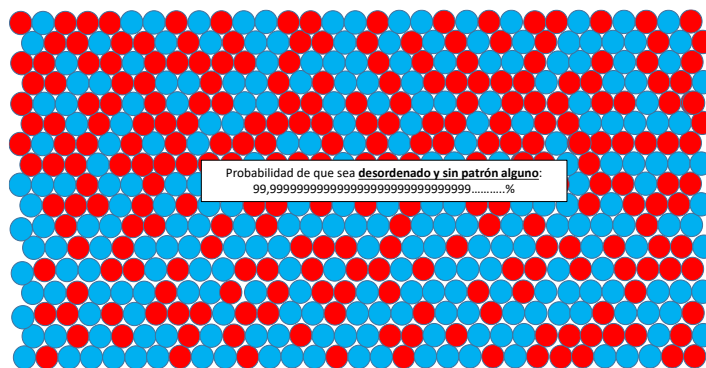


¿Y la probabilidad de que resulte **exactamente** esta otra combinación? Me refiero a esta específica y concreta que represento debajo (azul, roja, azul, azul, azul, etc). Su probabilidad es también de $\frac{1}{10^{100}}$



Pero esta segunda es desordenada ¿entonces es igual de probable el orden que el desorden?

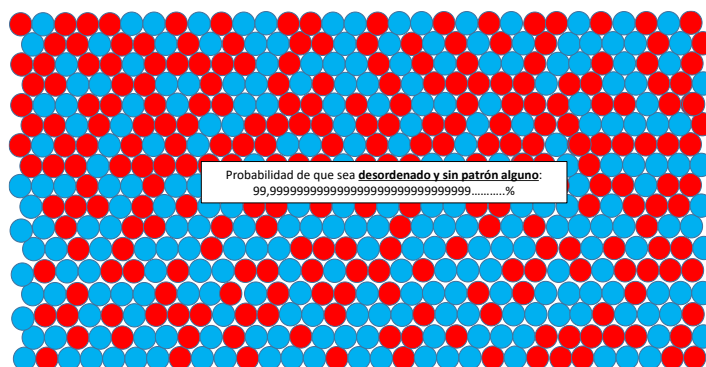
En absoluto. La realidad es que la inmensa mayoría de las combinaciones posibles para nosotros son, en cierto sentido, “*indistinguibles*” porque no reconocemos en ellas patrones ordenados. Por tanto, las metemos todas ellas en el montón de “*combinaciones desordenadas*”. De manera que, tras agitar la consola de pelotas azules y rojas, la probabilidad de que el resultado salga desordenado, sin ningún tipo de patrón reconocible por nosotros, los seres humanos, es del 99,9999999999999999.....%



Ahora entendemos mejor por qué los procesos naturales tienden al desorden.

Bien, entonces quizás podamos modificar la redacción de la Segunda Ley quitando la palabra “orden”, que sin duda es extremadamente ambigua, diciendo “cualquier proceso que se produzca en el universo va a tender hacia la configuración más probable”.

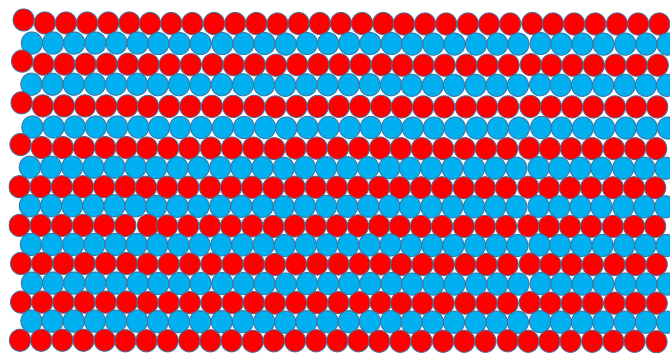
En realidad, esa redacción quedaría muy muy pobre, e incluso quedaría sin sentido. Porque, como hemos visto, la disposición desordenada que muestro aquí, me refiero a esta exacta y precisamente esta, en este preciso orden:



Esta disposición concreta, digo, es exactamente igual de probable que la disposición ordenada que segrega pelotas rojas arriba y pelotas azules abajo. En ambos casos la probabilidad es de $\frac{1}{10^{100}}$. Por tanto, la nueva redacción que proponemos para la Segunda Ley de la Termodinámica no es correcta, puesto que cuando agitemos la consola nos encontraremos con una disposición, siempre concretísima y extremadamente improbable, que es exactamente igual de improbable que cualquier otra.

Me diréis ¡vaya galimatías! Bueno, dadme solo tres minutos más para intentar rematar la explicación.

Podemos entender mejor este misterio si dejamos a un niño de tres o cuatro años jugando con esa consola de pelotas rojas y azules. Si le dejamos en su cuarto con ellas durante un rato, él se entretendrá formando quizás algo así:



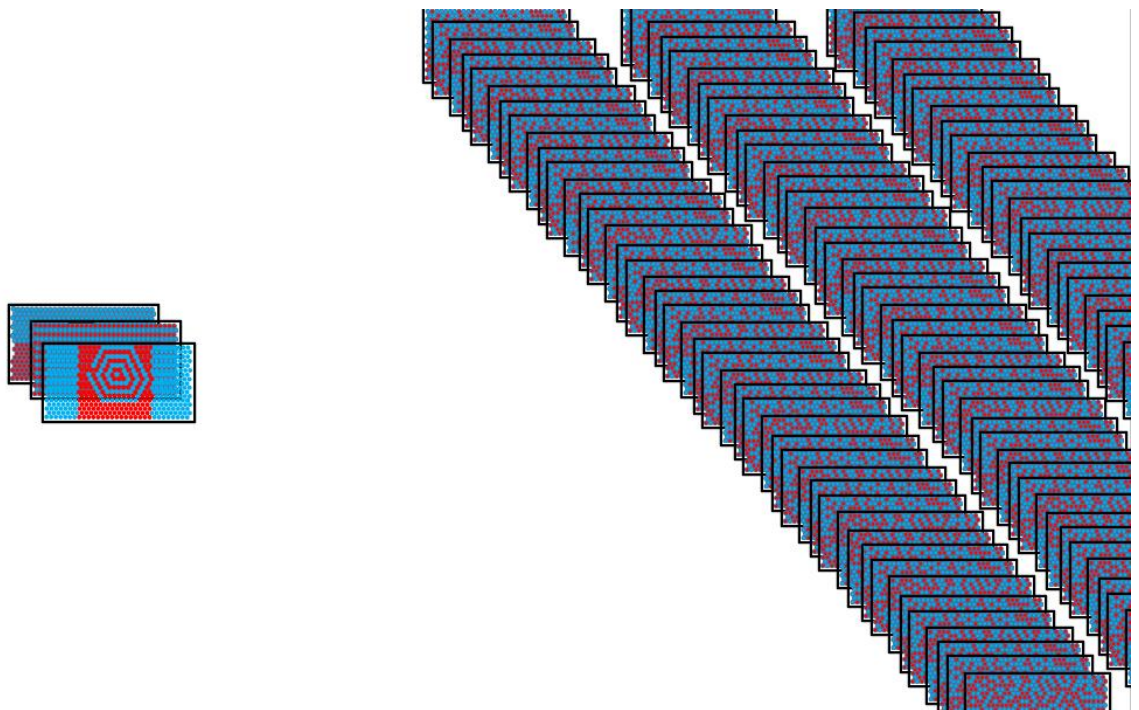
Si el niño deja así la consola y se va, y luego entra su madre, es evidente que la mamá se dará cuenta de que alguien ha “ordenado” las pelotas, y deducirá que ha sido el niño e irá a darle la enhorabuena. Para la madre es evidente que ha habido una inteligencia trabajando. Ella sabe que esa disposición no se ha producido por azar, sabe que no ha sido un proceso espontáneo, es decir, ella sabe que las pelotitas no han quedado así porque se haya caído la consola y la han vuelto a colocar de pie. Se ha gastado una energía para ordenarlo. Y es que, parece que la mente de los seres humanos funciona con “patrones” geométricos y matemáticos. Tenemos una increíble capacidad para definir y detectar patrones. El niño ha creado un patrón, y la madre lo ha detectado. El conjunto de estos “patrones” es lo que llamamos “orden”.

La redacción de la segunda ley no tenemos más remedio que aceptarla con la incorporación de palabras ambiguas como “entropía” o desorden.

La misteriosa segunda ley de la termodinámica parece por tanto relacionada, no solo con la dirección del tiempo, como vimos, sino también, de algún modo, ¿con la mente humana?

“Debemos mencionar que, en realidad, nadie ha podido nunca deducir la segunda ley de la termodinámica rigurosamente sin usar argumentos “antrópicos” o hipótesis extra científicas” (Barrow and Tipler)

La naturaleza es, como decía Heráclito, continuo cambio. Cada cambio tiene casi infinitos resultados posibles, y de todas esas opciones posibles, solo algunos pocos resultados posibles los percibe la mente humana como “ordenados”.



En el anterior gráfico representamos a la derecha la inmensa cantidad de resultados posibles “desordenados”. Y a la izquierda representamos los poquitos resultados que podemos considerar con algún patrón ordenado reconocible. La segunda Ley nos dice que es muchííiisimo más probable que el resultado de agitar la consola sea desordenado (sería uno de los resultados de los de la derecha). Pero dado que solo un ser humano es capaz de reconocer cuáles de esos resultados son ordenados o desordenados parece que, de alguna manera, ¡la Segunda Ley está relacionada con la mente humana!

Es en realidad la misma inquietud que ya tenían los griegos cuando consideraban que tanto la naturaleza como la mente humana participaban del mismo “logos”.

Reflexionemos en lo raro que nos parece a nosotros, habitantes del siglo XXI, que alguien diga que una ley universal (segunda ley de la termodinámica), que se cumple en todas las regiones del universo, y se ha cumplido a lo largo de toda la historia cosmológica, está íntimamente relacionada con la mente humana.

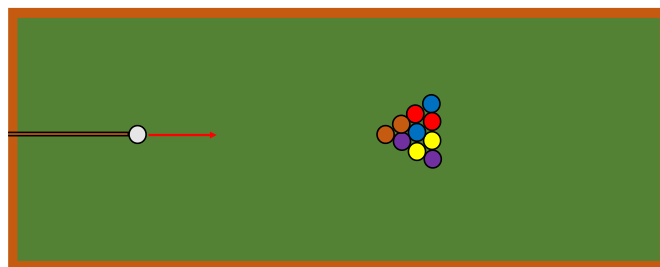
Los científicos han podido observar que la Segunda Ley se cumple, no solo en galaxias a miles de millones de años luz de aquí, sino que se cumplía hace muchos miles de millones de años. Es decir, se ha cumplido siempre y en todo lugar.

Pero tenemos todavía que explicar cómo es posible que exista algo tan extraordinario como **la vida en la tierra**, sin duda algo que la mente humana percibe como una disposición extremadamente ordenada. Si “*lo vivo*” es extremadamente ordenado, entonces según la segunda Ley, es también extremadamente improbable que patrones tan ordenados como las plantas, los animales o los seres humanos se formaran, de manera espontánea y sin la intervención de ninguna inteligencia, del caos aleatorio de un planeta incandescente. Pero sin duda ocurrió, porque es evidente que aquí estamos ¿Cómo fue posible? ¿no es un incumplimiento flagrante de la Segunda Ley?

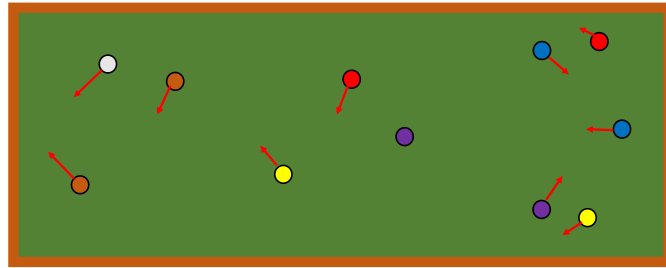
¡Sigamos!

1.2.4. Una disposición muy especial

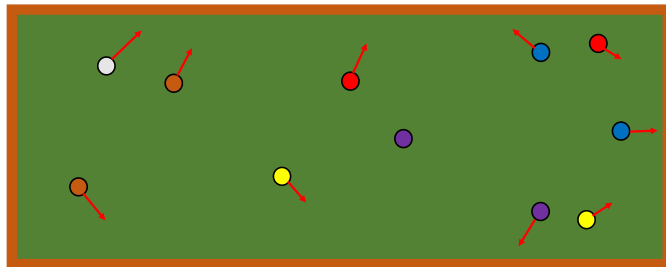
Imaginemos que en una mesa de billar tapamos los agujeros, y un jugador de billar lanza la bola blanca contra el triángulo de bolas de colores,



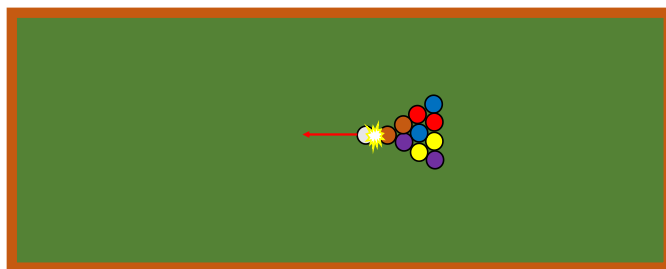
y dejamos que las bolas reboten unas contra otras. En un momento determinado, pasados 10 segundos (que llamamos **el instante 1**), medimos de manera perfecta las velocidades y direcciones de cada bola, así como las posiciones exactas que tienen en ese preciso instante.



A continuación, colocamos las bolas en esos mismos lugares y les imprimimos exactamente la misma velocidad, pero en sentido contrario...



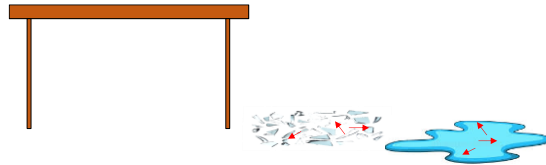
¿Qué sucedería? Nuestros conocimientos elementales de física nos dicen que las bolas chocarían unas con otras hasta que se formara un triángulo perfecto, y saldría rebotada luego la bola blanca disparada en dirección del punto de lanzamiento.



Llegamos entonces a una conclusión que me parece muy importante. La configuración de velocidades de las bolas que se da en el instante 1, cuando paramos todas las bolitas parecía totalmente caótico y sin ningún orden particular, pero, en realidad, tenía un increíble orden subyacente, porque cuando invertimos sus velocidades pasa algo realmente extraordinario.

Cuando una jarra de agua cae de la mesa, ésta se rompe en mil pedazos de cristal y el agua se desparrama.

El resultado, a priori, puede parecer un caos de agua desparramada y cristales desordenados en la alfombra, **pero claramente existe un orden subyacente** en ese conjunto de cristallitos mojados.



Y bastaría con imprimir por un instante, a cada micropartícula, la dirección y velocidad contraria que tiene en ese instante y, milagrosamente, la jarra se volvería a recomponer, las gotitas entrarían en la jarra, y todo el conjunto ascendería de un salto milagroso hasta colocarse encima de la mesa.



Por este motivo la policía acordona la zona del crimen, existe un “orden subyacente” en el aparente caos de la habitación del crimen, es cuestión de analizar la disposición de cada una de las cosas de la habitación, de cada detalle, para detectar lo que en realidad ocurrió.

De la misma manera podríamos analizar el estado de cada partícula del universo actual. Si le diéramos la misma velocidad, pero en el sentido contrario, a todas las partículas elementales del universo, se iniciaría un proceso muy curioso, ya que viviríamos en un mundo en el que todas las leyes serían **idénticas al mundo en el que vivimos** (ley de la gravedad, fuerzas magnéticas, conservación de la masa, conservación de la energía, conservación de la cantidad de movimiento, etc), pero la Segunda Ley de la termodinámica actuaría justo al contrario, tendería siempre hacia el orden (los vasos rotos saltarían hacia la mesa y se recompondrían, etc). Y el mundo comenzaría a “rebobinarse” hacia atrás.

Todo esto es perfectamente posible y no viola ni la ley de la conservación de la energía ni la ley de la conservación de la masa, ni ninguna ley física conocida. Sería un mundo en el que la segunda ley de la termodinámica está invertida. Insisto, no estaríamos cambiando ninguna ley en ese experimento, solo cambiaríamos el sentido de las velocidades de las partículas.

El hecho de que, en nuestro mundo, todo tienda hacia el desorden, no es algo que se deduzca de las demás leyes, sino algo que es así en este universo, pero podría haber sido al contrario. La segunda ley es algo que se sugiere de nuestra experiencia diaria. En palabras del reconocido físico teórico Roger Penrose, la única razón por la que creemos en la Segunda Ley de la Termodinámica (todo tiende al desorden) es porque nos lo muestra “la experiencia común”. No es una ley deducida de otras, sino una ley deducida de la experiencia, “*es sencillamente un hecho del universo observado*”.

En realidad, si suponemos como hasta ahora, un mundo “mecanicista” formado por canicas microscópicas, que obedecen a las leyes de la física, entonces la configuración precisa de todo el universo se podría deducir hasta el mínimo detalle en cada momento de la historia cosmológica. Bastaría con calcularla a partir de la configuración inicial del Big Bang y el paso del tiempo transcurrido desde entonces. Si, por ejemplo, viajáramos a hace 5.000 millones de años y conociéramos La Tierra en estado incandescente en formación,



¡estaríamos viendo unas condiciones muy muy particulares que convendría no tocar en absoluto! En realidad, solo veríamos volcanes en plena ebullición y meteoritos cayendo, tremendas nieblas de vapor y ácido, etc, pero ¡no toques nada de ese escenario! ¡ni una piedra! ¡ni una mota de arena! Porque el sistema global de esas partículas, con la velocidad que lleva cada una de ellas, su peso, y su posición exacta, tienen un orden subyacente extraordinario, ¡acabarán creando vida y seres humanos miles de millones de años después!



Esto es así siempre que nos creamos que el mundo es puramente “mecánico”¹⁴... En el siguiente capítulo desecharás esta idea.

Y también es interesante analizarlo en el sentido contrario. Un superordenador que fuera capaz de analizar cada una de las partículas del universo en su estado actual, sus velocidades y su posición, podría ejecutar un modelo matemático que calculara en dirección contraria todos esos movimientos, y podría deducir matemáticamente la existencia pasada de dinosaurios, trilobites, etc.¹⁵

Sea como sea, lo que se deduce de todo esto de manera incuestionable es que el estado inicial del universo (Big Bang) tendría, por alguna razón, una entropía extraordinariamente minúscula ¡un orden extraordinario! En otros temas de este capítulo explicaremos los cálculos realizados entre Hawking y Penrose, y veremos que el orden subyacente que existía en el Big Bang al iniciarse todo es tan increíble, que la probabilidad de que se hubiera formado por azar es de...

Una parte entre $10^{10^{123}}$

Como el propio Penrose dice, no somos capaces de imaginarnos una cifra así escrita ¡Sería un 1 seguido de 10^{123} ceros!

¹⁴ Algo que, cuando estudiemos la mecánica cuántica, dejaremos de creer.

¹⁵ Sobre este punto existen sin embargo muchos matices. Muchos científicos consideran que la ciencia funciona gracias al segundo principio de la termodinámica. Es decir, somos capaces de predecir el comportamiento de las cosas porque pasan de orden a desorden. Pero un mundo en donde el segundo principio funcionara al revés sería imposible de predecir. Robert Ulanowicz utilizó este argumento en 1986 para tumbar al demonio de Laplace, es decir, para argumentar que Laplace no tenía razón al pensar que un demonio inteligente que conociera la posición de cada partícula podría deducir el estado inicial del universo.

Aunque pusiéramos un 0 en cada protón o neutrón del universo, no tendríamos suficientes ceros para escribir la cifra...

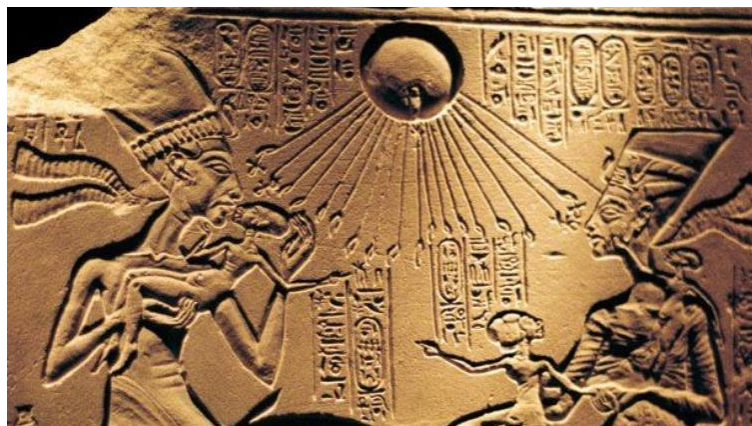
Volveremos más adelante sobre esto.

1.2.5. La vida es extraordinariamente ordenada ¿No es una violación de la segunda ley?

Pero si todo tiende al desorden ¿cómo es posible que apareciera la vida a partir de volcanes y un planeta incandescente? Sin duda un animal es algo muy ordenado ¿no hay aquí una violación flagrante de la Segunda Ley? ¿y cómo es posible que la vida se haya ido haciendo cada vez más compleja, pasando de la materia inerte a las primeras bacterias, y de ellas a la formación de tigres, ballenas y finalmente seres humanos? ¿no es evidente que el planeta en formación hace 5.000 millones de años era mucho más desordenado que el planeta Tierra hoy, donde hay millones de especies increíbles, que además conviven de manera interrelacionada?

La inmensa mayor parte de los científicos reconocen que el cerebro humano es el elemento más complejo y ordenado que se conoce en el universo ¿no es su existencia una clara violación de la Segunda Ley?

La respuesta a este enigma os va a sorprender, la vemos a diario en el cielo. El responsable es el dios que el faraón egipcio Akenatón consideró como el único Dios. **El sol**. La estructura “biológica” y “orgánica” de cualquier forma de vida se degradaría rápidamente si no hubiera una poderosa fuente de orden, de baja entropía, cerca de nosotros. De esta fuente de baja entropía depende toda la vida en La Tierra.



¿Por qué el sol es una fuente de energía de baja entropía?

Para responder a esto tenemos que remontarnos a los inicios del Big Bang. Algunos millones de años después del Big Bang, tenemos un espacio con miles de millones de estrellas uniformemente distribuidas. Pasado el tiempo ¿qué ocurre? Tendieron a juntarse unas con otras por acción de la gravedad, formando grumos al principio, formando estrellas más grandes, formando galaxias, e incluso, a veces, formando agujeros negros.

El agujero negro es un inmenso aumento de entropía, un proceso absolutamente irreversible, donde lo que entra en él jamás escapa. Los que hayan leído la Historia Interminable, seguramente saben a qué nos referimos. La “Nada” avanza.

¿Y en el inicio que había?

Las ondas de radio que descubrieron Penzias y Wilson (fondo cósmico de microondas) comúnmente conocido como “el ruido del big bang” han resultado ser bastante sorprendentes. Resulta que las ondas son exactamente iguales, miremos donde miremos, no importa a qué lugar del universo apuntemos. Esto nos indica, según Penrose, que en el origen la energía y la materia estaba perfectamente ordenada. Esta primitiva uniformidad espacial representa una entropía inicial extraordinariamente baja del universo primitivo.

“¿Cómo un suceso tan increíblemente violento y tórrido puede representar un estado de entropía extraordinariamente minúscula?”, (Roger Penrose. Ciclos del tiempo).

La clave de nuestra existencia se debe a que, en nuestro cielo, existe aún un punto brillante, una intensísima fuente de calor, a altísima temperatura, rodeada de espacio vacío, el sol. Las estrellas son aún recipientes de energía de baja entropía, que proviene del orden inicial del Big Bang. El sol emite energía de baja entropía, en parte porque es un punto brillante solitario en el cielo, y en parte porque emite con alta energía focalizada. Vamos a explicar por qué, esta energía focalizada, pudo ayudar a la aparición del orden biológico actual de nuestro planeta.

Ahora que ya tenemos un alto nivel de conocimiento de la ciencia física y astronómica, podemos precisar algunos conceptos que dimos en el primer curso de Astronomía para ingenieros inquietos. En este primero curso habíamos resaltado que todo lo que tiene movimiento en la tierra (el viento, las nubes, los ríos, el mar, los tigres, los elefantes, las cebras, los seres humanos, las plantas, ...) todo ello obtiene su energía, en última instancia, del sol.

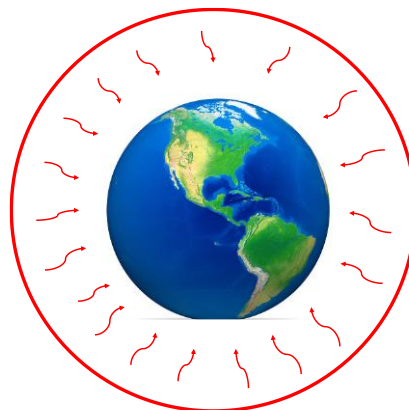
Pero téngase en cuenta que el planeta Tierra está, en realidad, en total equilibrio energético, como vimos también en el primer curso.

Toda la energía calorífica que nos llega del sol en forma de rayos de luz cada 24 h es devuelta al espacio, en la misma cantidad, en forma de rayos infrarrojos en el mismo periodo. Por este motivo la temperatura media global se mantiene estable y constante en 15 grados a lo largo de los siglos. La misma cantidad de energía que recibe La Tierra durante un año, la expulsa en ese mismo año. Entonces lo que necesitamos no es energía ¿no?, puesto que la misma que recibimos la devolvemos.

¿Qué necesitamos concretamente?

Veamos, en el primer curso dijimos que toda la vida en La Tierra dependía de las plantas, y que las plantas dependían de la energía solar para realizar la fotosíntesis y así poder convertir el CO₂, el agua y los minerales del suelo en hojas, tallos, troncos, raíces, etc, en definitiva, comida para cebras, vacas, etc . ¿Es esto exacto? En realidad, las plantas no necesitan energía simplemente, lo que necesitan es energía con baja entropía. Es la energía con baja entropía del sol la que permite que todo el planeta sea un paraíso, con aire, olas, ríos, lluvia, plantas, peces, cebras, tigres y seres humanos. La Tierra recibe esa energía “milagrosa”, de baja entropía, del sol, y lo que devuelve es una energía degradada, en forma de rayos infrarrojos emitidos al espacio. Intentaremos explicar esto de manera más clara.

Imaginemos que el cielo fuera una especie de bóveda caliente que nos proporcionara la misma energía que nos proporciona el sol, pero de manera homogénea, es decir, que todos los puntos de toda la superficie de esa inmensa “bóveda celeste” nos transmitieran la misma energía en forma de calor (rayos infrarrojos). Si esto fuera así, es evidente que no habría ni noche, ni día. Estaríamos también, como ahora, a una temperatura media de 15 grados, con la salvedad de que, en este caso, toda la superficie de La Tierra estaría a una temperatura de 15 grados, todo el rato. Sin días ni noches, sin invierno ni verano. Todos y cada uno de los sitios de la tierra a 15 grados, en todas las latitudes igual.



El mar sería un caldo templado enteramente a 15 grados, tanto en el fondo del mar como en la superficie. La tierra estaría a 15 grados, tanto en los polos como en el ecuador. Al no existir diferencias de temperatura, no existirían corrientes de agua, ni viento, ni borrascas, ni anticiclones. No habría evaporación, ni lluvia. El aire estaría con la concentración de vapor suficiente para que, ni lloviera, ni se evaporara el agua. No habría lluvia, ni ríos. Habría un silencio sepulcral. No habría viento, no habría corrientes, no habría huracanes, no habría borrascas, no habría inundaciones. Todo sería como cuando vemos un estanque templado y quietísimo, sin olas, con los sedimentos totalmente quietos.

En este escenario habría una enorme entropía, un gran desorden ¿desorden? ¡Pero si tiene pinta de un mundo mucho más tranquilo! No nos dejemos engañar, sería una desolación. Es la diferencia entre un cuerpo vivo y un cuerpo muerto.

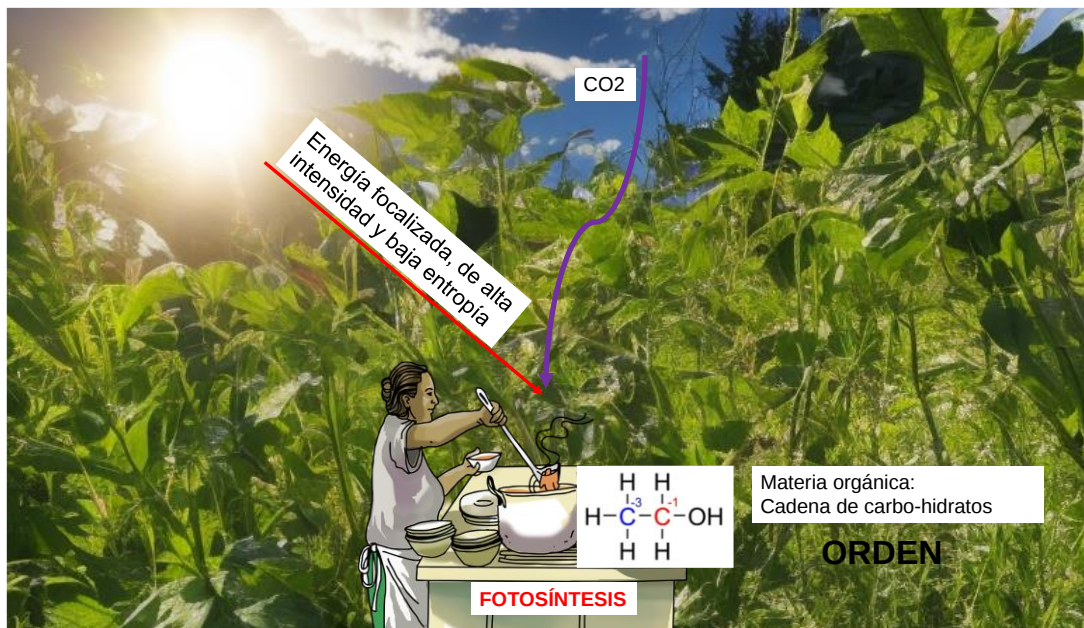
¡Un mundo con huracanes, borrascas y ríos desbordados es un mundo mucho más ordenado que este otro mundo desolado que hemos pintado! Un mundo homogéneo a 15 grados, templado y uniforme, sería totalmente desordenado, donde **todo lo que era distinto ha quedado mezclado para siempre**, todo revuelto en un inmenso caldo templado y quieto. No habría glaciares en los polos, ni aire caliente en el ecuador, ni aire seco en los desiertos, ni aire húmedo en las selvas tropicales. Tendríamos todo mezclado, todo templado, todo uniforme, todo homogéneo. Un desastre.

¿Pero habría vida? Que es lo mismo que preguntar ¿Habría plantas? Las plantas necesitan energía de baja entropía focalizada, de alta frecuencia (luz visible), para poder realizar la fotosíntesis.

Hacen su fotosíntesis por el día, recibiendo fotones de alta frecuencia y energía (luz solar), obteniendo energía de baja entropía (energía ordenada) que les permite “ordenar” el carbono que captan del CO₂ de la atmósfera, y los minerales y el agua que captan por sus raíces, y con todo ello “cocinan”, es decir, ordenan y generan materia orgánica.

Son las únicas cocineras conocidas del universo. Son un milagro. Y por la noche se comportan de forma totalmente diferente, desprendiendo oxígeno.

Es decir, las plantas necesitan un punto brillante en el cielo para cocinar. Y las demás formas de vida necesitan a las plantas.



Un planeta que tuviera toda su superficie y toda su atmósfera a 15 grados tendría muchísima **energía acumulada**. Pero no sería utilizable. Los seres inteligentes que quisieran vivir en ese planeta tendrían totalmente imposible aprovechar esa energía.

Para poder aprovechar la energía, necesitamos que ésta sea de baja entropía. Necesitamos "diferencias". Necesitamos que el planeta absorba energía por el día, y la desprenda al espacio por la noche. Necesitamos un orden, que el sol evapore el agua en determinados lugares, que llueva en las montañas, que fluyan los ríos, que haya diferencias de temperaturas para que exista el viento...



El mundo actual necesita esa energía, para cualquier proceso industrial, para el transporte, para nuestras casas, etc. El petróleo o el gas por el que se pelean las naciones es energía de baja entropía, porque es energía solar de baja entropía acumulada durante millones de años en plantas antiguas. Buscamos, por tanto, fuentes de baja entropía. La energía acumulada en la superficie del mar, que está a 15 grados, es absolutamente descomunal, pero de poco nos sirve. Esa energía está ya degradada porque está a la temperatura ambiente.

Cuando estamos en el campo y nos entra hambre, y buscamos higos o moras, estamos buscando energía de baja entropía, para poder vivir.

La baja entropía es lo mágico del universo. El sol heredó esa baja entropía del Big Bang, y parte de esa magia que aún conserva se la envía a las plantas, y las plantas transmiten parte de esa magia (transmiten parte de ese orden), a los herbívoros y estos a los carnívoros y a los seres humanos.

El himno a Atón, el disco solar, compuesto por Akenatón y Nefertiti hacia el 1.350 a.d.C. ya parece intuir todo este misterio. El sol es la causa de todo lo que está vivo, y todo lo que tiene movimiento en La Tierra (viento, ríos, barcos, animales, etc). Pero, sobre todo, el himno hace especial mención de la importancia de que el sol sea un punto brillante en el cielo, solitario. Un punto energético de baja entropía;

*La Tierra se ilumina cuando te elevas por el horizonte,
Cuando brillas, como Atón, durante el día.
Cuando lanzas tus rayos,
El país entero se pone a trabajar,
Todos los animales pacen en sus pastos,
Los árboles y las plantas brotan,
Los pájaros vuelan más allá de sus nidos, (...)
Todas las manadas brincan sobre sus patas,
Lo que vuela y todo lo que se posa,
Vive cuando te alzas por ellos.
Los barcos se ponen en camino tanto hacia el norte como hacia el sur, (...)
Los peces del río saltan hacia tu rostro, (...)
Tú, que haces que la semilla crezca en las mujeres,
Que creas la semilla de las gentes, (...)
Creaste la Tierra según tu deseo, tú, solitario,*

*A todos los hombres, el ganado y los rebaños;
Cuanto existe en la tierra que anda sobre sus patas,
Todo lo que hay en el cielo que vuela con sus alas,
Hiciste las estaciones para nutrir todo cuanto has creado,
El invierno para enfriar, el calor para que te saboreen.(13)
Creaste el cielo lejano para brillar en él,
Para observar todo aquello que hiciste.*

***Tú, solo, brillando, en tu manifestación de Atón viviente,
Elevado, radiante, distante, cercano,
Creaste millones de manifestaciones de ti mismo,
Ciudades, pueblos, campos, el discurrir del río, (...)
Cada pierna se mueve porque creaste la Tierra.***

(Himno a Atón. Siglo XIV a.d.C. Egipto)

Suerte que tenemos un pequeño disco brillante en el cielo que no ha sido engullido aún por los agujeros negros, monstruos de máxima entropía. El sol, y todas las estrellas que vemos, son restos de la baja entropía inicial del Big Bang.

Pero los agujeros negros siguen engullendo materia y nada de lo que engullen escapa jamás. “La nada” crece, el desorden crece, la entropía crece, siempre crece.

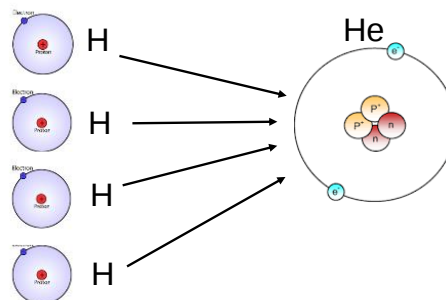
Pero nos ha quedado pendiente responder la pregunta principal:

¿Cómo es posible que exista la vida en La Tierra? ¿Cómo es posible que la vida se haya ido haciendo cada vez más compleja?

La fuente de energía de baja entropía que es el sol trabaja igual que nosotros cuando ordenamos el cuarto. Logramos dejar el cuarto mejor, pero por mucho empeño que haya yo puesto trabajando, el orden que he logrado en el cuarto es menor que el desorden que he causado en el universo al quemar dentro de mi estómago la estructura extremadamente ordenada que había en la ensalada de lechuga y tomate que me comí por la mañana, algo que me ha dado energía para poder ordenar el cuarto, energía que he transformado para subir los juguetes a la estantería, pero sobre todo, en calor en el aire de la habitación.



De la misma manera, el sol ha estado trabajando a lo largo de 5.000 millones de años para formar estructuras de baja entropía en la Tierra, y sin duda los resultados de ese trabajo están a la vista. Pero si analizamos **el proceso global**, el resultado ha sido **incremento de entropía**, porque el combustible de hidrógeno que ha quemado para transformarse en helio ya no volverá a poder utilizarse nunca, y el calor que se ha generado en el proceso y se ha perdido en el espacio ya es inutilizable.



En definitiva, el sol, esa fuente de energía de baja entropía (energía ordenada) ha permitido, con el tiempo, que se fueran configurando estructuras increíblemente ordenadas que percibimos en los animales y plantas de la tierra.

Pero, también los otros planetas del sistema solar se benefician de la baja entropía de un punto brillante en el cielo y sin embargo no tienen vida. Parece que la existencia de un punto brillante en el cielo es condición necesaria **pero no suficiente** para la formación de la vida, que sin duda es algo demasiado extraordinario.

¿Qué explicación nos dan los científicos a algo así? Intentaremos responder a esta pregunta en el siguiente tema.

1.3 El Principio Antrópico

Llegamos por fin a uno de los temas más importantes del curso. Analizaremos el misterio de la existencia del ser humano, desde el punto de vista de la ciencia. Las cuestiones que vamos a tratar en este capítulo te pueden parecer que, en algún momento, están rozando casi la teología, pero te puedo asegurar que ahora mismo son un debate fundamental en la comunidad científica. Como hicimos con la entropía, vamos a detenernos especialmente también en este tema porque estoy convencido de que, como a mí, te va a parecer realmente interesante todo lo que vamos a explicar.

A lo largo de todo este tema tomaremos como guía el libro más importante que se ha escrito sobre ello, “The anthropic cosmological principle” de John D. Barrow y Frank Tipler, libro que sin duda recomiendo, si bien sus 700 páginas son difíciles de leer, y solo lo he encontrado disponible en inglés.

En realidad, el principio antrópico es un conjunto de reflexiones y conclusiones científicas que parten de un hecho incuestionable, a saber, que el hombre existe. Esto es un hecho indiscutible, y hay que tratar de explicar cómo es posible que se haya producido.

Es Carter quien primero expuso el llamado “Principio Antrópico” en 1973, con motivo de los 500 años del nacimiento de Nicolás Copérnico. Es simbólico que Carter presentara esta tesis justo en este simposio. Este famoso científico pretendía llamar la atención sobre el exagerado dominio que parecía tener aún el “Principio Copernicano”.

El Principio Copernicano afirma que el hombre habita un lugar **cualquiera** del universo, y no hay nada singular en nuestra posición, ni en nuestro tiempo, ni en nuestro planeta, ni en nuestra estrella. Recordemos que antes de Copérnico, y en realidad hasta bien entrado el siglo XVII, la opinión general era que La Tierra era el centro del universo, algo que habían dado por hecho también todos los filósofos griegos. Llegado el cristianismo se consideró que era lógico que el hombre estuviera en el centro, puesto que todo había sido creado para él. Pero en el siglo XVI Copérnico propuso que el sol era el que estaba en el centro y, muchos años después, cuando triunfó su tesis, la ciencia estableció el Principio Copernicano que afirmaba que el hombre no es privilegiado en ningún sentido, ni su planeta, ni su estrella, ni su galaxia, ni el tiempo en el que vive.

Es evidente la reacción al antropocentrismo anterior.

Contra este Principio Copernicano que dominó la ciencia hasta el último cuarto del siglo XX, Carter considera que nuestro lugar y tiempo **sí debe** ser especial, **o al menos, lo suficientemente especial para hacer posible nuestra propia existencia**. Hay que reconocer que es evidente que tiene razón.

“Lo que podemos esperar observar viene condicionado por el hecho irrefutable de nuestra propia existencia” (Carter)

Define así el Principio Antrópico, para el cual, propone dos versiones. La fuerte y la débil:

- Principio Antrópico Débil (WAP): Nuestra posición en el universo es privilegiada, **al menos lo suficiente** para que existamos.
- Principio Antrópico Fuerte (SAP): El propio universo, y sus parámetros físicos fundamentales, tienen **una configuración precisa para** hacer posible la existencia del ser humano.

La versión débil es evidente por sí misma. Es casi una tautología. Evidentemente, si el hombre existe, es porque se han dado las condiciones necesarias para su existencia. En cualquier caso, luego veremos que razonar de esta manera no es tan absurdo, y se han llegado a conclusiones y predicciones científicas muy interesantes a través de este principio.

Pero Carter, fruto de sus estudios científicos, ¡defendía la versión fuerte! Fijémonos en que lo más sorprendente de la versión fuerte está en el “para” que he subrayado ¿está queriendo decir Carter que el hombre es el fin del universo? Consideremos lo que implica la versión fuerte del principio:

- Esta formulación fuerte compromete a **la totalidad** del universo, no solo a una región específica o a un momento de su existencia. Es decir, no es que el hombre habite un lugar privilegiado y viva en una era privilegiada del universo, que hace posible su existencia (principio antrópico débil). Es que el hombre habita en un universo privilegiado que parece **diseñado** para que el hombre pueda existir, o deba existir.
- La formulación fuerte plantea, de alguna manera, la “centralidad” del hombre en el universo.

¿Realmente es científico el principio antrópico fuerte? Dejemos la versión fuerte para más adelante. Dejemos a un lado también la pregunta de por qué las leyes naturales son como son, y por qué las variables G , la masa del neutrón, la masa del electrón, etc. tienen los valores que tienen. Aunque esa pregunta tiene muchísima importancia, y no es obvia en absoluto, de momento démosla por hecho.

Vayamos a por el principio antrópico débil. Con las leyes naturales y las constantes universales que conocemos, ¿qué condiciones deben darse para que exista la vida, y una vida inteligente y consciente de sí misma? ¿hasta qué punto son extraordinarias o improbables esas condiciones?

1.3.1. El principio antrópico débil

Todos los científicos, y no solo los científicos, sino todas las personas, nos preguntamos ¿cómo es que existimos? ¿no es una inmensa “casualidad” que existamos?

El concepto “casualidad” es un poco relativo aquí. Si uno tira una moneda un millón de veces, quizás en algún momento salen 10 caras seguidas, una detrás de otra ¿podríamos decir que eso es una inmensa casualidad? En realidad, no. Basta con repetir el experimento suficientes veces, y alguna vez saldrán 10 caras seguidas.

Es evidente que, para que exista el hombre, se tienen que dar una serie de circunstancias especiales, una estrella amarilla o naranja, un planeta con unas características determinadas, a una distancia determinada, y un larguísimo, larguísimo, larguísimo etc. Pero ¿es eso tan sorprendente?

Consideremos los 200.000 millones de estrellas de nuestra galaxia. Y ahora consideremos los 100.000 millones de galaxias, cada una de ellas con unos 200.000 millones de estrellas. Y cada estrella con muchos planetas ¿en alguna de todos esos planetas de todas esas estrellas existirá vida consciente? Y si no existe ahora, esperemos un millón de años, o 100 millones de años, o mil millones de años ¿tarde o temprano existirá vida consciente en algún lugar? Y cuando exista, de existir en algún lugar, seguramente esa vida consciente exclame “¡Qué extraño que yo exista! ¿Qué pinto yo aquí?”

El principio antrópico débil, por tanto, argumenta que donde existe la vida consciente, y cuando exista, se han dado previamente, evidentemente, las extraordinarias circunstancias necesarias para que exista esa vida consciente.

El principio antrópico débil dice que en un universo que es grande o infinito en el espacio y/o en el tiempo, las condiciones necesarias para el desarrollo de vida inteligente se darán solamente en ciertas regiones que están limitadas en el tiempo y en el espacio. Los seres inteligentes de estas regiones no deben, por lo tanto, sorprenderse si observan que su localización en el universo satisface las condiciones necesarias para su existencia.” (Hawking).

Así que, sería el azar el responsable de que existamos.

Yo sería, básicamente, un animal. En concreto un homo sapiens. Uno de entre 7.000 millones de sapiens que habita un pequeño planeta, que da vueltas alrededor de una estrella común, la cual es una de las 200.000 millones de estrellas que dan vueltas en una galaxia común, que no es más que una de las 100.000 millones de galaxias que existen en el universo. Como nos viene a decir Carl Sagan, no soy muy importante... ¹⁶



Toda nuestra historia y todo lo que somos está en ese punto azul, la Tierra. (Carl Sagan)

Pero no es tan sencillo...

Contra esta forma de pensar, Hoyle, uno de los científicos y físicos más importantes de finales del siglo XX, reacciona de la siguiente manera:

Un depósito de chatarra contiene todos los pedazos y piezas, sueltos y dispersos, de un Boeing 747. Un viento fuerte sopla a través del depósito. ¿Cuál sería la posibilidad de que, amainado el viento, apareciese un Boeing 747 completamente montado y listo para volar? Completamente despreciable, aun cuando un tornado hubiese atravesado suficientes depósitos como para llenar todo el universo.

¹⁶ “Mira ese punto. Eso es aquí. Eso es nuestro hogar. Eso somos nosotros. En él, todos los que amas, todos los que conoces, ...– en una mota de polvo suspendida en un rayo de sol. La Tierra es un escenario muy pequeño en la vasta arena cósmica (...). Nuestras posturas, nuestra importancia imaginaria, la ilusión de que ocupamos una posición privilegiada en el Universo... es desafiada por este punto de luz pálida. (...). Quizás no hay mejor demostración de la soberbia humana que esta imagen distante de nuestro minúsculo mundo.” Carl Sagan.

En realidad, Hoyle solo repite el mismo argumento que Balbus, el filósofo estoico del siglo I a.C.

Quien crea que esto es posible por simple azar, también puede creer que si una gran cantidad de las veintiún letras, compuestas de oro o de cualquier otra materia, fueran arrojadas al suelo, caerían en un orden tal que formarían de manera legible los "Anales de Ennio"

Es también muy conocido el argumento del relojero de Voltaire en este sentido,

Si un reloj presupone un relojero, si un palacio indica un arquitecto, ¿por qué el Universo no ha de demostrar una inteligencia suprema? ¿Cuál es la planta, el animal, el elemento o el astro que no lleve grabado el sello de Aquél a quien Platón llamaba el eterno geómetra?"

Para estudiar este tipo de cuestiones se realizaron diversos experimentos. En un experimento realizado en 2003 en el Zoo de la Universidad de Plymouth, colocaron un teclado de ordenador en una jaula con seis monos, con la esperanza de que, al cabo de un largo tiempo, hubieran logrado escribir algo lógico. No esperaban que escribieran por azar una novela, ni si quiera una página coherente, pero ¿quizás escribieran alguna frase coherente? En realidad, el resultado fue que ni siquiera escribieron una sola palabra coherente, solo obtuvieron cinco páginas de una larga serie de la letra S, y la mayoría prefirieron morder el aparato, atacarlo con piedras o usarlo como orinal.

Pero sigamos profundizando en la cuestión, que no es baladí. Con las leyes naturales que conocemos, ¿es fácil que se forme la vida? ¿es fácil que se forme un ser consciente? Si nos detenemos a pensarlo, es lo mismo que preguntarse ¿es posible que exista vida extraterrestre en otros planetas del universo? (date cuenta de que, en realidad, es una pregunta equivalente).

Imaginemos que llegamos a la conclusión de que debe de haber en este universo muchísimos planetas habitados por seres conscientes. En ese caso, concluiríamos que las circunstancias que se han dado para nuestra existencia son especiales, pero no tanto. La sorpresa de que existamos sería similar a la sorpresa que puede tener la reina de Inglaterra al ser ella la reina, que quizás haya pensado "¿Cómo es posible que sea yo la reina? ¡Qué casualidad!". Pero, en un mundo donde existen reyes, alguien tenía que ser un rey o una reina. En un universo donde existe vida consciente, alguien será consciente.

"Difícilmente un universo tan grande es construido solo para el hombre" (Maimónides).

En el próximo apartado vamos a analizar las condiciones que deben darse para que se origine la vida, pero sobre todo nos interesa conocer si es fácil o difícil que algo así se pueda llegar a producir.

Condiciones necesarias para la formación de vida

Analizamos ahora las condiciones que deben darse para la aparición de la vida en un planeta. Al plantearte esta cuestión, seguro que estás pensando que las formas de vida pueden ser muy distintas a las que conocemos en la Tierra, y podría estar basada en una química muy diferente.

Por tanto, primero dedicaremos un tiempo breve a demostrar que es imposible la formación de vida compleja basada en elementos distintos al carbono, al hidrógeno y al oxígeno. Y por supuesto, es imposible la existencia de ningún tipo de forma de vida sin agua.

Posteriormente, profundizaremos en las condiciones especialísimas que debieron darse para la aparición de las primeras formas de vida en la tierra, hace casi cuatro mil millones de años, cuando la tierra prácticamente acababa de nacer.

Y, por último, dedicaremos algunas líneas a explicar cómo puede aparecer la consciencia y la inteligencia a partir de la vida.

Siguiendo el orden acordado, cabe ahora preguntarse si son posibles formas de vida muy distintas a la nuestra. Por ejemplo, ¿es posible la vida basada en el silicio o basada en cualquier otro elemento en lugar de en el carbono?

Para poder responder a esto es importante conocer cuáles son los mecanismos de la vida, y por qué solo el carbono y el agua pueden proporcionarlos. Todo lo que vamos a estudiar a continuación es muy importante para entender las argumentaciones que vendrán después cuando estudiemos el principio antrópico fuerte.

El agua

Dado que el universo está compuesto en un 75% de hidrógeno y en un 23% de helio, conviene que analicemos todos los compuestos que se forman con el hidrógeno, que podríamos decir, simplificando, que es la materia prima del universo. De haber vida en alguna parte, tendrá que depender de un compuesto de hidrógeno. No puede ser un compuesto de helio porque es un gas noble y no reacciona con nada.

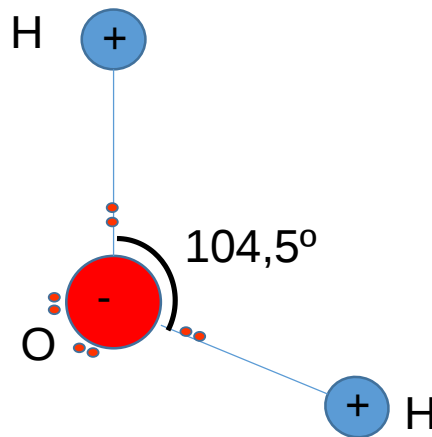
Veremos que el compuesto que estamos buscando solo puede ser el agua. El H_2O es, con mucho, la sustancia que tiene un comportamiento más extraño de toda la naturaleza. Y, de todos los compuestos basados en hidrógeno, el agua tiene unas propiedades extrañas.

Para entender las características tan singulares que exhibe el agua es preciso explicar muy brevemente su estructura molecular.

El núcleo del hidrógeno está constituido por un único protón, y en su entorno “baila” un único electrón. Pero este átomo necesita solo un segundo electrón para hacerse estable. Su átomo, al tener una sola capa de electrones, solo necesita 2 para quedar “en equilibrio”. Por su parte, el oxígeno, que tiene seis electrones en su última capa, busca dos electrones para conseguir ocho en su última capa y hacerse estable. Así, el átomo de oxígeno, al asociarse con un átomo de hidrógeno, comparten cada uno un electrón formando un enlace covalente muy fuerte. Ese átomo de hidrógeno queda así estable, pero el oxígeno necesita asociarse, de manera idéntica, con otro átomo de hidrógeno adicional para así quedar con ocho electrones en su capa.

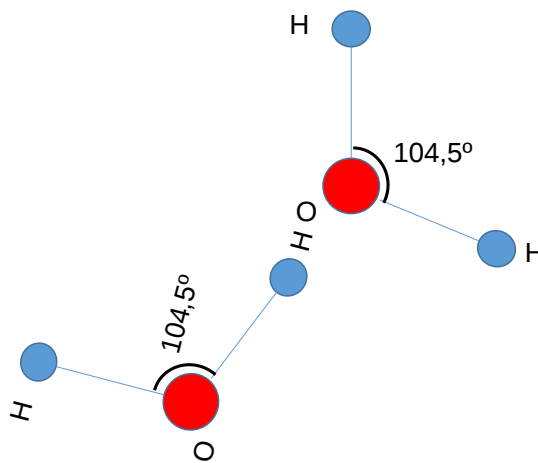
El oxígeno necesita esos electrones con mucha más fuerza que el hidrógeno, de manera que, aunque los comparten, los electrones quedan mucho más cerca del átomo de oxígeno. Así, el oxígeno queda cargado negativamente, y los dos átomos de hidrógeno quedan cargados positivamente.

Los otros cuatro electrones que tiene el oxígeno en su última capa generan un desequilibrio en la molécula de agua, provocando que los átomos de hidrógeno no aparecen uno enfrente del otro, sino que forman un ángulo de $104,5^\circ$.



Se representan en este gráfico los 8 electrones que consigue el átomo de oxígeno. Tenía seis, más uno que se lo comparte uno de los átomos de H y el otro que se lo comparte el otro átomo. Los otros cuatro electrones (dos pares) que se representan a la izquierda del átomo de oxígeno, están en realidad unos detrás (hacia el fondo de la pantalla) y otros delante de la pantalla. De manera que todo se dispone de manera tridimensional.

El hecho de que, en la molécula de agua, los átomos de hidrógeno queden cargados positivamente y los de oxígeno queden cargados negativamente tiene **una importancia extraordinaria**, como vamos a ver. La carga positiva de los átomos de hidrógeno de una molécula de agua, y la carga negativa de los dos pares de electrones libres del oxígeno de otra molécula, se atraen entre sí con una fuerza que no aparece en otros compuestos de hidrógeno. Así, entre distintas moléculas de agua se dan *enlaces de hidrógeno*.



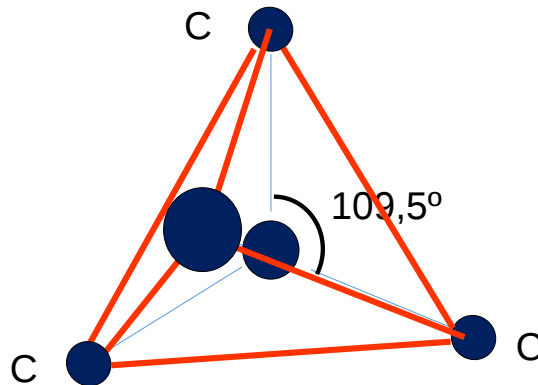
En la figura se representa como el átomo de oxígeno de una molécula de agua, cargado negativamente, atrae al átomo de hidrógeno de otra molécula de agua.

Cada uno de los dos átomos de hidrógeno cargados positivamente atrae a uno átomo de oxígeno de otra molécula de agua. Y cada par de electrones libres del oxígeno atrae a un átomo de hidrógeno de otra molécula de agua. Se forma así una estructura similar al tetraedro.

El enlace de unión entre distintas moléculas de agua se llama **puentes de hidrógeno**, y es la base para cualquier forma de vida, como veremos enseguida.

El ángulo que forman los átomos de hidrógeno en la molécula de agua hemos dicho que es de 104,5 grados, y esto es muy importante porque es muy cercano a los 109,5 grados que sería el necesario para la formación de un tetraedro perfecto, como se da en el diamante.

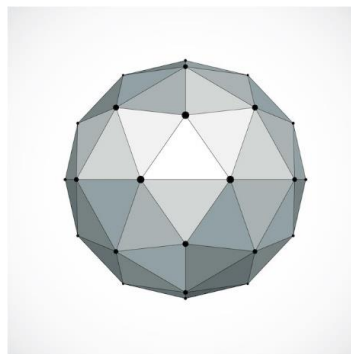
En efecto, en el caso del diamante, cada átomo de carbono se asocia por doble enlace (comparte dos electrones) con otros cuatro átomos de carbono. Se forma así una estructura reticulada fortísima y perfectamente ordenada, en forma de tetraedros perfectamente regulares, en retícula.



Disposición tetraédrica de los átomos de carbono en el diamante. El átomo que representamos en el centro de esta figura estaría en el centro geométrico del volumen de un tetraedro regular, y se une con los otros cuatro átomos de carbono que estarían en los vértices. Pero, a su vez, cada uno de los átomos de los vértices, es también centro geométrico de otro tetraedro.

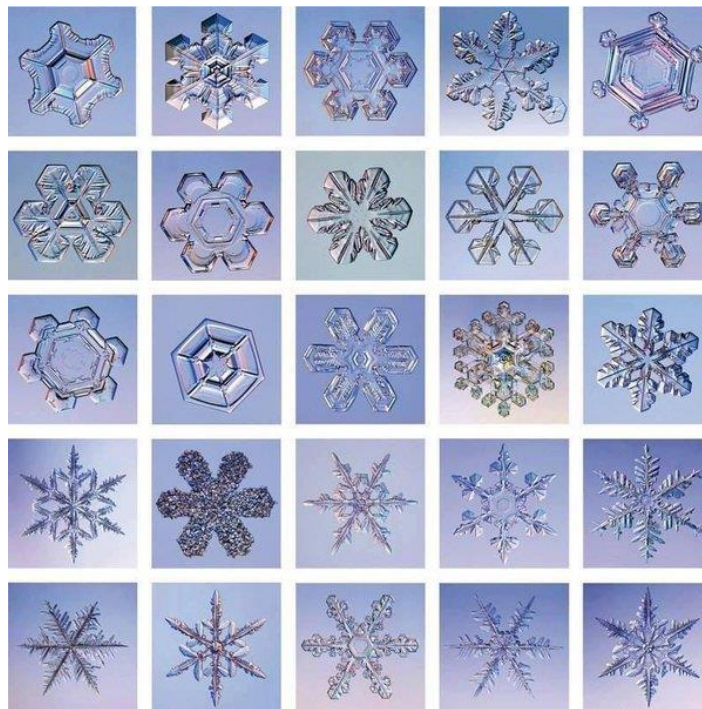
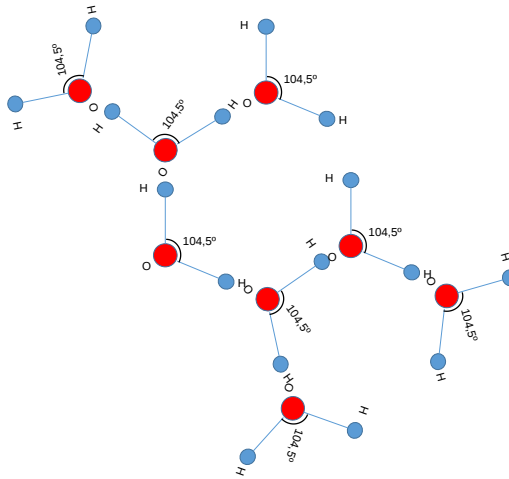
Es curioso recordar que, para Platón, los elementos últimos de la materia son los poliedros regulares y, no cabe duda de que, en parte, estaba en lo cierto.¹⁷

La disposición de los átomos del carbono se replica por todo el espacio en tres dimensiones, de tal manera que el aspecto externo del diamante es similar a esto:



¹⁷ El diamante tarda en formarse más de mil millones de años, con compuestos concentrados de carbono que se encuentran a doscientos kilómetros de profundidad a altísimas presiones y temperaturas.

A continuación, representamos la estructura que forman las moléculas del agua en el hielo (hay que imaginarlo tridimensional dibujando otra molécula que sale hacia fuera del papel por cada átomo de oxígeno del dibujo).



Copos de nieve vistos al telescopio. Bentley analizó miles de ellos y no encontró dos iguales. Fuente: ACNA



Estructura fractal del agua en estado sólido (copo de nieve). Foto de Michael Peres

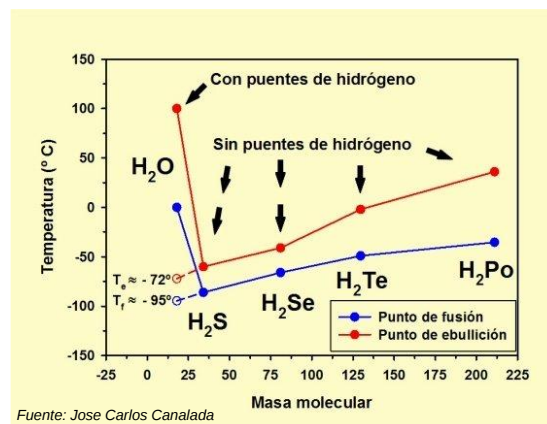
Esta disposición de los átomos de hidrógeno en la molécula de agua, y la manera en que se atraen las distintas moléculas de agua con sus puentes de hidrógeno explica muchas de las extrañas propiedades del agua:

- La **temperatura de fusión** del agua es muy alta porque, para separar las moléculas de agua en el hielo es necesario romper las cadenas que unen al átomo de hidrógeno de una molécula con el átomo de oxígeno de la otra (puentes de hidrógeno). Esto hace que, el agua, sea un compuesto de hidrógeno muy extraño, que puede presentarse en estado sólido a temperatura ambiente (hielo o nieve). Este feliz suceso permite que el agua se almacene en enormes depósitos de agua dulce en las montañas durante el invierno, para luego deshelarse y contribuir durante el verano con aportes de agua vitales.
- También debido a que muchos enlaces de hidrógeno sobreviven todavía en el agua líquida, **la temperatura de ebullición** es también muy alta. Esto permite que el agua lo consideremos en prácticamente todo el planeta como un **elemento líquido** a temperatura ambiente, a diferencia de la inmensa mayoría de compuestos de hidrógeno que son gases como el ácido sulfhídrico H_2S , que no tiene puentes de hidrógeno.

En el siguiente gráfico vemos cómo se comportan los compuestos de hidrógeno más parecidos al agua. Los que se forman con dos átomos de hidrógeno y un elemento de la columna del oxígeno (azufre, selenio, telurio, polonio).

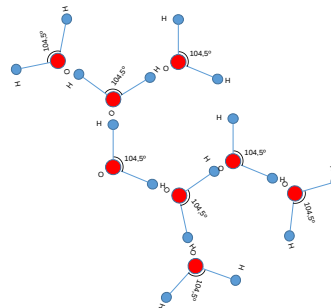
En ninguno de estos casos se dan puentes de hidrógeno porque las moléculas que forma el hidrógeno con estos elementos no son polares. El azufre, el selenio, el telurio, etc son átomos demasiado grandes (con muchas capas) y los electrones compartidos no quedan tan fuertemente atraídos como lo hace el oxígeno. Y así los átomos no quedan tan cargados eléctricamente y no se polariza la molécula.

Esto hace, por ejemplo, que las moléculas de H_2S no se atraigan entre sí con fuerza, y por este motivo es un gas.



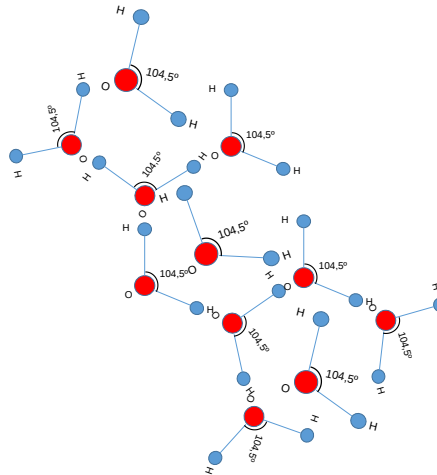
Se puede observar en el gráfico que el H_2O tiene unas temperaturas de fusión y ebullición mucho más altas de las que le corresponderían. Esto es debido a los puentes de hidrógeno que hemos visto.

La forma ordenada en que se organizan la red de unión de moléculas de agua explica también los huecos que quedan entre las moléculas de H_2O , responsables de que **el hielo tenga una densidad inferior a la del agua**.



Estructura simplificada de las moléculas de agua en el hielo

Cuando el agua está en estado líquido, algunos de los enlaces de hidrógeno han conseguido romperse, y las moléculas de H₂O sueltas se cuelan y rellenan los huecos, de manera que la densidad del agua es superior a la del hielo.



Estructura simplificada de las moléculas de agua en estado líquido. Algunas moléculas se cuelan en los huecos de la estructura reticulada que había en el hielo. Al rellenar huecos, el agua se hace más densa

En 1913, Henderson explicó que este singular fenómeno que se da en el agua es esencial para que hubiera sido posible la formación de la vida. Si esto no se diera, el hielo se iría acumulando en el fondo de los océanos, y se iría rellenando, hasta convertir el océano en una masa compacta de hielo, y como consecuencia de ello, debido a la retroalimentación por albedo, un altísimo porcentaje de la energía solar se reflejaría hacia el espacio, y el planeta Tierra se convertiría en una gigantesca bola de hielo¹⁸.

El hecho de que el hielo se quede arriba en la superficie del lago, o del mar, protege el ambiente acuático que queda debajo, que sigue en estado líquido. El hielo, al quedar arriba, se derretirá en cuanto el sol vuelva a calentar con fuerza.

Este feliz estado de cosas hizo posible la aparición de la vida, puesto que con mares y pantanos sólidamente congelados habría sido imposible. Es sabido que el origen de la vida solo se puede dar en un ambiente acuático, no sólido, como veremos enseguida.

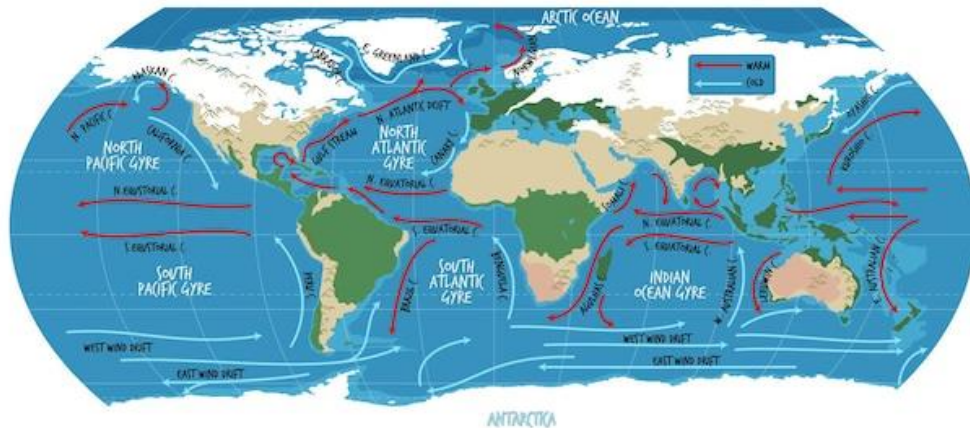
¹⁸ Ya vimos en el primer curso los efectos de retroalimentación que se daban en el planeta debido al albedo. Un océano helado produciría, sin remedio, que la tierra se convirtiera en una inmensa bola de hielo debido a que reflejaría prácticamente toda la luz solar al espacio, enfriando cada vez más el planeta.

Los enlaces de hidrógeno explican también que el **calor de vaporización** sea el más alto de todos los compuestos basados en hidrógeno. En realidad, **no existe ningún otro compuesto de ningún tipo que tenga un calor de vaporización que se acerque al del agua**. Es decir, es necesario aportar muchísima energía para lograr que el agua que está en estado líquido pase a estar en estado gaseoso. Y esto es esencial para que los animales puedan refrigerarse. Al sudar logran que algunas moléculas de agua en su piel se evaporen, llevándose así mucha energía y enfriando el cuerpo.

Por otra parte, el **calor específico** del agua es el mayor de todos los compuestos orgánicos posibles. Es decir, para lograr que un litro de agua incremente un grado su temperatura es necesario darle muchísima energía. Esto es fundamental porque permite que el agua **almacene** en su interior una inmensa cantidad de energía ¿Y por qué esto es esencial? Es muy importante porque los océanos son los principales termorreguladores del planeta Tierra. A pesar de que en verano recibimos muchísima más energía del sol, los océanos absorben toda esa energía y apenas se calienta ese hemisferio, de manera que los mares logran que la Tierra mantenga una temperatura fresca en verano. Cuando luego llega el invierno, el océano desprende muchísimo calor sin apenas enfriarse, sin apenas bajar su temperatura, logrando calentar la Tierra cuando lo necesitamos.

Pero también el agua es extraordinaria si la analizamos en relación con su capacidad para transportar calor, siendo, sin lugar a duda, **el compuesto orgánico con mayor conductividad térmica**. Pero sobre todo es eficaz en el transporte de calor por convección por estar en estado líquido y por acumular tanta energía debido a su alto calor específico ¿Y esto por qué es fundamental? Estas propiedades, unidas al hecho de que es capaz de almacenar mucha energía debido a un calor específico tan alto, permiten que el agua transporte, por corrientes, una enorme cantidad de energía de un hemisferio a otro. De manera que cuando es verano en el hemisferio norte, buena parte de ese calor del norte se traslada al sur. Y viceversa.

Por tanto, los océanos son el radiador y el aire acondicionado del planeta. Son fundamentales para la regularización térmica y absolutamente necesarios para que existan climas suficientemente suaves.



Corrientes de los océanos

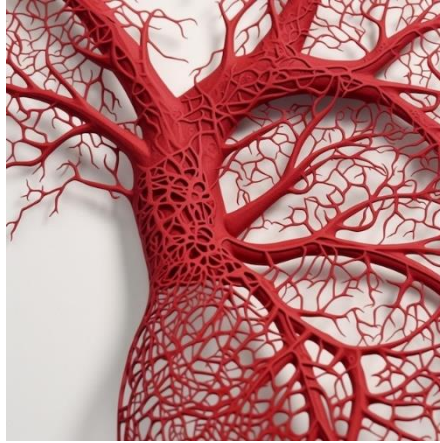
A lo largo de la historia muchos pensadores se han preguntado, “*si el planeta Tierra realmente está hecha para el hombre como afirman las religiones monoteístas ¿por qué habitamos un planeta con 2/3 partes de agua?*” En realidad, si el planeta tuviera menos cantidad de agua en los océanos, el hombre no existiría. Las variaciones climáticas del verano al invierno serían tan extremas que el desarrollo de una especie como el homo sapiens habría sido inviable.

Pero, además, el agua es extraordinaria debido a su **tensión superficial**. Todos nos hemos quedado alguna vez maravillados al ver como se forman gotas de agua casi esféricas cuando cae el agua encima de un mantel. Esta es una propiedad extrañísima del agua y es debida, de nuevo, a los puentes de hidrógeno ¿Por qué esto es esencial? Esta alta tensión superficial permite que el agua pueda ascender por **capilaridad**, y sin esta propiedad las plantas no pueden existir.



Las plantas logran incorporar en su organismo los nutrientes de la tierra gracias al fenómeno de capilaridad. El agua con las sales y nutrientes disueltos asciende por las raíces y los tallos.

Pero también es esencial la capilaridad en los animales, ya que permite hacer llegar la sangre a todas las células del cuerpo gracias a los capilares.



Red de capilares del sistema circulatorio



Un basilisco aprovecha la tensión superficial del agua para correr sobre ella.

(Bence Mate/Nature Picture Library/Corbis)

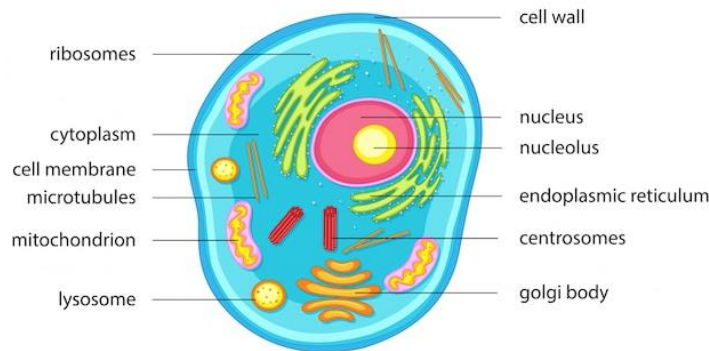
La **constante dieléctrica** del agua es también altísima, siendo prácticamente la más alta de los líquidos conocidos. Esto es debido a que los átomos de hidrógeno de la molécula de H_2O están cargados positivamente, mientras que los de oxígeno están cargados negativamente. Esto permite que el agua sea **uno de los más eficaces y potentes disolventes que existen**. Por ejemplo, es capaz de disolver la sal común (NaCl), además de otras muchísimas sales, todas ellas esenciales para la vida tanto acuática como terrestre. Esta propiedad la aprovechan las plantas porque el agua, con sales y nutrientes disueltos, asciende por capilaridad, desde las raíces hasta las hojas. También la utilizan los animales porque la sangre es, esencialmente, agua con sales disueltas, y de esta manera transporta todos los elementos minerales y orgánicos fundamentales para nutrir a todas las células del cuerpo. Vemos que, en realidad, las plantas y los animales no son muy distintos, unos y otros utilizan las mismas propiedades excepcionales del agua para vivir.

El agua pura no es buena conductora de la electricidad, por ser neutra. Pero, como hemos visto, tiene la extraordinaria capacidad de disolver todo tipo de sales, permitiendo así **una altísima conductividad eléctrica**.

Agua pura: 2 mmhos/cm
Agua de lluvia: 500 mmhos/cm
Aguas interiores: 5.000 mmhos/cm
Agua de mar: 50.000 mmhos/cm

Esto permite que se creen diferencias de potencial eléctrico entre un punto fuera de la célula y dentro de la célula, necesario para la contracción muscular, por ejemplo.

La polaridad del agua permite también que existan sustancias **hidrófobas**, sustancias neutras no polares que son repelidas por las moléculas polarizadas del agua. Algunos de los manteles que usamos para comer son hidrófobos, y no permiten que el agua entre en ellos. Las grasas (aceites) no se disuelven en el agua porque son hidrófobos, son neutros (no polares) y no son atraídos por las moléculas polarizadas del agua. La polaridad del agua permite que sean posibles este tipo de sustancias hidrófobas, y esto es esencial para que se puedan formar las paredes de las células y sus membranas, formadas por lípidos y grasas. Los científicos que analizan cómo fue posible el origen de la vida en los océanos primitivos saben que la formación de estas primeras membranas “aislantes y protectoras” fue un acontecimiento fundamental, porque es un paso fundamental y **previo** incluso al evento de auto replicación de las células.



Antes incluso de la existencia de las primeras células vivas en la tierra, tuvo que existir un paso intermedio consistente en la formación de compuestos complejos rodeados de una capa protectora de lípidos hidrófobos que le dieran esa individualidad fundamental (membrana celular lipídica)

Es importante reflexionar que todas estas propiedades que estamos mencionando se dan solo en el agua en su estado **líquido**.

Podríamos seguir así páginas y páginas, pero creo que esto es más que suficiente para entender que es muy difícil imaginar vida basada en otros compuestos de hidrógeno distintos del agua líquida.

Los científicos que buscan posibles exoplanetas (planetas en otras estrellas) que pudieran albergar vida, restringen su búsqueda a aquellos planetas que se encuentran a una distancia de su estrella que hagan que las temperaturas ambientales permitan la existencia de agua en estado líquido, como en la Tierra.

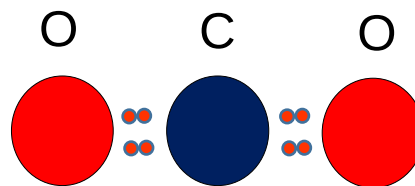
El carbono

La vida en la Tierra está basada en agua, pero también en determinados elementos clave. Uno de ellos es, sin lugar a duda, el carbono. Absolutamente todas las moléculas orgánicas (las que participan en la constitución de los cuerpos vivos) están constituidas por la unión de muchos átomos de carbono e hidrógeno, además de algunos otros elementos, pero el carbono y el hidrógeno son los fundamentales.

Las propiedades extraordinarias del carbono se deben a que tiene 6 electrones, dos en el primer orbital (por tanto, estables), y 4 en el segundo orbital.

El carbono, para ser estable, puede buscar otros 4 electrones que le faltan para llegar a los 8 que necesita en la segunda capa, o bien puede ceder los que tiene.

Cuando se une a dos átomos de oxígeno, forma un doble enlace con cada uno de los dos átomos de oxígeno, compartiendo dos electrones con cada uno, de manera que también cada átomo de oxígeno consigue los dos electrones que le faltan. Se forma así el dióxido de carbono (CO_2). En esta molécula no se dan ninguna de las propiedades que vimos en el agua, porque el carbono y el oxígeno atraen ambos con mucha fuerza a los electrones compartidos, de manera que ninguno de los dos se carga eléctricamente. Y, además, ambos átomos de oxígeno se disponen uno enfrente del otro, de manera que no forman un ángulo (como si hacían los átomos de hidrógeno en el agua).



La molécula de CO_2 queda así muy estable y totalmente autónoma e individualizada, y no necesita mucho más, razón por la cual el CO_2 **es un gas** (sus moléculas son autónomas), y esto es fundamental que sea así para la existencia de la vida.

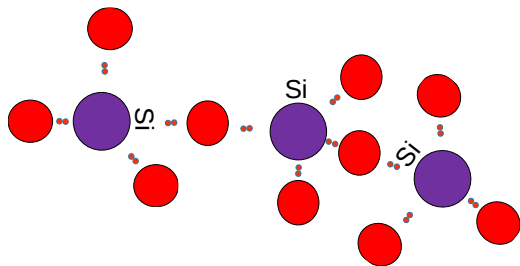
El silicio es muy parecido al carbono, de hecho, está en la misma columna de la tabla periódica y, como el carbono, también necesita cuatro electrones.

¿Es posible que el silicio se pueda asociar con el oxígeno de manera similar al CO_2 ? ¿podríamos imaginar una vida basada en silicio?

El problema está en el propio átomo de silicio, que es mucho más grande que el de carbono, con mayor masa, y mayor radio atómico, y no logra compartir dos electrones a la vez, no puede formar enlaces dobles con el oxígeno.

De manera que el silicio se une con enlace covalente a cuatro átomos de oxígeno (para que el silicio consiga los cuatro electrones que necesita), pero cada átomo de oxígeno se une a dos de silicio (para conseguir los dos electrones que necesita). De manera que el dióxido de silicio no son moléculas sueltas y estables, sino una red tetraédrica de átomos de oxígeno y silicio. El dióxido de silicio **es un cristal**, donde la proporción es el doble de átomos de oxígeno que de silicio.

Estamos hablando de la sílice, que en su estado puro es **el cuarzo**. Es el material del que está compuesta la arena, y es el más abundante de la corteza terrestre. Pero al ser un material sólido, y además ser insoluble en el agua, no puede servir como base para la vida en sustitución del carbono.



Red tridimensional de la sílice. El cuarzo. SiO₂

Otra de las importantes características del carbono es que los enlaces entre los distintos átomos del propio carbono son muy fuertes y estables, compartiendo electrones entre ellos en enlaces covalentes. En el caso del diamante, cada átomo de carbono comparte electrones con otros cuatro, formando el cristal más duro de la naturaleza. Esta fuerza de los enlaces entre los átomos del carbono hace posible la vida, ya que da estabilidad a los compuestos orgánicos y permite además la formación de larguísimas cadenas de átomos de carbono (**ADN**). Estamos constituidos por la fuerza del diamante.

Por otra parte, no hay ningún otro elemento de la tabla periódica que produzca la enorme variedad de radicales libres que produce el carbono. Lo que permite un sin número de reacciones distintas, haciendo posible una vida compleja.

El carbono es, por tanto, esencial para cualquier forma de vida imaginable, y es imposible la existencia de ningún tipo de vida compleja que no esté basada en carbono.

Pero para que todo esto sea posible es necesario un almacén de carbono siempre disponible en cualquier lugar donde la vida habite. Esto es posible gracias al CO₂.

El dióxido de carbono

El dióxido de carbono es el almacén y fuente de carbono que utilizan las criaturas vivientes en su ambiente.

Está disuelto tanto en el agua (ríos y océanos) como en el aire. Lo más increíble de sus características es que, a temperatura ambiente, **la concentración de dióxido de carbono en el agua es muy similar a la del aire**, de manera que se produce una transferencia continua de este elemento entre el océano y el aire, y entre el aire y el océano, permitiendo que la vida exista en ambos medios. Entre todos los gases, solo el CO₂ tiene esta increíble propiedad, que solo se da a la temperatura del planeta Tierra (justo a la misma temperatura a la que el agua alcanza propiedades extraordinarias).

Ya vimos en el primer curso que el dióxido de carbono permite que las plantas pudieran realizar la fotosíntesis. Ayudándose de la energía solar captan el carbono del CO₂, y expulsan el oxígeno a la atmósfera. El carbono pasa a convertirse en compuestos orgánicos que formarán los tallos, las hojas, los troncos, etc, y son, en última instancia, fuentes de energía en sí mismos para el resto de los animales.

Los animales comerán esas hojas y las utilizarán como fuente de energía, y al quemarlas en su organismo generarán de nuevo CO₂. El dióxido de carbono, al ser muy soluble en agua (en sangre), permitirá que luego sea fácilmente expulsable del cuerpo a través del sistema respiratorio.

Por otra parte, el propio CO₂ es fundamental para mantener la Tierra a una temperatura habitable. Sin el CO₂ la temperatura del planeta sería varias decenas de grados más baja, y el planeta sería una gran bola de nieve.

Podríamos seguir hablando de otras increíbles coincidencias en otros elementos fundamentales para la vida, por ejemplo, las que se dan en el fósforo para poder formar las cadenas de ATP que son los almacenes de energía que utilizan las células de nuestro cuerpo, y de otros muchísimos elementos fundamentales para la vida, el calcio, el azufre, etc. Pero nos detendremos en el oxígeno para ir finalizando.

El oxígeno

Si lo medimos por peso, el oxígeno es el elemento más abundante de la corteza terrestre, y también es el elemento más abundante en los seres vivos. Básicamente porque el oxígeno es responsable de la mayor parte del peso del agua.

Su existencia autónoma en la atmósfera terrestre no tiene origen cósmico. Todo el oxígeno que tenemos en nuestra atmósfera (el 21% del aire es oxígeno) proviene de las plantas. Si quitamos las plantas, el oxígeno habría desaparecido en solo un millón de años y nuestra atmósfera se acabaría convirtiendo con el tiempo en una atmósfera similar a la de Venus, compuesta básicamente de CO₂ (porque son las plantas las responsables de haber ido extrayendo poco a poco todo el carbono que había inicialmente en la atmósfera terrestre para formar caliza). Todo esto provocaría temperaturas abrasadoras y una presión atmosférica insostenible para la vida. En cualquier caso, sin plantas no hay vida.

El oxígeno es un elemento **altamente reactivo**, es el oxidante universal, y solo el flúor y el cloro son más reactivos que él. Estos elementos, al estar muy a la derecha y muy arriba en la tabla periódica, están desesperados por captar electrones. Cuando las primeras algas, hace más de 3.000 millones de años, comenzaron a desprender oxígeno provocaron una enorme crisis planetaria porque, como decimos, el oxígeno es un elemento altamente reactivo y corrosivo.

1	H																	2	He																																												
3	Li	4	Be													5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne																																				
11	Na	12	Mg													13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar																																				
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr																												
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe																												
55	Cs	56	Ba	57	La	58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn
87	Fr	88	Ra	89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr	104	Rf	105	Db	106	Sg	107	Bh	108	Hs	109	Mt	110	Ds	111	Rg	112	Cn	113	Uut	114	Fl	115	Uup	116	Lv	117	Uus	118	Uuo

Lanthanide Series

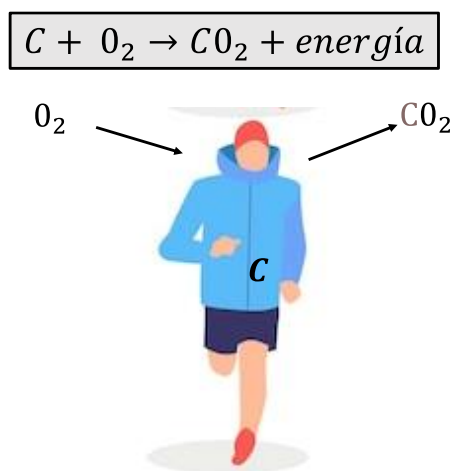
Actinide Series

El oxígeno, el flúor y el cloro, por estar muy a la derecha en la tabla periódica, están desesperados por captar electrones. Querrían ser gases nobles (los de la derecha del todo).

La cantidad de oxígeno que hay en la atmósfera es exactamente la necesaria para una vida como la que conocemos. Si fuera un poco mayor todos los bosques se incendiarían espontáneamente. Si la proporción de oxígeno atmosférico se incrementa del 21% al 22% la probabilidad de incendios se incrementa un 70%. Si hubiera una proporción un poco menor de oxígeno, el tipo de vida *activa* de los animales que conocemos no sería viable, puesto que el oxígeno es fundamental para el proceso de generación de energía en los animales.

El oxígeno es también responsable de la existencia del ozono (O₃) en las capas altas de la atmósfera, un elemento fundamental para la existencia de vida en la Tierra, dado que este gas evita la entrada de los rayos ultravioletas que vienen del sol, rayos nocivos que tienen la capacidad de destruir los compuestos basados en carbono.

Pero, sobre todo, el oxígeno es el oxidante por excelencia. El elemento que permite los procesos de combustión de los compuestos de carbono, procesos que generan energía. En efecto, la oxidación del carbono es una de las reacciones fundamentales para que los organismos vivos puedan conseguir energía



Cuando corremos quemamos el carbono del desayuno de la mañana con el oxígeno que entra por nuestra respiración, y lo convertimos en CO_2 y energía.

En definitiva, toda la comunidad científica está de acuerdo en que la vida compleja, y no digamos la vida inteligente, debe formarse a partir de compuestos orgánicos basados en el carbono, en el agua, y en el oxígeno.

Es cierto que se puede pensar en que una comunidad de robots inteligentes podría comportarse como seres “vivos”, capaces de reproducirse, evolucionar, prosperar y conquistar galaxias, y podrían estar formados de silicio, por ejemplo, pero solo podrían existir si una vida orgánica inteligente **basada en el carbono** los hubiera creado primero.

Por resumir, lo más importante que debemos tener en cuenta de todo lo dicho en este apartado es que todas las extraordinarias cualidades que exhiben el agua, el carbono, el dióxido de carbono, el oxígeno, etc, que son absolutamente esenciales para cualquier forma de vida posible, dependen únicamente de unos pocos valores de constantes universales como el peso del neutrón, el peso del electrón, la constante de la fuerza nuclear débil, la nuclear fuerte, G y algunas pocas más. Esto quiere decir que no es posible imaginar elementos y sustancias mágicas desconocidas que puedan producir formas de vida inimaginables, porque **no hay más elementos en el universo que los de la tabla periódica**. Sabemos que no puede haberlos porque sabemos cómo funciona la lógica de los átomos viables (profundizaremos en ello en último capítulo de este curso), y además conocemos la composición de los materiales de las estrellas. La vida, o es en base a agua y carbono, o no es vida. Y si queremos vida suficientemente compleja, debe basarse también en el oxígeno.

Pero, como ya os estáis imaginando, la existencia de estas sustancias esenciales es absolutamente necesaria, pero no es en absoluto suficiente para la aparición de la vida. En Marte quizás pueda existir agua subterránea en estado líquido, y está presente el elemento del oxígeno, el carbono, etc, pero no hay vida.

Para que la vida aparezca, es preciso mucho más.

Origen y evolución de la vida

Vivimos en un planeta con vida, eso es un hecho. Analizamos brevemente, en este apartado, todos los procesos y sucesos que han tenido que ocurrir en La Tierra a lo largo de la historia biológica y geológica para llegar a la situación actual.

A lo largo de todo el proceso hubo una serie de pasos clave, o de saltos disruptivos. Los más importantes, empezando desde el principio, serían:

- La aparición de la materia a partir de la nada ¿por qué existe algo cuando lo lógico sería que no existiera nada?

- La aparición de la vida a partir de la materia inerte. Este es un salto absolutamente disruptivo que analizaremos con algo más de detalle en este apartado
- La aparición de los primeros seres conscientes. Es evidente que aquí se produce, de nuevo, un gigantesco salto que habrá que estudiar brevemente

La importancia de esos saltos disruptivos es enorme a nivel filosófico, puesto que, si consideramos que solo se trata de pasos cuantitativos y continuistas podríamos decir, como dijo Diderot, que *“Todo animal es más o menos hombre, todo mineral es más o menos planta, toda planta es más o menos animal”*. No habría mucha diferencia entre unas cosas y otras, en realidad.

El primero de esos grandes pasos disruptivos, el de la aparición de la materia, lo hemos analizado en el tema anterior del Big Bang. Nos detendremos ahora en analizar el segundo punto, el que se refiere al origen del primer ser vivo¹⁹.

Este primer ser vivo tuvo que ser, según los científicos, la célula más simple que es capaz de funcionar, de alimentarse, de reproducirse, etc. En definitiva, la célula más simple viable. Esta célula es llamada por los científicos LUCA (Last Universal Common Ancestor) porque absolutamente todos los seres vivos que habitan y habitaron este planeta **descienden de ese primer ser vivo**.

Estamos hablando, por tanto, del paso de lo inerte a lo vivo. Lo interesante del análisis de este increíble proceso es que se puede estudiar a partir de las leyes físicas y químicas, excluyendo la ciencia biológica (que es menos exacta), puesto que, a lo largo del proceso de la formación de LUCA, no había nada vivo, todo era inerte, todo era pura física y química.

¿Qué tuvo que contener la primera célula para ser viable? Todos los científicos están de acuerdo en que, evidentemente, tuvieron que formarse previamente, de alguna manera, las increíbles moléculas de ARN, ADN y centenares de distintos tipos de proteínas.

Como todos hemos oído muchas veces, esto debió producirse en una especie de “sopa primigenia” donde hubiera muchos minerales disueltos, unas temperaturas determinadas, y quizás unas descargas eléctricas provocadas por los rayos y ¡voilà! O quizás en las chimeneas termales del fondo de los océanos.

¹⁹ Seguiremos para ello los análisis realizados por Michel-Yves Bolloré y Olivier Bonnassies en su libro publicado en 2023

Siguiendo esta teoría, durante los veinte años posteriores a la segunda guerra mundial, los científicos se dedican en sus laboratorios a intentar imitar esos procesos naturales que debieron dar lugar a LUCA. Para empezar con el paso más sencillo, trataron de que se formara, al menos, una proteína. Lo que en realidad logró S. Miller en 1953 fue la aparición de 13 aminoácidos (de los 22 estables que son necesarios para la vida), que forman las cadenas de millares de elementos que constituyen una proteína. Cada aminoácido es como una “letra” y con esas letras se construyen frases. Ya teníamos algunas letras, ahora había que escribir el Quijote.

“Existen más de 80.000 proteínas diferentes y cada una de ellas se basa en una combinación distinta y específica de los 22 aminoácidos evocados”²⁰.

Por tanto, para la formación de LUCA (la primera célula viable) era necesaria la existencia previa de, al menos, 180 tipos de proteínas diferentes. Las proteínas son las que se encargan absolutamente de todo en la célula. Las funciones estructurales, defensivas, catalizadoras, reguladoras, transportadoras, receptoras, motoras, etc. son realizadas por los distintos tipos de proteínas.

Los científicos no tardaron en darse cuenta de la dificultad del problema. Y es que, para la formación de esas proteínas es necesaria la existencia previa del ARN y del ADN que son quienes contienen la información para fabricarlas²¹. Todas las proteínas que existen en la tierra son fabricadas de este modo, y no existe ninguna otra forma.

Si consideramos que las proteínas se crearon de manera independiente, por azar, a partir de una “sopa prebiótica”, podemos calcular por las leyes de la física, la química y la estadística las probabilidades de dicha formación, puesto que se trata de moléculas inertes que tienen que obedecer estrictamente las leyes universales. Para la formación de una única proteína estamos hablando de mil aminoácidos de 22 tipos distintos dispuestos en una cadena en un orden especialísimo. La probabilidad de que algo así se forme por azar es de 1 sobre 10^{1500} , esto para una sola proteína.

*“Se necesitaría **mucho más que la duración del universo** para que una única proteína pueda constituirse gracias al azar”²².*

²⁰ Michel-Yves Bolloré y Olivier Bonnassies. 2021

²¹ Por medio del ribosoma

²² Michel-Yves Bolloré Olivier Bonnassies (2021)

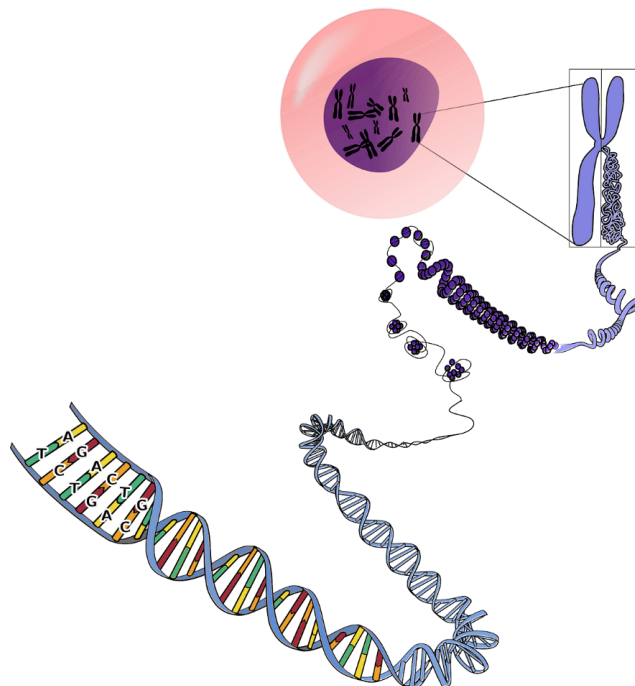
Pero la primera célula viable necesita, no solo un tipo de proteína, sino al menos, doscientos tipos de proteínas.

“Consideremos todas las proteínas (de longitud comparable a las que intervienen en la vida) compuestas de 200 aminoácidos. La cantidad de dichas proteínas es de 10^{320} . Aunque las 10^{80} partículas que constituyen el universo se dedicaran solo a fabricar esas proteínas de 200 aminoácidos, con un tiempo igual al tiempo de Planck (con nuevas operaciones cada 10^{-43} segundos), se necesitaría 10^{39} veces la duración de la existencia del universo para fabricar, solo una vez, todas esas proteínas” (Stuart Kauffman. Especialista en biofísica y sistemas complejos. Universidad de Bermont).

“La vida comienza solo con la primera célula funcional que puede exigir, aun siendo las más primitiva, al menos varios centenares de macromoléculas específicas diferentes ¿Cómo pudieron ensamblarse semejantes estructuras, de por sí, ya muy complejas? Sigue siendo para mí un misterio” (Werner Arber. Microbiólogo. Premio Nobel 1978).

Pero no solo se necesitan proteínas. Es imprescindible también el ADN, el ARN, el ribosoma, y mucho más.

La célula más simple viable (LUCA) necesitaría, para existir, un genoma ADN de, al menos, 250 genes. El ADN hay que imaginarlo como una escalera de caracol, y cada peldaño está formado por un par de nucleótidos que pueden ser Timina-Adenina, o bien Citosina-Guanina.



El ADN de LUCA debería contener, al menos, 150.000 escalones colocados con un orden increíblemente preciso.

Pero adicionalmente es necesario un sistema de ARN que sea capaz de replicar esa información. Digamos que, en una célula, el ADN es como la “Biblia original” que tenemos guardada en una biblioteca de alta seguridad, y el ARN es un amanuense que copia determinadas frases de esa biblia. ¿Y qué hace con eso la célula?

No podría hacer nada. Necesita el ribosoma, que es “el monje” que es capaz de leer el idioma que está escrito en el ARN. Pero no solo eso, el ribosoma no solo lee y “entiende”, sobre todo fabrica los distintos tipos de proteínas según se indica en las instrucciones del ADN-ARN.

Pero el problema es que, este ribosoma está constituido en sí mismo por proteínas. Y nadie sabe construir proteínas sino es a partir de un ribosoma.

“Nadie logró nunca construir un ribosoma que funcionase correctamente sin utilizar proteínas (¡sintetizadas, a su vez, gracias a un ribosoma!)” George Church. Experto en genética. Harvard y MIT.

Pero el problema fundamental es que, tanto el ADN, como el ARN, como los propios ribosomas, no subsisten fuera de la célula, inmediatamente se degradan. Es decir, que todo lo que es necesario para la formación de la primera célula viable tuvo que existir antes de la aparición de esa célula, pero nada de eso puede existir fuera de la célula.

Por otra parte, el ADN no solo contiene la información necesaria y precisa para que todos los distintos elementos de la célula sepan qué tienen que fabricar y qué tienen que hacer, ¡contiene también todo el mapa necesario para replicar y volver a construir una nueva célula!

El ADN ha resultado ser la herramienta más eficiente y poderosa jamás aparecida para contener información precisa, que se conoce en el universo. Como mencionan Michel Yves-Bolloré y Olivier Bonassies en su magnífico libro, con esta tecnología del ADN cabrían todos los libros de la historia de la humanidad escritos en una pequeña cucharita de té.

El premio nobel de Fisiología de 1974 (Christian de Duve) considera que las posibilidades de la aparición del ADN por puro azar son *“improbabilidades tan inconmensurablemente elevadas que solo se pueden llamar milagros”*.

“La probabilidad de formación de una molécula de ADN como resultado de reacciones químicas naturales en la superficie de 10^{20} planetas hospitalarios durante un periodo de 4.000 millones de años, es de 1 sobre 10^{45} ”²³.

“Actualmente, la distancia entre la “sopa” primitiva y el primer sistema ARN capaz de selección natural parece de una amplitud excluyente”, “Un hombre honesto armado de todo el saber que está hoy a nuestro alcance debería afirmar que el origen de la vida parece ser una especie de milagro, pues tantas son las condiciones que hay que reunir para ponerla en pie” (Sir Francis Crick, Premio Nobel de Medicina en 1962).

“Cuando se mira el ARN en tanto que químico, uno se queda simplemente admirado ante semejante molécula tan maravillosa, así como ante su magnífica complejidad, y uno se pregunta: ¿cómo es posible que haya aparecido esta estructura?” (Antony Flew, uno de los filósofos más influyentes del siglo XX).

Como consecuencia de todo esto, no existen ya programas de investigación científica que estén tratando de emular el nacimiento de la vida en esa “sopa prebiótica”, se ha perdido el interés en lograr algo que se considera imposible.

“Para muchos científicos el hecho de que el origen de la vida sea de una complejidad asombrosa prueba que no pudo aparecer por etapas, sino que, por el contrario, salió enteramente constituida de la nada” (Philippe Labrot. CNRS Orleans. Francia)

“Este universo, totalmente movido por el azar, logró proezas tales como la síntesis de una molécula de ARN auto duplicable. Es posible calcular la probabilidad de dicha síntesis bajo la única presión del azar. Por consiguiente, también es posible calcular el tiempo necesario para un universo aleatorio en lograrlo. Dicho tiempo es de varios millones de millones de veces la edad de nuestro universo actual. (...) La hipótesis del puro azar se ve refutada por su propio lenguaje: el del cálculo de probabilidades” (Marc Halévy).

“El problema del origen de la vida (...) constituye un enorme desafío. (...) Las posibilidades de que este improbable fenómeno pueda haberse producido varias veces son extremadamente débiles, sea cual sea el número de millones de planetas en el universo” (Ernst Mayr. Harvard).

²³ Michel-Yves Bolloré Olivier Bonnassies (2021)

Este primer gran paso del origen de la vida se ha producido **una única vez en toda la historia de La Tierra**. Pero, a partir de esta milagrosa célula inicial, fueron apareciendo otros saltos clave, cada uno de ellos igual de improbables. Vamos a analizar algunos de ellos.

Lo importante a tener en cuenta aquí es que, al igual que ocurre con la aparición de la vida, cada uno de estos pasos clave que vamos a ver ahora en la evolución biológica, **solo se ha dado una única vez en toda la historia biológica del planeta**. Por ejemplo, la aparición de las mitocondrias en las células solo ha ocurrido **una única vez en 4.000 millones de años**. A pesar de todo el tiempo transcurrido, y de la cantidad de ramas evolutivas de millones de millones de millones de células, solo una única vez aparecieron las mitocondrias en el interior de una primera y única célula afortunada. Todas las demás células con mitocondrias del planeta descienden de esa primera y original célula con mitocondrias. Esto nos proporciona evidencias de lo improbables que son este tipo de “evoluciones clave naturales”. Si fueran más probables habrían aparecido muchas veces a lo largo de toda la historia biológica, o al menos más de una vez, en distintas ramas de la evolución a lo largo de los últimos 4.000 millones de años.

Veamos todos esos pasos clave y únicos que se dieron una única vez:

- 1. Hace 4.000 millones de años. El desarrollo de las primeras cadenas auto replicantes de ADN, la aparición de más de doscientos tipos de proteínas, del ARN, del misterioso ribosoma, y de otros muchos componentes necesarios, así como la formación de una imprescindible membrana que protegía todo, dio lugar a la aparición de la primera célula procariota viable (célula sin núcleo). Esta **primera célula** es el **antepasado de cualquier forma de vida en la tierra**. A partir de aquí comienzan a multiplicarse, y se extiende esta forma de vida (básicamente **bacterias**), que fue la única existente durante los siguientes 2.000 millones de años. Este primer paso es, sin duda, el más misterioso de todos. Durante 400 millones de años estas células se alimentaban directamente de moléculas disueltas en el agua y así conseguían su energía de una manera muy ineficiente.
- 2. Hace 3.600 millones de años las células procariotas aprendieron a realizar la **fotosíntesis**, captando el carbono del CO₂ disuelto en el agua con la ayuda de la energía del sol, y expulsando el oxígeno como subproducto. Y mientras tanto, el oxígeno, un elemento tóxico y altamente oxidante y reactivo, se fue acumulando en los océanos y en la atmósfera produciendo una gran crisis biológica.
- 3. Para mejorar el proceso de obtención de energía, las bacterias aprendieron a **fermentar la glucosa**. En este momento lograban el proceso de manera anaeróbica (sin oxígeno), y era un proceso muy ineficiente.

A lo largo de estos millones de años las cianobacterias seguían produciendo cantidades ingentes de oxígeno a partir del CO_2 . Cuando el creciente nivel de concentración de oxígeno amenazaba con destruir la vida para siempre, algo extraordinario ocurrió.

- 4. El almacenamiento progresivo de oxígeno disuelto en el agua se utilizó de repente como ventaja. Nadie sabe cómo, aparece la **respiración aeróbica**. Esto se ha dado también **una única vez en toda la historia biológica** y fue absolutamente clave para la formación de vida compleja, porque solo la vida basada en oxígeno es capaz de generar energía suficiente para el metabolismo y, además, previamente el oxígeno debe ser un elemento suficientemente abundante en el cosmos. Todos los seres con respiración aeróbica descienden de esta primera y extraña célula procariota. Las algas, en su totalidad, tienen respiración aeróbica. Con la respiración aeróbica, la fermentación de la glucosa es muchísimo más productiva porque los seis átomos de carbono de este azúcar se convierten en dióxido de carbono y agua, generando una gran cantidad de energía en un proceso muy eficiente.
- 5. Hace 2.000 millones de años aparecen las **primeras células eucariotas**, es decir, con núcleo. Esto solo ocurrió una sola vez en toda la historia biológica y no se entiende bien cómo pudo ocurrir. Todas las plantas, animales, hongos, algas y las eucariotas unicelulares que existen hoy descienden de una única célula eucariota que apareció hace 2.000 millones de años.
- 6. En el interior de estas células eucariotas, ya más complejas, aparecen unos órganos fundamentales, **las mitocondrias**. Estos órganos de las células son capaces para sintetizar, o producir, las moléculas de ATP, que serán los principales almacenes de energía para cualquier forma de vida compleja. Este invento fue fundamental para poder permitir el desarrollo posterior de seres pluricelulares. De hecho, se puede comprobar que las células procariotas jamás evolucionaron a metazoos, seres pluricelulares, por carecer de mitocondrias.
- 7. Hace 1.700 millones de años aparecen los primeros **seres pluricelulares**. Nótese que la tierra apareció hace 4.500 millones de años. Solo 500 millones de años después aparecen las primeras células. Pero la aparición de los seres pluricelulares se demoró 2.300 millones de años más. A través de un proceso hoy desconocido, un grupo de células, en un determinado lugar, en un único momento concreto, se agrupó por primera vez formando un ser pluricelular.

Todos los seres pluricelulares, formados de más de una célula, descienden de esta original y primera agrupación afortunada de células que ocurrió hace 1.700 millones de años. Que llamemos “un ser” a un perro, que en realidad es un conjunto inmenso de células distintas es algo realmente notorio.

- 8. Los seres pluricelulares comienzan a evolucionar, y con el tiempo, aparece un ser vivo que utiliza un grupo de células fotosensibles conectadas con otras células motoras, y se fabrica así **el primer ojo** de la historia biológica. Todos los demás tipos de ojos que se han formado a lo largo de toda la historia biológica descienden de este primer ojo precursor. Se irán formando posteriormente otros órganos como las branquias, los distintos sistemas circulatorios, respiratorios, etc.
- 9. Hace 540 millones de años se produce la explosión cámbrica. Aparecen inventos que serán clave para la formación de animales superiores. Primero los **exoesqueletos**, de enorme éxito en los trilobites. Luego surgen los primeros **endoesqueletos**, luego los primeros seres **cordados y vertebrados**, que permitirían el desarrollo de un sistema nervioso complejo. Todos estos inventos han aparecido solo una vez en todo el registro biológico. Los artrópodos son los reyes en esta era. Los trilobites campan a sus anchas, con sus grandes pares de ojos. Ya empieza a ser común tener dos ojos, en la parte frontal del cuerpo, así será en adelante con la inmensa mayor parte de los animales, como nosotros. Todos los seres con dos ojos (moscas, tigres, dinosaurios, etc) descienden de ese primer ser que se benefició de tener dos ojos en su parte frontal.

Estos pasos gigantes de la historia biológica se dieron solo una vez, y por tanto son increíblemente improbables. Pero todos y cada uno de ellos ha sido clave para que puedan aparecer seres vivos superiores. Pero aún queda por explicar el paso más increíble, extraño e improbable, la existencia de seres conscientes de sí mismos. Esto lo trataremos en el siguiente apartado. Pero antes, sigamos analizando todas las circunstancias casuales que se dieron para llegar a nuestra existencia.

Hace 485 millones de años se produce la gran extinción cámbrica ¿Qué ocurrió? El 85% de las especies se extinguieron. Ocurriera lo que ocurriera, podemos casi asegurar que fue esencial para que nuevas formas de vida aparecieran, ya orientadas hacia seres que serán capaces de salir del agua. De hecho, justo en este momento, justo cuando acaba el cámbrico, aparecen las primeras plantas terrestres, que serán fundamentales para permitir el desarrollo de animales terrestres.

De hecho, la enorme proliferación de plantas terrestres, sin nadie que las pudiera atacar ni consumir, produjo otra nueva crisis planetaria, reduciendo la cantidad de CO₂ atmosférico y produciendo un rápido enfriamiento que provocó, de nuevo, hace 370 millones de años, la extinción de un 75% de las especies existentes (la extinción devónica).

Esta nueva extinción ofrece una nueva oportunidad a nuevos nichos ecológicos, y hace 350 millones de años aparecen los primeros anfibios ¡por fin salimos del agua! Todos los animales de **cuatro patas** que conocemos, incluidas las aves, descienden de este primer anfibio que “anduvo” por primera vez por la tierra. A partir de una vejiga gaseosa que utilizan algunos peces para controlar su flotabilidad, se desarrolla el primer primitivo pulmón, capaz de captar el oxígeno directamente del aire, y no del oxígeno disuelto en el agua, como hasta ahora. Nunca se ha vuelto a producir una evolución de un pez a un anfibio, salvo en aquel momento.

Hace 250 millones de años, la formación de la gran cordillera de los Urales y otras regiones del *trap* siberiano provocó una actividad volcánica tan descomunal que el aumento de CO₂ produjo la mayor extinción de la historia geológica (la extinción pérmica-jurásica).

Esta extinción fue aprovechada por el que será el rey, el dinosaurio, que como todos sabemos, desaparecerá con la gran extinción cretácica-terciaria hace 65 millones de años, muy probablemente debida a un enorme meteorito que cayó en la costa Este de México.

Esta última gran extinción dejó el paso libre a los mamíferos, que se convierten ahora en los reyes de la tierra firme. Y de aquí nacerá el hombre.

Dejando a un lado las extinciones mencionadas (por supuesto todas ellas absolutamente necesarias para nuestra existencia), y centrándonos solo en los 9 pasos clave mencionados como fundamentales a lo largo de la evolución, podemos hacernos una idea de lo improbable que es que una forma de vida compleja pueda llegar a darse en algún planeta.

Téngase en cuenta que, a lo largo de los 4.000 millones de años de historia biológica, cada uno de estos pasos clave se han dado solo una vez.

Quiero decir que, por ejemplo, los elementos del carbono, el hidrógeno, sustancias como el agua, etc han existido a lo largo de 4.500 millones de años, pero solo una vez se produjo espontáneamente la vida. Nunca ha vuelto a ocurrir. Todos descendemos de esa primera célula auto replicante. Las células procariotas llevan existiendo 4.000 millones de años, pero solo una vez en toda la historia ha aparecido una célula eucariota a partir de células procariotas, y todos descendemos de esa primera célula eucariota.

Y a pesar de que aún hoy sigue habiendo casi infinitos seres unicelulares en el agua, el aire y la tierra, solo una vez en toda la historia biológica se produjo la asociación de células unicelulares para formar un único ser pluricelular. Y de ese primer ser pluricelular descendemos todos. Y así con cada paso. Esto nos da una idea de lo improbable que es que todos estos pasos se den, de manera ordenada, en un único planeta, en el momento preciso, en tan poco tiempo.

“Debe existir algo así como un atractor que canaliza las trayectorias evolucionistas hacia modos de funcionalidades estables” (Simon Conway Morris, Cambridge).

“¡Resulta sumamente sorprendente, sin embargo, que las mutaciones ventajosas surjan justamente en el preciso instante en que hacen falta!”(...) En todo caso, el azar hace demasiado bien las cosas como para ser creíble”. (Yves Coppens. Paleontólogo y antropólogo).

Téngase en cuenta además que el tiempo que tiene un planeta para que evolucione la vida no es infinito. Es el que la estrella (amarilla o naranja) le permite. Bastante menos de 10.000 millones de años, porque en sus etapas finales la estrella ya no será habitable.

Tengamos además en cuenta que no cualquier forma de vida es posible. No vale cualquier tamaño. No todo lo que imaginamos o vemos en las películas tiene viabilidad física. Ojo con esas películas que nos muestran animales descomunales.

El tamaño de los animales que conocemos no es casual. Es en realidad el único viable. Una hormiga del tamaño de un elefante no sería posible que existiera, dado que el peso aumenta en proporción al volumen (longitud elevado al cubo), pero la resistencia de las patas aumenta en proporción al tamaño al cuadrado (sección de la pata). Por tanto, una hormiga del tamaño de un elefante quebraría sus patas irremediablemente. Para que fuera viable tendría un aspecto más similar a un inmenso cocodrilo (con patas anchas).

Lo mismo ocurre con la temperatura corporal y la capacidad del animal para expulsar el calor que su cuerpo genera. Un animal muy grande es capaz de vivir en climas muy fríos porque produce mucho calor en el interior de su cuerpo (proporcional al tamaño al cubo), pero desprende calor a lo largo de su superficie (proporcional al tamaño al cuadrado). Por eso los animales del polo Norte se hacen muy grandes (mamuts lanudos por ejemplo). El elefante está justo en el límite de tamaño posible para vivir en climas tan cálidos. Es por este motivo que el elefante, según va ganando en estatura, va arrugando la piel con “grietas”, de manera que aumenta enormemente la superficie corporal para poder desprender el calor (como nuestros radiadores de casa). Cuando es joven su piel es lisa porque no tiene problema con el tamaño y la expulsión de calor.

Con estos dos ejemplos intentamos transmitir que no podemos imaginar “a lo loco” cualquier forma de vida, cualquier tamaño, etc. Los animales tienen el tamaño que tienen porque solo es viable en esos rangos de tamaños.

Otro problema con el tamaño se encuentra en la necesidad de llevar la sangre a todo el cuerpo. Cuanta mayor es la pérdida de calor corporal, mayor debe ser el ritmo de respiración (quemamos el carbono de los alimentos para mantener la temperatura corporal) y mayor debe ser el ritmo cardiaco para distribuir la sangre caliente por el cuerpo. Por tanto, los animales más pequeños, que ya hemos visto que son los que más rápidamente pierden el calor corporal, deben tener una respiración y un ritmo cardiaco muy rápido. El ritmo cardiaco del elefante es de 30 latidos por minuto, el del ratón es de 400 latidos por minuto. Estas circunstancias imponen unos límites de inviabilidad a los tamaños de los animales de sangre caliente, tanto por arriba como por abajo. Es por este motivo que no existen ratones en climas árticos.

Este problema no lo tienen los animales de sangre fría, como las tortugas, que viven pegadas a la tierra para mantener su calor corporal. Por eso su ritmo cardiaco puede ser muy lento (20 latidos por minuto).

Curiosamente, el número de latidos que tiene una especie animal a lo largo de toda su vida tiende a ser constante. Los ratones viven uno o dos años porque su corazón va demasiado rápido. Los elefantes viven unos 70 años porque su corazón va muy lento. Las tortugas viven más de 100. Como vemos, la propia termodinámica impone también límites a la cantidad de tiempo que es viable que vivan los animales.

Vemos que la física impone muchos límites a nuestra imaginación, a la hora de poder soñar con mundos habitados de muy diversos tipos.

Una vez que hemos analizado las dificultades que se dan para lograr la existencia de vida en un planeta, analicemos las probabilidades de que aparezca vida **inteligente**.

Condiciones necesarias para la formación de vida consciente e inteligente

Sin duda, el mayor misterio de todos los analizados por la ciencia es el propio hombre. Estamos hablando de un cambio radical, puesto que, de repente, el material de las estrellas se configura de una forma tan extraordinaria que **se hace consciente de sí mismo**.

Dejando a un lado el misterio que supone semejante salto disruptivo, analicemos hasta qué punto es improbable que la vida evolucione en un ser inteligente consciente de sí mismo.

Tenemos delante de nosotros toda la historia evolutiva y nos puede servir como orientación. Han pasado por la tierra millones de especies, pero solo una evolucionó en ser consciente.

“Ninguna de los miles de líneas evolutivas de las células procariotas se acercó lo más mínimo a la vida inteligente. Hay cuatro reinos entre las eucariotas, cada uno de ellos con decenas de miles de líneas evolutivas distintas. En tres de estos reinos, protozoos, hongos y plantas, no hay restos de que haya evolucionado inteligencia de ningún tipo. Esto nos lleva al reino de los animales, a los cuales pertenecemos. Este reino se compone de 25 troncos principales de evolución (phyla), de hecho, son 30 si consideramos algunos ya extintos. De nuevo, solo uno de ellos evolucionó hacia una inteligencia real, los cordados. Hay numerosas clases de cordados, diría que más de 50 de ellos, pero solo uno de ellos, los mamíferos, evolucionaron hacia una inteligencia real. Los mamíferos consisten en 20 órdenes, pero solo uno de ellos, los primates, adquirieron inteligencia, y entre ellos, de más de 100 especies de primates, solo una. El hombre tiene el tipo de inteligencia que podría permitir la evolución de tecnología avanzada... la evolución de la inteligencia no es probable.” (Ernst Mayr).

Esta cita de Ernst Mayr me parece clarificadora, y muy inteligente. El análisis de las innumerables ramitas del gigantesco árbol evolutivo de la vida en la tierra nos da una idea de lo improbable que es que una rama del complejo árbol de la evolución acabe dando lugar a vida inteligente. Ha habido millones de ramitas distintas (especies y caminos de evolución distintos) a lo largo de 4.000 millones de años, y solo uno **y una única vez** dio lugar a vida inteligente consciente de sí misma. Esto nos da una idea de lo improbable que es.

Hace solo 100.000 años, un grupo de homínidos (Homo Sapiens), en un lugar aislado del planeta²⁴, sufre una evolución genética que les permite tomar **conciencia de sí mismos**. De repente, comenzaron a tomar conciencia de la muerte y comenzaron a enterrar a sus muertos. Tomaron conciencia de su propio cuerpo y su propia existencia individual, y comenzaron a adornarse.

Todos los seres humanos actuales descienden de ese primer pequeño grupo de seres humanos que existieron hace 100.000 años.

En ningún otro momento de la historia del planeta un ser pluricelular ha tomado consciencia de sí mismo de manera espontánea.

²⁴ La mayoría de los científicos apuestan actualmente por el Sur de África, pero los hallazgos más antiguos se han encontrado en Israel, en concreto, en Nazaret.

El enterramiento humano **más antiguo jamás encontrado** ha sido localizado en Nazaret, en Qafzeh, justo debajo del Monte del Precipicio donde el evangelio dice que querían despeñar a Jesús. Se ha datado en 100.000 años de antigüedad. Es además un enterramiento doble, de una mujer de unos 20 años y un niño de unos 6 años. El enterramiento doble da una idea de un nuevo tipo de relación entre estos seres, un vínculo mucho más intenso del que se da en los animales. Junto a ellos se encontraron conchas perforadas que utilizaban para adornarse (collares, pulseras, etc).

Hay que esperar 60.000 años hasta encontrar un nuevo enterramiento doble, razón por la que este enterramiento es tan espectacular. El cráneo Qafzeh 9 es el primer cráneo encontrado con rasgos de Homo Sapiens moderno, la Eva de Nazaret.



Qafzeh 9 y Qafzeh 10. Monte del Precipicio. Nazaret. Un enterramiento múltiple sorprendente. Los primeros cráneos con anatomía de Homo Sapiens moderno. Los enterramientos más antiguos jamás encontrados. Los primeros adornos encontrados. 100.000 años de antigüedad.

La consciencia sigue siendo un auténtico misterio para la ciencia. Profundizaremos mucho en este misterio en el cuarto capítulo de este curso, puesto que, increíblemente, está relacionado con la mecánica cuántica.

Acabaremos el análisis de la formación de la vida estudiando cómo debe ser el planeta para poder hacerla viable. Veremos que no es nada fácil.

Condiciones de un planeta para poder albergar vida

Hemos visto ya lo improbable que es que se pueda formar la vida en un planeta, y ya no digamos, vida inteligente.

Pero si resultara que existieran casi infinitos planetas **viables para la vida**, quizás tengamos alguna oportunidad de que algo así pudiera haberse repetido en algún lugar del universo.

Veamos brevemente las características extraordinarias que debe cumplir un planeta para poder llegar a dar la oportunidad de que aparezca la vida.

Como hemos comentado ya muchas veces, es preciso que primero hubiera existido una supergigante roja que hubiera explotado en una supernova y hubiera contaminado sus alrededores con los elementos pesados que se han formado en el interior de ese horno nuclear (carbono, oxígeno, hierro, fósforo, calcio, etc).

A continuación, habría sido necesario que se forme una estrella amarilla o naranja, que son las que permiten albergar vida a su alrededor, y son suficientemente estables para durar unos 10.000 millones de años.

En órbita de esta estrella debería formarse un planeta rocoso de un tamaño que no puede ser muy pequeño, pero tampoco muy grande. Un planeta muy pequeño no tendría masa suficiente para retener la atmósfera y todo su agua y sus gases atmosféricos se evaporarían y saldrían despedidos hacia el espacio al calentarse con su estrella. Por ejemplo, la luna no contiene atmósfera por este motivo.

Un planeta un poco más grande que la Tierra tendría una atmósfera demasiado pesada pero, sobre todo, la presión hidrostática en el interior del mar sería enorme y podría convertir el agua del interior de los océanos en hielo. Téngase en cuenta que si el planeta Tierra tuviera un radio solo un 10% mayor (si fuera de 6.900 km en lugar de 6.300 km) la gravedad sería un 33% superior a la actual (aumenta con el cubo de su radio). Si el radio fuera el doble, la gravedad sería **8 veces mayor** y los animales terrestres complejos serían inviables, ya que quedarían aplastados contra el suelo. Para mí sería difícil andar pesando bastante más de 600 kilos. Por supuesto no podemos pensar que solo podrían existir los elefantes (que aguantan hoy sin problema 6.000 kilos de peso corporal en la tierra), porque el elefante pesaría en ese planeta 48.000 kilos.

Un planeta rocoso con un radio más de tres veces el de la Tierra deja de ser rocoso, debido a que su gravedad es tan fuerte que atrae y retiene gran cantidad de gases, convirtiéndose en un planeta gaseoso (como Júpiter, Saturno, etc).

Pero, sobre todo, la característica más importante que debe cumplir el planeta es su distancia a la estrella, así como una órbita muy cercana a la circunferencia. Aquí la sensibilidad es enorme. Un poquito más cerca o un poquito más lejos y haría inviable la existencia de agua líquida en su corteza.

A continuación, citamos, a modo de breve relación, algunas de las características que debe cumplir un planeta habitable:

- Debe tener un **núcleo de hierro y níquel** que genere un campo electromagnético que pueda desviar la radiación de alta energía del viento *solar* de su estrella. Marte, por ejemplo, no tiene campo magnético. Venus tampoco tiene un núcleo capaz de generar su propio campo magnético. El de Mercurio es tan débil que no protege en absoluto. Sin este escudo la radiación de alta energía del sol atacaría a cualquier forma de vida.
- Alrededor de este planeta debe orbitar un **satélite gigantesco**, como la luna, capaz de estabilizar el eje de giro del planeta, de manera que el clima sea así estable. En efecto, el eje de giro de la Tierra permanece inclinado $23,5^\circ$ de manera estable gracias a la interacción gravitatoria de la luna. En el caso de Marte, por ejemplo, la inclinación de su eje de giro cambia de manera inestable y produce unos cambios climáticos rapidísimos que no permitirían en ningún caso la evolución de la vida.
- Es fundamental que existan **planetas gigantes gaseosos en las órbitas exteriores** que sean capaces de desviar la inmensa mayor parte de las agresiones extra-planetarias (meteoritos, cometas, etc). Es sabido que especialmente Júpiter nos protege, y nos ha protegido de grandes cataclismos en el pasado.
- **La masa del planeta** debe ser de un tamaño similar al de la Tierra. Ya hemos visto como un incremento pequeño en el radio del planeta produce un incremento enorme en la fuerza gravitatoria. Y una disminución puede producir la desaparición de su atmósfera.
- **La atmósfera** del planeta no es posible que conste de oxígeno desde un primer momento, puesto que no es estable, además de ser altamente reactivo y corrosivo. La formación del oxígeno debe producirse primero por una actividad biológica previa por seres vegetales capaces de realizar la fotosíntesis. Y ya hemos visto que el oxígeno es fundamental para poder contar con animales suficientemente complejos. Y también el oxígeno debe generar ozono para evitar la entrada de los rayos ultravioletas. Ya vimos en los cursos anteriores cómo de inestable es el clima global del planeta a largo plazo, dependiendo del tipo de gases que forma la atmósfera del planeta.

Que la Tierra no sea un infierno de dióxido de carbono, como es Venus, o una gran bola de nieve, puede considerarse casi como un milagro.

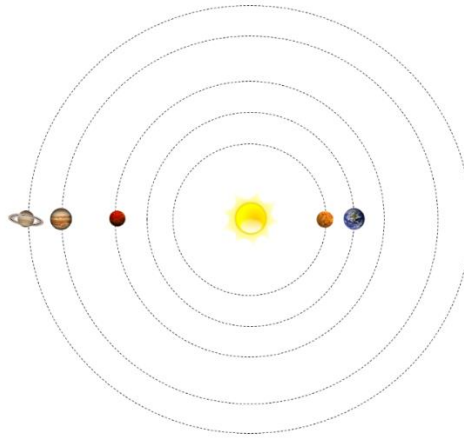
- El planeta deber estar ocupado, al menos en sus 2/3 partes, por **océanos** de agua líquida, con una profundidad suficiente, para que esas enormes masas de agua actúen como elementos termo-reguladores, y hagan estable el clima planetario.
- Por supuesto **la distancia del planeta a su estrella** es especialmente sensible. Ya vimos en el primer curso como cambios casi imperceptibles en la órbita terrestre habían producido las increíbles glaciaciones e Inter glaciaciones de los últimos dos millones de años. Es decir, el planeta debe orbitar justo y exactamente a la distancia adecuada.
- La estrella del planeta debe estar suficientemente **alejada del centro de su galaxia** para evitar el efecto de las nocivas supernovas.

Pero nos quedamos cortísimos con todo esto. Hay otros muchísimos requerimientos. Por ejemplo, podemos recordar aquí algunas cosas que comentamos en el curso pasado en relación con la función que realizan el resto de los planetas del sistema solar para lograr la estabilidad de la órbita terrestre y como se influyen unos a otros.

Como ya vimos en el curso anterior y repasamos rápidamente ahora, en el sistema solar se produce una interacción gravitatoria entre los distintos planetas. Y por supuesto también entre los satélites y sus planetas, y como consecuencia, las órbitas de todos ellos tienden a modificarse. Por ejemplo, los planetas exteriores como Marte o Júpiter nos empujan hacia el sol cuando se encuentran al otro lado del sol, pero cuando se encuentran en el lado opuesto nos intentan alejar del astro rey. Venus, al ser un planeta interior, siempre nos intenta acercar, pero lo hace con mucha más fuerza cuando pasa cerca nuestra, y con mucha menos fuerza cuando está al otro lado del sol. Como vimos en el curso pasado, si calculamos las máximas fuerzas que nos acercan hacia el sol obtenemos estos números:

MAYOR ACERCAMIENTO	Distancia al sol (m)	Distancia a la tierra (m)	Masa (Kg)	G (N/m ² ,Kg ²)	Fuerza de atracción (N)	
LA TIERRA			5,9736E+24			
SOL		1,49598E+11	1,9891E+30	6,674E-11	3,54346E+22	
FUERZA EXTRA:					FUERZA EXTRA:	
MERCURIO	57894376000	91703495000	3,302E+23	6,674E-11	1,56541E+16	
VENUS	1,08E+11	41597871000	4,869E+24	6,674E-11	1,12181E+18	
MARTE	2,2799E+11	3,77588E+11	6,39E+23	6,674E-11	1,78684E+15	
JUPITER	7,78518E+11	9,28116E+11	1,898E+27	6,674E-11	8,78443E+17	
SATURNO	1,42673E+12	1,57632E+12	5,683E+26	6,674E-11	9,11821E+16	
URANO	2,87E+12	3,0196E+12	8,686E+25	6,674E-11	3,7979E+15	
NEPTUNO	4,49825E+12	4,64785E+12	1,024E+26	6,674E-11	1,88981E+15	
TOTAL FUERZA EXTRA					2,09891E+18	0,0059233%

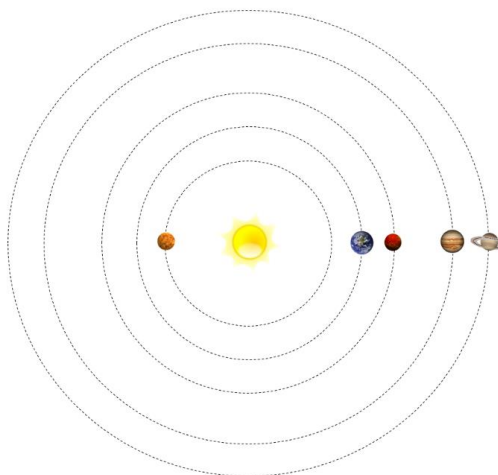
Es decir, imaginemos que un día se da esta curiosa disposición de los planetas, de manera que todos nos atraen hacia el sol



Disposición de los planetas acercándonos al sol

En este caso todos los planetas juntos aportan a la Tierra una fuerza de atracción extra hacia el sol del 0,0059%. Venus es responsable en un 53%, mientras que Júpiter lo es en un 41%

Ahora imaginemos que, en otro momento, tenemos esta otra curiosa disposición de los planetas, de manera que los planetas exteriores intentan alejarnos, y los interiores están muy lejos de nosotros como para influirnos con su empuje hacia el sol.



Disposición de los planetas alejándonos del sol

Si ahora calculamos las fuerzas que nos alejan obtenemos estos cálculos:

MAYOR ALEJAMIENTO	Distancia al sol (m)	Distancia a la tierra (m)	Masa (Kg)	G (N/m2,Kg2)	Fuerza de atracción (N)	
LA TIERRA			5,9736E+24			
SOL		1,49598E+11	1,9891E+30	6,674E-11	3,54346E+22	
FUERZA EXTRA:					FUERZA EXTRA:	
MERCURIO	57894376000	2,07492E+11	3,302E+23	6,674E-11	3,05771E+15	
VENUS	1,08E+11	2,57598E+11	4,869E+24	6,674E-11	2,92535E+16	
MARTE	2,2799E+11	78392529000	6,39E+23	6,674E-11	-4,14547E+16	
JUPITER	7,78518E+11	6,28921E+11	1,898E+27	6,674E-11	-1,91305E+18	
SATURNO	1,42673E+12	1,27713E+12	5,683E+26	6,674E-11	-1,38909E+17	
URANO	2,87E+12	2,7204E+12	8,686E+25	6,674E-11	-4,67925E+15	
NEPTUNO	4,49825E+12	4,34866E+12	1,024E+26	6,674E-11	-2,1588E+15	
TOTAL FUERZA EXTRA					-2,071E+18	-0,0058446%

Es decir, supone un 0,0058% de la fuerza de atracción que ejerce el sol. Vimos que el cálculo anterior nos salía de 0,0059%. No es una coincidencia. El hecho es que todos los planetas parecen estar colocados de manera estratégica para hacer estable cada órbita. No solo la colocación de cada planeta, sino también su masa concreta. Unos se influyen a otros e intentan mantenerse estables. Si quitamos Venus del sistema solar, por ejemplo, la órbita de la Tierra se desestabilizaría enseguida y como un efecto dominó, todos se desestabilizarían buscando, si hay suerte, nuevas posiciones de equilibrio. Pero sin duda la nueva posición de equilibrio que encontraría la Tierra **no sería compatible con la vida**.

En el sistema solar existen algunos fenómenos que son estabilizadores y otros que son desestabilizadores. Muchos de estos fenómenos están relacionados con el concepto de resonancia.

Cuando un padre da un pequeño empujón al columpio de su hija, dependiendo de cuándo exactamente da ese empujón, podrá estar impulsando el columpio cada vez más, o bien anulando cada vez más el movimiento. En el primer caso hablamos de una resonancia desestabilizadora. En el segundo caso es una resonancia estabilizadora.

Las interacciones entre los planetas de las que hemos hablado antes se dan, además, con resonancia. Es decir, no solo es la masa y el radio orbital de cada planeta lo que está estratégicamente colocado, también el compás de giro que lleva cada planeta está acompasado. Por supuesto la velocidad de giro de cada planeta depende de su distancia al sol, pero lo que es importante entender es que hay resonancia entre ellos, muchos giros van acompasados.

Estas son algunas de las interacciones y resonancias orbitales entre ellos:

	Tiempo transcurrido (días)	Ciclo del primero (días)	Ciclo del segundo (días)	Nº de Vueltas del primero	Nº de vueltas del segundo	Cuanto se pasa el segundo (fracción de vuelta)
Venus-Mercurio	2022,31	224,70	87,97	9	23	-0,0108
Tierra-Venus	2922,05	365,26	224,70	8	13	0,0042
Tierra-Venus	88757,21	365,26	224,70	243	395	0,0014
Marte-Venus	779,95	779,95	224,70	1	3	-0,0290
Marte-Tierra	779,95	779,95	365,26	1	2	0,1353
Júpiter-Tierra	4332,86	4332,86	365,26	1	12	-0,1375
Saturno-Júpiter	21519,41	10759,70	4332,86	2	5	-0,0334

Vemos que Venus y Mercurio han encontrado una resonancia orbital de 9:23 vueltas, esto quiere decir que cuando Venus da 9 vueltas, Mercurio da casi exactamente 23 vueltas (en realidad da 22,99). Por su parte, la Tierra y Venus están en una resonancia de 8:13. No es coincidencia que se produzcan estas resonancias. Los planetas varían sus órbitas hasta encontrar órbitas estables de interacción. Especialmente cuanto más cerca están, más interactúan entre ellos.

A pesar de todos estos ingeniosos mecanismos, la realidad es que, aunque pueda parecer que el Sistema Solar es estable, en realidad no lo es. La interacción entre los planetas es caótica e impredecible al pasar unos cuantos millones de años y no se puede conocer cuál será el movimiento de cada uno de ellos pasado este tiempo.

Como hemos comentado en otras ocasiones, Saturno y Júpiter han tenido una labor fundamental en el desvío o atracción de los cometas que entran en el sistema solar, protegiendo a La Tierra de sus nocivos impactos, que en el pasado han causado determinadas extinciones en masa.

En 1994 un cometa impactó contra la atmósfera de Júpiter. Los restos de la deflagración pudieron ser observados durante varios años en el gran planeta.



Impacto de un cometa en Júpiter, 2009

En resumen, sabemos que Mercurio y Venus ejercen de contrapeso al efecto de Marte y Júpiter sobre la Tierra, de manera que su órbita sea estable.

Todos los planetas del sistema son necesarios para nosotros. Cualquier modificación en la órbita de uno de ellos, o la desaparición de cualquiera de ellos, produciría un efecto en cadena que, sin duda, afectaría de manera radical a la órbita terrestre, haciendo inviable la vida en la Tierra.

Una vez analizado todo esto, nos planteamos ¿es posible la existencia de vida extraterrestre?

La paradoja de Fermi y la Ecuación de Drake. Buscando alienígenas ¿Dónde están todos?

En 1949 la Unión Soviética había hecho detonar la primera bomba de fisión. En un ambiente de gran tensión, las dos superpotencias seguían armándose hasta los dientes.

Fermi, uno de los científicos que había dirigido el laboratorio del Proyecto Manhattan durante la segunda guerra mundial, fue seleccionado por el gobierno de los Estados Unidos para continuar con la investigación y el desarrollo de armas de destrucción masiva, ahora basadas en hidrógeno (bomba de hidrógeno).

Es en este contexto cuando surgió la famosa *paradoja de Fermi*. En un momento en que los científicos americanos estaban paseando en un ambiente distendido, estuvieron hablando acerca de las grandes probabilidades de que existiera vida extraterrestre, dada la inmensa cantidad de estrellas que existen.

Terminado el paseo, durante la comida, cuando ya todos hablaban de otra cosa, Fermi vuelve de su ensimismamiento y pregunta “*pero entonces, ¿Dónde están todos?*”. Y todos rieron al darse cuenta de a quiénes se refería.

Dado el contexto en el que todo esto surgió, Fermi llegó a sugerir que la tecnología necesaria para masacrarse y autoextinguirse debía de alcanzarse antes que la necesaria para expandirse por la galaxia, de manera que esto es lo que debe de estar ocurriendo con todas las civilizaciones extraterrestres. Según Fermi, el hecho de que no hayamos sido visitados por seres de otros mundos no dice nada bueno sobre el futuro que le espera a la humanidad.

Sea como sea, se siguió considerando una paradoja el contraste entre la afirmación que hace la ciencia de que debería haber muchas civilizaciones extraterrestres y el hecho de que no hayamos encontrado ningún indicio de su existencia.

En fin, a partir de esta anécdota, la ciencia comienza a estudiar con seriedad las probabilidades estadísticas de la existencia de vida extraterrestre.

En 1961 el radioastrónomo Frank Drake, quién se convertiría en el presidente de SETI, se propuso diseñar una fórmula para calcular el número de civilizaciones inteligentes que podrían existir en nuestra galaxia Vía Láctea, que han desarrollado tecnología suficiente, y quieren comunicarse.

Para calcular esta cifra Drake tuvo que hacer suposiciones de qué % de los planetas que orbitan en la zona habitable de su estrella logran realmente desarrollar vida. Y de esos, cuántos logran desarrollar vida inteligente. Y de esos, cuántos logran desarrollar alta tecnología de radio. Por supuesto, no tenemos datos para calcular esas cifras porque solo conocemos el caso de un solo planeta que haya cumplido todo. Pero veréis que es muy interesante el número de civilizaciones que podemos esperar, aun considerando que esas probabilidades que hemos citado son del 100%.

Consideremos, por tanto, las probabilidades más locas y **optimistas** posibles. Vamos a imaginar que **el 100%** de los planetas que están en zona habitable, acaban albergando vida. Y **el 100%** de ellos acabarán desarrollando vida inteligente. Y **el 100%** de ellos acabarán desarrollando alta tecnología de radio. Si todo esto fuera así ¿cuántas civilizaciones en la Vía láctea estarían intentando comunicarse hoy con nosotros? ¿miles de millones? Que va...

Lo primero que uno piensa es que esa cifra dependerá del número de estrellas que hay en la galaxia. Pero recordemos que solo nos interesan las estrellas que son adecuadas para la posibilidad de que se forme vida a su alrededor (estrellas amarillas o naranjas entre 0,8 y 1,2 masas solares).

¿Cuántas estrellas adecuadas hay en la Vía Láctea?

Considerando que la vía láctea tiene 200.000 millones de estrellas, y teniendo en cuenta que **el 15%** son adecuadas (tipo sol o similar), tenemos 30.000 millones de estrellas adecuadas ¡Muchísimas! Pero algunas de ellas están ya agotando su combustible, y otras acaban de nacer.

Cada una de esas estrellas ha durado, o durará, 10.000 millones de años. Pero de todo ese largo periodo de tiempo, ¡no todo el tiempo está emitiendo comunicaciones inteligentes! La estrella tiene que dar tiempo a que se enfríen sus planetas, se forme la vida, se desarrolle la vida inteligente, se desarrolle la tecnología..., y ¿durante cuánto tiempo la civilización inteligente estaría persistiendo en la emisión de ondas de radio de alta tecnología? Los científicos coinciden en que, siendo optimistas, persistirían unos 500 años hasta cansarse o probar con otros métodos. Solo durante 500 años estaría persistiendo en emitir comunicaciones inteligentes (si llegara a tener vida inteligente).

De manera que, considerando que **todas** las estrellas similares al sol acaban albergando vida inteligente capaz de comunicarse con nosotros, el número de estrellas de las que podemos esperar que, **justo hoy**, estén emitiendo comunicaciones inteligentes, se reduciría a:

$$30.000 \text{ millones de estrellas adecuadas} \times \frac{500 \text{ años emitiendo}}{10.000 \text{ millones de años}} = 1.500$$

Es decir, tendríamos en la vía láctea, hoy, 1.500 estrellas similares al sol que pudieran estar **hoy** emitiendo comunicaciones inteligentes.

Pero nos falta tener en cuenta cuántas de esas tienen planetas, y cuántas tienen planetas en la zona habitable.

De esas 1.500 estrellas similares al sol, solo una fracción tendría hoy realmente la vida inteligente que estamos buscando. A continuación, indicamos las cifras más optimistas posibles:

- Solo algunas de las estrellas tienen planetas (1/3 del total según la estimación actual de la NASA)
- ¿Qué porcentaje de los planetas son habitables? Ya vimos que deben ser planetas con órbita no excéntrica, de naturaleza rocosa, que orbitan a la distancia adecuada, con una gravedad adecuada, y un largo etc. No incluimos aquí otros requerimientos que son necesarios (satélite enorme, composición de la atmósfera, etc). Hasta la fecha se han detectado 7.800 exoplanetas. De todos estos, solo 35 se acercan a la posibilidad de albergar vida por estar más o menos en la zona habitable de la estrella. 13 de ellos se descartan por no tener agua o humedad. De los 22 restantes, todos ellos están más cerca de la estrella de lo deseable y, en cualquier caso, de estos 22 planetas sospechosos, 6 han resultado ser al final gigantes gaseosos. Todos los 16 restantes tienen una composición demasiado densa en comparación con la Tierra (demasiado hierro) y, en cualquier caso, 3 son bolas de hielo por fuera. Los 13 restantes tienen una gravedad entre 2 y 7 veces la gravedad de la tierra²⁵. Pero si a pesar de ser excesivamente grandes aceptamos los 13, la proporción sería de 13/7.800 (1,6 de cada mil) ([detalles de los exoplanetas escogidos](#))

²⁵ En realidad, la mitad de ellos orbitan en enanas rojas. El problema de las enanas rojas es que, al estar tan frías, la zona "habitable" está demasiado cerca a la estrella y por tanto queda totalmente expuesto a rayos X y ultravioletas totalmente incompatibles con la vida. Aun así, no los descartamos porque ya descartamos las enanas rojas al principio del razonamiento.

% de planetas habitables que alberga vida	100%
% de los que albergan vida que acaban teniendo vida inteligente	100%
% de los que tienen vida inteligente que desarrollan alta tecnología de radio	100%
Número de estrellas en la vía láctea	2E+11
% de estrellas tipo sol o similar	15%
Número de estrellas adecuadas	3E+10
Tiempo que una civilización permanecería emitiendo	500
Duración de la estrella	1E+10
Número de estrellas similares al sol que hoy podrían estar emitiendo señales	1.500
% de estrellas con planetas	33%
% de planetas "habitables" en cada estrella tipo sol	0,167%
Número de civilizaciones que pueden intentar contactarnos hoy en la vía láctea	0,8

Haciendo estos cálculos sencillos obtenemos que el número de civilizaciones de la vía láctea que, **a día de hoy**, están intentando comunicarse por radio es de aproximadamente **una**, en toda la galaxia.

O sea ¿nosotros?

Es decir, si somos **ultra optimistas**, y consideramos que el **100%** de los planetas de la vía láctea que cumplen ciertas condiciones (no muy restrictivas) acaban generando vida, y de esos, el **100%** acaban generando vida inteligente, y de esos el **100%** acaban desarrollando alta tecnología para comunicarse por radio, solo nosotros en toda la vía láctea estaríamos intentando comunicarnos hoy.

Si hacemos números más sensatos, pero aun así optimistas, quedarían así:

- % de planetas "habitables" que acaba albergando realmente vida: ¡Según Drake el 100%!
- % de planetas que han desarrollado vida, que acaban desarrollando vida inteligente: 1% según Drake
- % de las vidas inteligentes que llegan a ser capaces de comunicarse: 1% según Drake

Es decir, según estos números (los más optimistas), en nuestra Galaxia habría hoy 0,0001 civilizaciones tratando de comunicarse.

Ahora bien, a lo largo de los 13.000 millones de años de existencia de la galaxia, habrían existido, según los números de Drake, 1 millón de civilizaciones solitarias que nunca se habrían podido comunicar entre ellas porque no habrían coincidido en el tiempo (y muchísimo menos en el espacio).

Según todo lo comentado cabe plantearse la siguiente pregunta, ¿tienen sentido proyectos como SETI que buscan posibles civilizaciones extraterrestres?

Tengamos en cuenta que un intento de comunicación con ondas electromagnéticas esféricas, que se envíe en todas las direcciones del espacio, es muy frustrante por los retos insalvables que supone:

- El problema es que este tipo de ondas electromagnéticas esféricas pierden potencia con la distancia al cuadrado.
- Si la civilización extraterrestre tiene la misma capacidad de detección que tenemos nosotros hoy, no podrían detectar nuestra señal si están a más de 0,3 años luz. Es decir, una civilización que viviera en la estrella más cercana (alfa centauri se encuentra a 4 años luz) no detectaría en absoluto nuestra emisión de radio de alta potencia si tuviera nuestra misma tecnología, aunque estuviera tan interesada como nosotros en contactar.

Por supuesto, la viceversa también se cumple. Si una civilización en alfa centauri, que es la estrella más cercana, tuviera nuestra misma tecnología y estuviera interesada en comunicarse, y enviara una comunicación por radio, **nosotros no seríamos capaces de detectarla**, aunque supiéramos exactamente la frecuencia en la que nos están intentando contactar.

Sin embargo, si emitimos con radio unidireccional (tipo láser), entonces las distancias que se pueden alcanzar son inmensas. Pero el problema es que solo se lanza en **una única dirección** muy precisa.

En 1974 se envió el primer intento de comunicación hacia el espacio con alta potencia de radio (radiotelescopio de Arecibo) de manera direccional, tipo láser. Este tipo de comunicación permite alcanzar distancias inmensas, pero hay que escoger una dirección determinada. El mensaje de Arecibo apuntaba al cúmulo globular M13, en la constelación de Hércules. **Tardará 25.000 años en llegar**. El mensaje ha alcanzado en 2024 una distancia de 50 años luz. Considerando que el radio de la galaxia es de 50.000 años luz, podemos decir que no ha salido aún de casa...

Así descubrimos otro problema, y este es más serio e inevitable. A pesar de que la velocidad de la luz es rapidísima, las comunicaciones interestelares son desesperantemente lentas debido a las enormes distancias.

Para comunicarnos con una civilización en la estrella más cercana (alfa centauri), el proceso sería un engorro. Les enviaríamos hoy un mensaje, cuatro años después ellos la recibirían, y por tanto tardaríamos más de 8 años en recibir la respuesta.

Atendiendo a los números estadísticos que vimos, y considerando las dimensiones de la vía láctea, los científicos consideran que no podemos esperar encontrar civilizaciones inteligentes más cerca de 1.000 años luz, ni siquiera en las hipótesis más optimistas. Por supuesto esto multiplica exponencialmente los problemas que hemos visto antes, dado que la potencia de la señal disminuye con el radio al cuadrado. Y las comunicaciones por radio tardarían además 2.000 años entre envío y respuesta. Y esto es inevitable, no depende de la tecnología, porque nada puede viajar más rápido que la luz.

Si en lugar de comunicarnos por radio, queremos viajar a visitarles, las cosas se ponen aún más difíciles. Con la tecnología actual, tardaríamos unos 100.000 años en viajar a la estrella más cercana, que se encuentra a 4 años luz. Es decir, tardaríamos el mismo tiempo que lleva existiendo el homo sapiens. Si quisiéramos visitar a nuestros amigos de la civilización inteligente más cercana (que si hay suerte están a 1.000 años luz), según las hipótesis más optimistas, tardaríamos 25 millones de años si todo sale bien. Y para volver tardaríamos otros 25 millones de años. Aquí la relatividad nos puede ayudar porque si bien para los habitantes de la tierra habrían pasado sin duda 50 millones de años, para los viajeros podría haber pasado menos tiempo si logramos alcanzar velocidades cercanas a las de la luz, pero con la tecnología actual apenas se notaría la diferencia.

Barrow y Tipler son unos de los científicos que más esfuerzo han dedicado a estos planteamientos. Sus conclusiones, basadas en cálculos estadísticos, afirman que es probable que seamos la única especie inteligente en el universo entero ¿Cómo alcanzan esta conclusión? Según razonan en su famoso libro, de haber existido alguna antigua civilización inteligente deberían haber llegado sondas exploratorias hace mucho tiempo. Exponen su certeza de que unos seres inteligentes con tecnología capaz de comunicarse por radio acabarían, entre 100 y 500 años después, teniendo la tecnología suficiente para enviar sondas con una potente inteligencia artificial y con energía casi ilimitada, capaces de encontrar recursos materiales y energéticos en los sistemas solares de otras estrellas, para autorreplicarse.

Es decir, la sonda sería capaz de aterrizar en otros planetas y fabricar otras muchas sondas con los recursos materiales y energéticos de ese planeta, y acabar así multiplicándose, explorando toda la galaxia.

Con la tecnología de cohetes actual del ser humano, estos autores consideran que, si la civilización lanzara la sonda madre hoy, en 300 millones de años fácilmente las sondas auto replicantes descendientes de la sonda madre habrían colonizado **toda la galaxia**. Dado que la galaxia tiene 13.000 millones de años de antigüedad, el hecho de que no hayan llegado aún sondas robotizadas inteligentes a la Tierra es, según Barrow y Tipler, prueba de que nunca ha habido civilizaciones inteligentes en la galaxia.

Según Barrow & Tipler el ser humano tiene ya conocimiento suficiente de ingeniería astronáutica para lograrlo, pero le faltan unos 50 o 100 años para desarrollar aún más la inteligencia artificial que permita que estas sondas sean capaces de construir réplicas de sí mismas con material y energía que obtendrían en los sistemas planetarios de otras estrellas.

Estos autores, en su famoso libro *“The anthropic cosmological principle”* justifican con muy diversos métodos que:

*“Hay una muy fuerte evidencia de que la vida inteligente está **restringida a un solo planeta**, que es solo uno de 9 planetas que orbitan alrededor de una singular estrella, que es en sí misma **la única entre 100.000 millones de estrellas de la galaxia**, que es única entre 1.000.000 millones de galaxias del universo visible... la humanidad es un insignificante accidente perdido en la inmensidad del cosmos. La evolución de la especie humana fue un accidente extremadamente fortuito, tan raro que **es muy probable que no haya ocurrido en ningún otro lugar del universo visible**”* (Barrow y Tipler).

Cuando analizamos las verdaderas posibilidades de que pueda existir vida inteligente extraterrestre los resultados son decepcionantes.

Dejando a un lado todas las consideraciones astronómicas que habría que considerar para que el planeta pueda tener un clima estable, una atmósfera viable, océanos, carbono, etc, las grandes dificultades vienen cuando analizamos todos los extraordinarios e increíbles procesos químicos y biológicos que deben darse para dar lugar a la vida. Y las increíbles evoluciones que deben producirse a lo largo de miles de millones de años para la constitución de seres pluricelulares, órganos complejos, y finalmente, la aparición de una conciencia inteligente.

Los últimos trabajos científicos más recientes sobre este tema están en la línea de Barrow y Tipler, en relación con las posibilidades de existencia de vida extraterrestre inteligente.

El estudio “Dissolving the fermi paradox” dirigido por Anders Sandberg (Universidad de Oxford, 2018) incorpora todos los recientes conocimientos de química, biología, astronomía y física, y determinó que, probablemente, **somos la única civilización avanzada que existe en todo el universo observable.**

A lo largo de todo este tema hemos analizado el principio antrópico débil. Hemos visto que, en efecto, para que exista el hombre, se tienen que haber dado previamente una serie de condiciones que hagan posible que el ser humano pueda existir. Todas estas condiciones que hemos ido explicando (y son solo unas pocas que he escogido) son un duro golpe al principio copernicano que establecía, casi por decreto o como dogma, que el lugar y la situación del hombre, y la era en la que vivía, **no era privilegiada en ningún sentido.** Ahora somos mucho más conscientes de que la Tierra es, en realidad, **un lugar especialísimo**, y también el momento de la historia del universo es un momento especial. Nuestra existencia hace 5.000 millones de años habría sido imposible. Carter tenía razón cuando comenzó a hacer matizaciones al principio copernicano, que aseguraba que no había nada especial en nuestra situación en la galaxia, ni nada especial en nuestro planeta.

Pasemos ahora a analizar, hasta qué punto, también **el propio universo**, y solo conocemos este universo, parece estar “*diseñado*” para hacer posible la existencia del ser humano. Comenzamos a entrar en el principio antrópico fuerte...

1.3.2. Teoría del ajuste fino. El Principio Antrópico Fuerte

Como comentábamos al inicio, el Principio Antrópico Fuerte pretende afirmar que el universo, y sus parámetros físicos fundamentales, tienen **una configuración precisa para** hacer posible la existencia del ser humano. En este capítulo profundizaremos en algunas de las increíbles coincidencias que se dan en las constantes universales y, sobre todo, profundizaremos en las especialísimas condiciones iniciales que debían existir en los momentos iniciales del universo para que sea posible llegar al universo actual, que es capaz de albergar vida.

No distinguiremos, de momento, entre el Principio Antrópico Fuerte restringido, que indica que las condiciones físicas y sus constantes universales tienen la proporción y valores necesarios y justos para **hacer posible** la existencia de vida inteligente, y el Principio Antrópico Fuerte ampliado, que diría que el universo tiene los valores necesarios y justos para **hacer necesaria** la existencia del ser humano.

Como podemos imaginar, la diferencia entre ambos es bastante notable. Una cosa es diseñar el universo para hacer posible la vida inteligente. Y otra es diseñarlo para hacer **necesaria la existencia del ser humano**. Algo de esto comentaremos en el último capítulo de este curso, cuando veamos la mecánica cuántica.

A lo largo de este capítulo rescataremos las reflexiones de los más importantes científicos de los últimos 30 años para analizar, hasta qué punto, el universo parece haber “aparecido” con un ajuste increíblemente fino, para hacer posible la existencia de vida. Veremos que cualquier mínima modificación en las constantes universales habría hecho inviable la existencia del universo, y no digamos ya, la vida.

Pero, además, partiendo de las constantes universales que conocemos, veremos que las condiciones iniciales del Big Bang parecen haber sido “diseñadas” de una manera increíblemente precisa para hacer posible la existencia de vida.

En el capítulo anterior estudiamos la hipótesis de que la vida existe porque hay millones de millones de estrellas, y en alguna de ellas sería posible la vida. El problema que vamos a discutir ahora es que esas estrellas existen precisamente porque el universo parece estar “diseñado” de una manera ajustadísima que hace viable que las estrellas puedan existir. Y es que todas esas estrellas existen, precisamente, gracias a unas leyes y variables que parecen estar escogidas previamente con un ajuste muy, muy fino.

A lo largo del siglo XX, con los avances en la cosmología, la teoría del ajuste fino ha ido ganando cada vez más relevancia. El propio Stephen Hawking, enemigo de cualquier intento de buscar causas “inexplicables”, escribió lo siguiente:

“Las leyes de la ciencia, tal como las conocemos en la actualidad, contienen muchos números fundamentales, como el tamaño de la carga eléctrica del electrón y la proporción de las masas del protón y del electrón... El hecho notable es que los valores de estos números parecen haber sido ajustados muy finamente para hacer posible el desarrollo de la vida” (S. Hawking).

En la actualidad los científicos manejan un número limitado de constantes universales que definen el comportamiento preciso de todo el universo observable, en el espacio y en el tiempo.

Nombre	Símbolo	Valor
Velocidad de la luz	c	$2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$
Constante de Planck	h	$6.6260755 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Constante de Gravitación	G	$6.67259 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
Constante de Boltzmann	k	$1.380658 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
Constante molar gas	R	$8.314510 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$
Número de Avogadro	N_A	$6.0221 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Carga del Electrón	e	$1.60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$
Permeabilidad eléctrica del vacío	μ_0	$4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$
Permitividad magnética del vacío	ϵ_0	$8.854187817 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
Constante de Coulomb	$1/4\pi\epsilon_0 = K$	$8.987552 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$
Constante de Faraday	F	96485.309 C/mol
Masa del electrón	m_e	$9.1093897 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Masa del protón	m_p	$1.6726231 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Número de Avogadro	N_A	$6.0221367 \times 10^{23} / \text{mol}$
Constante de Stefan-Boltzmann	σ	$5.67051 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
Constante de Rydberg	R_∞	$10973731.534 \text{ m}^{-1}$
Magnetón de Bohr	μ_B	$9.2740154 \times 10^{-24} \text{ J/T}$
Cuanto de flujo	Φ_0	$2.0678338 \times 10^{-15} \text{ T m}^2$
Radio de Bohr	a_0	$0.529177249 \times 10^{-10} \text{ m}$
Constante de desplazamiento de Wien	b	$2.897756 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$

Es importante considerar que algunas de estas constantes universales están relacionadas entre sí. Por ejemplo, la velocidad de la luz en el vacío está relacionada con la permeabilidad eléctrica y la permitividad magnética. De manera que los científicos solo manejan 15 constantes universales independientes.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

Está demostrado que todos estos números tienen estos valores precisos desde el mismo nacimiento del universo.

Los últimos desarrollos de modelos matemáticos computarizados han demostrado que los universos colapsan, o no pueden existir, cuando las variables se modifican mínimamente respecto al valor que tienen en nuestro universo.

“¿Cómo puede ser que los parámetros que gobiernan las partículas elementales y sus interacciones estén dispuestos siguiendo un equilibrio que permita la aparición de un cosmos tan complejo y diverso? Si el Universo ha sido creado por una selección aleatoria de parámetros, la probabilidad de que contenga estrellas es de una sobre 10^{299} ”. (Lee Smolin).

“Utilizamos estos números en todas nuestras teorías, pero no los entendemos, ni lo que son, ni de dónde vienen” (Richard Feynman).

“Las leyes de la física, como sabemos hoy, contienen muchos números fundamentales, como el tamaño de la carga eléctrica del electrón e incluso la relación de las masas del protón y del electrón, (...). Lo que es notable es que el valor de esos números parece haber sido muy finamente ajustado para hacer posible el desarrollo de la vida” (Stephen Hawking).

Por poner un ejemplo sencillo de entender, como Carter apuntó y Barrow & Tipler han remarcado, si G hubiera sido un poquito menor de lo que es, todas las estrellas serían enanas rojas, haciendo imposible la vida. Si fuera un poquito mayor todas las estrellas serían estrellas azules radiactivas imposibilitando también cualquier forma de vida. Ya vimos que la vida solo es viable en las estrellas amarillas (intermedias entre las enanas rojas y las azules). Las estrellas amarillas solo existen porque la relación entre G y las constantes implicadas en la fuerza nuclear tiene un valor muy muy preciso.

Otro ejemplo, si la fuerza eléctrica no hubiera sido tan intensa con respecto a la gravitatoria (es $2,3 \times 10^{39}$ veces mayor), las estrellas jóvenes habrían colapsado mucho antes de que pudieran producirse los elementos químicos pesados como el carbono, fundamentales para la vida. Lo veremos más adelante.

La fuerza nuclear fuerte es 137 veces mayor que la fuerza electromagnética, esto es así desde el nacimiento del universo. En teoría, debería ser posible explicar por qué la relación entre la fuerza nuclear y la electromagnética (y en realidad, la relación entre cualquiera de las cuatro fuerzas) tiene ese valor y no otro, pero nadie sabe por qué. Pero lo que todo científico entiende es que un cambio ligerísimo del valor de ese número supondría la inexistencia de los átomos.

“Es uno de los mayores misterios de la física. Un número mágico dado al hombre, que no lo entiende. Se podría decir que “la mano de Dios trazó ese número, y que se ignora qué es lo que hizo mover su pluma”. (Richard Feynman).

El propio comportamiento de los elementos de la tabla periódica es sospechoso en sí mismo. En el siglo XIX, el propio Maxwell, de quien hablaremos con detenimiento en el próximo capítulo de mecánica cuántica, puso su atención en las propias moléculas, que eran consideradas como invariables desde el origen del universo, y por tanto consideraba que era imposible que hubieran evolucionado a partir de procesos naturales ciegos de azar. Esta propiedad de invariabilidad le daba, según él, el sello de un “artículo manufacturado”. Lo explica mejor Henderson, años después, pero referido a los átomos:

*“Nada hay más cierto que el hecho de que las propiedades del hidrógeno, el carbono y el oxígeno son invariables a lo largo del tiempo y del espacio. Podemos concebir que los átomos puedan formarse o desintegrarse, pero mientras existen, **son uniformes**... y tienen absoluta constancia en todas las características y propiedades que vemos y nos interesan... Esto debemos tomarlo como postulado” (Henderson).*

Lo que quiere decir Henderson es que los átomos son como son debido a que siguen una lógica sencilla que determina cuántos electrones hay en cada capa y cuantos protones y neutrones hay en el núcleo. Y eso determina absolutamente todas sus propiedades. No es posible que el átomo de hidrógeno pudiera comportarse de forma diferente hace 3.000 millones de años, ni se puede comportar de forma diferente en ningún otro lugar del universo, ni en ningún otro momento. Ahora, si repasamos el tema anterior y nos fijamos en todas las increíbles características que cumple cada elemento (el hidrógeno, el oxígeno, el carbono) para hacer posible la vida, nos damos cuenta de que todo ello depende de sencillas reglas y parámetros universales que definen el comportamiento de cada átomo, parámetros que estaban definidos y fijados desde el mismo inicio del universo.

La proporción entre la masa del neutrón y la del electrón es también especialísima. Es exactamente la necesaria para hacer posible las largas cadenas de ADN. En esta línea, Regge²⁶, uno de los científicos más influyentes del siglo XXI, hacía esta afirmación:

*“Nuestro universo viene determinado por el hecho de que, solo una relación entre la masa del neutrón y el electrón igual a 1837 garantiza que haya largas cadenas moleculares del tipo y el tamaño adecuados para hacer posibles los fenómenos biológicos. **Una ligerísima variación en esta relación cambiaría críticamente el tamaño y longitud de los anillos de la hélice de ADN haciendo imposible su modo particular de auto replicación.** En este sentido, podríamos decir que esa relación entre las masas del neutrón y el electrón nos permite existir”.*

Las leyes de la física y la química, que se reducen a tres o cuatro fórmulas fundamentales, condicionan de manera determinante las propiedades de cada elemento (del carbono, del hidrógeno, del oxígeno, etc.) y las propiedades de cada sustancia (del agua, del metano, del dióxido de carbono, etc.).

²⁶ Regge sentó las bases de la Teoría de cuerdas y la gravedad cuántica y fue uno de los más importantes expertos en relatividad.

Por tanto, la relación entre la masa del electrón y el protón, el valor de la fuerza nuclear débil y fuerte, la fuerza eléctrica, etc... son los condicionantes fundamentales que hacen que el agua, el oxígeno, el carbono, el dióxido de carbono, etc. cumplan todas las extraordinarias propiedades que hemos visto que son esenciales para la vida.

Wheeler lo explica así. Transcribo sus propias palabras:

“No es únicamente que el hombre esté adaptado al universo. El universo está adaptado al hombre ¿Imagina un universo en el cual una u otra de las constantes físicas fundamentales sin dimensiones se alterase en un pequeño porcentaje en uno u otro sentido? En tal universo el hombre nunca hubiera existido. Este es el punto central del principio antrópico. Según este principio, en el centro de toda la maquinaria y diseño del mundo subyace un factor dador-de-vida”.

Cuando en 1913 Henderson comenzó en Harvard, por primera vez en la historia, a analizar las increíbles características que cumplía el agua (que hemos visto en detalle en el tema anterior), quedó maravillado por las increíbles coincidencias que parecen existir en las variables universales, y sus importantísimas implicaciones para la posibilidad de la existencia de la vida.

“Las probabilidades de que este único conjunto de propiedades hubiera ocurrido por accidente es infinitamente pequeña (menos que ninguna probabilidad que pueda ser considerada a nivel práctico).” “Estamos obligados a considerar toda esta colección de propiedades como si alguna inteligencia razonable la hubiera preparado para los procesos de evolución planetaria... Por tanto, las propiedades de los elementos deben, por el presente, ser considerados como si tuvieran una conducción teleológica” “Las propiedades de la materia y el propio curso de la evolución cósmica deben ahora ser vistos en relación íntima con la estructura de las criaturas vivas y sus actividades; Estas propiedades de la materia pasan a ser, por tanto, mucho más importantes en biología que lo que se sospechaba hasta ahora. Pues el proceso global de evolución, cósmico y biológico, es uno, y los biólogos deben ahora considerar el universo, en su esencia fundamental, como biocéntrico” Henderson.

Un gran número de físicos contemporáneos (Penrose, Penzias, Gingerich, Hoyle, Paul Davies, etc) se han mostrado maravillados ante semejantes coincidencias y no dudan en asegurar que existe **un ajuste finísimo** en todas las variables universales.

Ya vimos en capítulos anteriores que Dicke (1961) llega a la conclusión de que la edad del universo está precisamente acotada para la existencia del hombre, quien no podría existir ni antes, ni después.

“El universo es tan y solo tan viejo y grande como para hacer posible la existencia del ser humano”. (Dicke)

Por su parte, ya vimos la importancia de que las estrellas masivas exploten en supernovas, de manera que puedan liberar los elementos pesados como el carbono, oxígeno, hierro y todos los que son necesarios para la vida.

Esto solo ocurre si la relación entre la fuerza nuclear débil y la gravedad tiene unas condiciones especiales, y no puede ser ni mayor ni menor.

El número de increíbles casualidades es amplísimo; la velocidad de expansión inicial del universo, el ajuste en la temperatura inicial, la densidad precisa del universo actual, su homogeneidad y su isotropía, las cantidades relativas de materia y antimateria en los orígenes²⁷, el preciso valor de la fuerza de la gravedad, la energía nuclear fuerte, la energía nuclear débil, la fuerza electromagnética, el proceso de formación del carbono, el proceso de combustión del hidrógeno en helio, etc.

Pero, por no extendernos excesivamente, nos centraremos únicamente en dos de las coincidencias que a mí me parecen más interesantes:

- La formación del carbono.
- Las condiciones especiales de los primeros instantes del Big Bang.

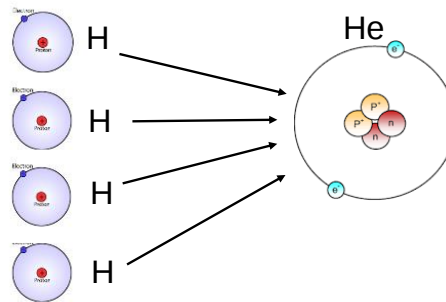
La formación del carbono

Ya hemos visto en detalle la importancia que tiene el carbono para la formación de cualquier tipo de vida posible.

En este apartado veremos cómo la formación del carbono en el interior de las estrellas masivas se debe a una interesantísima e increíble casualidad.

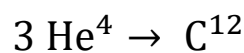
Como vimos en el primer capítulo de este curso, el núcleo de la estrella logra sobrevivir a la inmensa presión gravitatoria, contrarrestando esa fuerza compresiva con la fuerza expansiva que se produce gracias a la reacción nuclear de convertir el Hidrógeno en Helio.

²⁷ A través de fenómenos cuánticos debería haberse esperado la misma proporción de partículas y antipartículas, y por tanto la materia no existiría porque se habrían aniquilado entre ellas. Sin embargo, por razones que se desconocen, se originaron 100.000.001 partículas por cada 100.000.000 antipartículas, dando así origen a la materia.



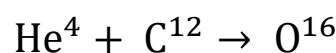
En la reacción representada en el gráfico, la diferencia entre lo que vemos a la izquierda y la derecha, es que a la izquierda tenemos cuatro protones, mientras que a la derecha tenemos dos protones y dos neutrones. Y también vemos que tenemos dos electrones menos. Es decir, dos de los protones han perdido su carga positiva desprendiéndose de dos positrones (antimateria), que se han desintegrado junto con los dos electrones (materia) que faltan, generando energía.

Vimos que, cuando se está acabando el combustible en las estrellas supergigantes rojas, la fuerza gravitacional comienza a ganar la partida, y entonces el núcleo se comprime aún más, incrementando aún más la temperatura ¡Y es ahora cuando comienza a quemarse el propio Helio para lograr nuestra posterior existencia!



Es decir, tres átomos de helio (cada uno con dos protones, dos neutrones y dos electrones), dan lugar a un átomo de carbono (con seis protones, seis neutrones y seis electrones).

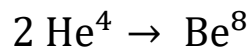
A partir del carbono y un núcleo de helio se genera también, en el núcleo de la estrella, el oxígeno:



El proceso de combustión en la estrella continúa hasta que también el helio se agota. La fuerza gravitatoria gana ahora la partida comprimiendo aún más el núcleo e incrementando así su temperatura. Y ahora el carbono y el oxígeno sirven como combustible para formar el resto de los elementos pesados que podemos encontrar en la Tierra (silicio, azufre, calcio, fósforo, etc).

¿Por qué os cuento todo esto? Pues tiene mucha importancia... Tanta que nos estamos jugando nuestra existencia aquí.

En realidad, el proceso de la formación del carbono a partir del helio tenía que pasar por un elemento intermedio que hiciera de catalizador para hacer viable y rápido el proceso. Este catalizador es el berilio.



Y a partir del berilio y el helio, se forma el carbono



Esto solo es posible porque el berilio actúa de catalizador y, gracias a Dios, tiene una supervivencia mucho mayor que la del helio.

Entre 1940 y 1950 los científicos consideraban que era así como debía formarse el carbono en el interior de las estrellas. Pero había un problema. Por este método la producción de carbono sería escasísima, porque las energías de las partículas fusionadas ($\text{He}^4 + \text{Be}^8$) es mucho mayor que la que tiene el carbono-12 en estado normal, por lo que todo este proceso sería extremadamente improbable que ocurriera.

En 1954 Hoyle razonó de la siguiente manera. Es un hecho que hay muchísimo carbono en la tierra, en venus, etc, que por otra parte nos ha permitido existir. Por tanto, debe de existir un proceso de resonancia, que aún no hemos descubierto, que hace que el carbono se genere de manera espontánea y acelerada en el horno nuclear de las estrellas. Debe existir una versión de carbono 12 excitado que tiene una energía **exactamente igual** al de las partículas fusionadas a partir del helio y el berilio.

¡Este estado excitado del carbono se observó tres años más tarde!

¡Era una increíble coincidencia que existiera un nivel excitado del carbono con una energía prácticamente idéntica a la de las partículas fusionadas!

Solo gracias a la existencia de esa increíble coincidencia es posible la vida en la tierra. Y esa increíble coincidencia venía determinada, desde el inicio, por los valores precisos y exactos que tienen los parámetros fundamentales del universo, definidos y fijados desde su origen (valor de la fuerza nuclear, la fuerza electromagnética, etc).

Esto se puede expresar de otro modo. Si la fuerza nuclear fuerte que mantiene los núcleos unidos y la fuerza electromagnética que opera entre partículas cargadas no tuvieran exactamente los valores que tienen, no existiría una versión del carbono excitado cuya energía fuera exactamente igual a la suma de las energías del átomo del berilio y del helio, y no se formaría el carbono en el interior de las estrellas, y por tanto no se formaría ningún otro elemento pesado. Y no existiríamos.

“La interpretación de sentido común de los hechos sugiere que una superinteligencia ha andado toqueteando tanto la física, como la química y la biología, y que no hay fuerzas ciegas dignas de mención en la naturaleza. Las cifras que podemos extraer de los hechos me parecen tan abrumadoras que sitúan esta conclusión prácticamente fuera de toda duda” “Pienso que ningún científico que examinase estas evidencias podría evitar llegar a la conclusión de las leyes de la física nuclear han sido deliberadamente proyectadas para las consecuencias que producen en el interior de las estrellas” (Hoyle).

Si la adición del carbono al helio para formar oxígeno fuera también resonante, todo el carbono se convertiría en oxígeno en el interior de las estrellas. Y sin carbono no habría vida. Pero se da la extraordinaria coincidencia de que el nivel energético del O^{16} está por debajo del nivel energético del C^{12} y el He^4 , lo que permite que mucho carbono sobreviva.

“Si el nivel de resonancia del carbono fuese apenas 4 por ciento menos, simplemente no habría carbono. Si ese nivel en el oxígeno fuese apenas 0,5 por ciento más elevado, prácticamente todo el carbono se hubiese convertido en oxígeno. Sin abundancia de carbono, ninguno de nosotros estaría ahora aquí” (Gingerich).

Nos centramos ahora en analizar las condiciones especialísimas que se dieron en el inicio del Big Bang. Lo que aprenderemos ahora nos dará mucho que pensar.

El ajuste fino en las condiciones iniciales del Big Bang

En este apartado no vamos a poner en cuestión los valores de las constantes universales, las consideramos como un hecho ¿qué otra cosa podemos hacer?

Analizaremos, por tanto, características como la cantidad de materia que tenía el universo en su origen, su densidad, su temperatura inicial, etc.

Nos centraremos en tratar de entender, hasta qué punto, esas condiciones iniciales del Big Bang son tan especiales para poder permitir la formación de la vida. Veremos que el universo comenzó con unas características muy concretas y específicas de temperatura, masa, densidad y velocidad de expansión.

Ya vimos en el primer capítulo que el universo se está expandiendo actualmente, pero, a priori, podría ser que se expandiera para siempre, o podría ser que llegara un momento en que se contrajera provocando un Big Crunch. Esta pregunta es equivalente a analizar la velocidad con la que escapa un bólide que hemos lanzado desde la superficie terrestre ¿tiene la velocidad suficiente para escapar de la gravedad terrestre y no regresar nunca? ¿o por el contrario su velocidad no es suficiente y regresará atraído por la gravedad?

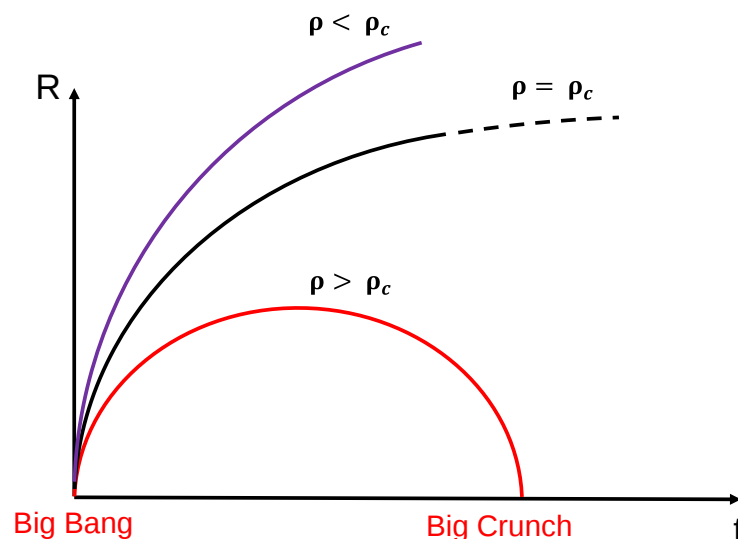
Si el universo en el que vivimos tiene una densidad superior a la densidad crítica, la gravedad acabará ganando la partida y colapsará en el futuro.

$$\rho > \rho_c$$

Si tiene la densidad del universo es inferior a esa densidad crítica, seguirá expandiéndose eternamente.

$$\rho > \rho_c$$

Si representamos ambas posibilidades en el espacio tiempo quedaría algo así:



R representa el tamaño del universo y t representa el tiempo.

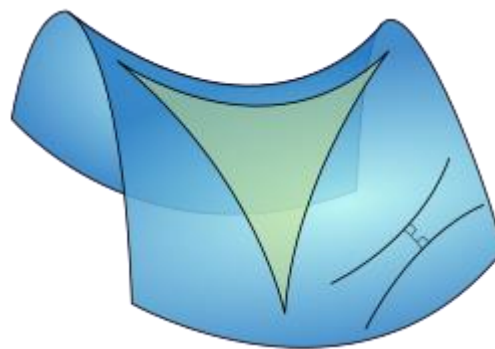
La curva roja representa la evolución esperada de nuestro universo si resultara que la densidad media del cosmos fuera superior a la densidad crítica. Como vemos, al ser la densidad superior a la crítica, la fuerza de la gravedad acabará frenando su expansión, tanto que iniciará un camino de compresión hasta colapsarse en un único punto, que llamamos Big Crunch.

La curva negra es la evolución que podemos esperar para nuestro universo si la densidad media de nuestro cosmos resultara ser **justo** la densidad crítica. La curva, en un tiempo infinito, tiende a ser horizontal, de manera que se expandiría cada vez más lentamente. Es el equivalente a lanzar una pelota hacia el espacio, justo a la velocidad de escape. La pelota iría cada vez más despacio, hasta el punto de que parece ya casi parada, pero nunca iniciaría el camino de retorno, y siempre seguiría avanzando, pero cada vez más despacio.

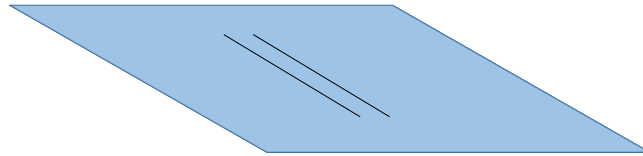
La curva morada representa la evolución que podemos esperar para el universo si la densidad es inferior a la densidad crítica. En ese caso la fuerza de la gravedad no es suficiente para frenar la expansión, y el universo se expandiría indefinidamente. Es el equivalente a lanzar la pelota hacia el espacio a una velocidad superior a la velocidad de escape.

Estas tres posibilidades dibujan una curvatura del espacio-tiempo diferente para el universo:

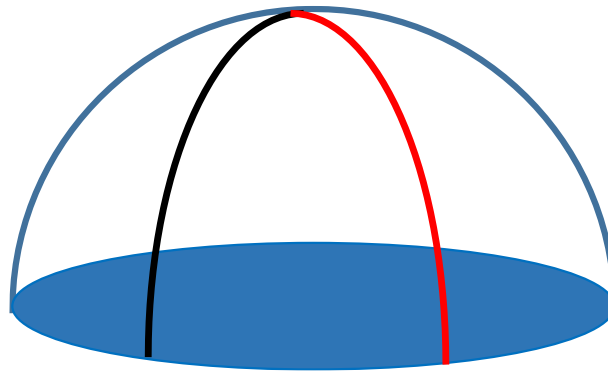
- Universo abierto o hiperbólico (curva morada). $\rho < \rho_c$. En este caso la curvatura del espacio tiempo es negativa, es decir, es cóncava. Sería una superficie en el espacio-tiempo de tipo hiperbólica, en donde dos rayos de luz que inicialmente son paralelos pueden separarse cada vez más ¿Cómo pueden separarse dos rayos de luz paralelos? Ya vimos en el capítulo de relatividad que la masa deforma el espacio tiempo y los rayos de luz podían curvarse siguiendo una geodésica en el espacio-tiempo. En este tipo de espacio-tiempo hiperbólico dos rayos de luz que inicialmente son paralelos, pueden acabar separándose.



- Universo plano (curva negra). $\rho = \rho_c$. En este caso la curvatura del espacio tiempo es nula. En este tipo de espacio-tiempo, dos rayos de luz que inicialmente son paralelos permanecen siempre paralelos.



- Universo cerrado o esférico (curva roja) $\rho > \rho_c$. En este caso la curvatura del espacio tiempo es positiva, es decir, es convexa. Sería una superficie en el espacio-tiempo de tipo esférico, en donde dos rayos de luz que inicialmente son paralelos (rayo negro y rayo rojo en la figura) trazan unas geodésicas en el espacio-tiempo que pueden acabar cruzándose. Es un tipo de universo donde la gravedad gana la partida. Es el tipo de curvatura espacio-temporal que se da en los alrededores del sol, por ejemplo, pero esa curvatura por efecto del sol sería una pequeña “arruguita” en el espacio-tiempo cosmológico.



Es muy importante conocer en qué tipo de universo vivimos, por razones que luego vamos a comentar. Para saberlo, necesitamos conocer cuál es la densidad media de nuestro universo, y conocer también cuál es la densidad crítica.

¿Cómo podemos calcular cuánto vale esa densidad crítica?

En realidad, no es complicado. Si consideramos, como vimos en capítulos anteriores, que el universo no tiene centro, podemos calcular cuál es la velocidad de escape a la que se deben alejar las galaxias que nos rodean, de manera que se alejen justo a la velocidad suficiente que hace que no puedan volver contra nosotros.

Vimos en el curso anterior que es muy fácil calcular la velocidad de escape. Basta con dar al bólide la velocidad suficiente para que su energía cinética sea suficiente para que acabe convirtiéndose exactamente en la energía potencial que tiene cuando llegue a una distancia infinita.

La diferencia entre la energía potencial en el infinito (que es cero) y la energía potencial de una pelota a una distancia r es:

$$\Delta U = \frac{GMm}{r}$$

Por tanto, la energía cinética que debemos darle es:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{GMm}{r}$$

Por tanto, la velocidad de escape será:

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

Por otra parte, vimos que las galaxias se separan a mayor velocidad cuando más lejos se encuentran de nosotros (acuérdate del experimento que hacíamos cuando inflábamos el globo). La velocidad de separación de las galaxias es proporcional a la distancia a la que se encuentran:

$$v = Hr$$

Siendo H la constante de Hubble, que es fácil de calcular puesto que sabemos la velocidad a la que se separan las galaxias y sabemos a qué distancia se encuentran. Lo vimos en el primer capítulo. Su valor es:

$$H = \frac{71 \frac{km}{s}}{megaparsec}$$

Un mega parsec no es más que una unidad de distancia muy grande. Equivale a 3,2 millones de años luz aproximadamente.

Es decir, según esta fórmula, una galaxia que se encuentra a 3,2 millones de años luz se aleja de nosotros a 71 km/s.

Por otra parte, toda la masa que se encierra en una esfera de radio r es:

$$M = \rho V = \rho \frac{4}{3} \pi r^3$$

Siendo ρ la densidad del universo

Si hacemos que la velocidad a la que se alejan las galaxias sea igual a la velocidad de escape podemos obtener la densidad crítica

$$v = v_e$$

$$(Hr)^2 = \frac{2G\rho_c \frac{4}{3} \pi r^3}{r}$$

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} = 9,47 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3$$

Estos valores de la densidad crítica han resultado ser aproximadamente de un protón por cada metro cúbico de espacio. Aunque parece poco, es en realidad muchísimo mayor que la densidad que encontramos en el universo. La densidad que calculamos realmente para el universo con las medidas que somos capaces de realizar es del 4% de esa cantidad crítica.

Por tanto, según todo nuestro razonamiento, el universo debería tener una curvatura espaciotemporal hiperbólica, y jamás llegaría a frenar su expansión.

Sin embargo, cuando analizamos cómo se comportan los rayos de luz que nos llegan desde distancias increíblemente lejanas, comprobamos que llegan como si el espacio-tiempo fuera absolutamente plano.

Las mediciones de la curvatura espacio-tiempo realizadas por la misión espacial europea Planck en 2015 han demostrado que la relación entre la densidad del universo y la densidad crítica es:

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c} = 1,000 \mp 0,005$$

Es decir, vivimos en un universo con una configuración espaciotemporal totalmente plana. Es curioso que sea así porque, si bien el 50% de las infinitas posibilidades de universos es hiperbólica, y el otro 50% es esférica, **solo una** de las infinitas opciones de universos es plana.

Por supuesto, el espacio-tiempo del universo es plano solo a escala cosmológica. Debemos en realidad imaginarlo como una sábana muy estirada con unas pequeñas arrugas. Estas arruguitas se corresponden con las deformaciones espacio-temporales que produce la luna, la tierra, el sol, las galaxias, etc... que son las que hacen que, a nivel local, la luz puede desviarse un poco en su recorrido, como vimos en los capítulos anteriores. Pero son deformaciones muy pequeñas. En términos generales, el espacio-tiempo de nuestro universo parece increíblemente plano.

Universo plano



Universo plano

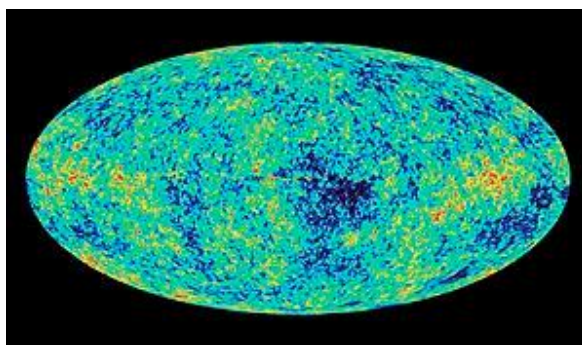
Pequeña deformación
esférica en las
cercanías a una estrella

Pero según nuestros cálculos, la densidad del universo es muy inferior a la crítica y, como decíamos, ¡el universo debería tener una configuración espacio-temporal hiperbólica! Si no se da este tipo de configuración en el universo solo puede deberse a que existe una materia que no conocemos ni hemos detectado hasta ahora, que es la responsable del 96% de la masa del universo. Los científicos están ahora en búsqueda de esa **materia oscura** que logra que la densidad alcance la densidad crítica. Esta “materia oscura” sigue siendo, a día de hoy, un misterio. Pero muchos indicios apuntan a su existencia, ya que la densidad que calculamos para los cúmulos de galaxias es mucho mayor que la densidad que correspondería a la suma de la masa de esas mismas galaxias.

Pero existe otra razón por la que podríamos haber deducido desde el principio que la configuración espacio-temporal del universo era plano.

Dado el larguísimo tiempo transcurrido desde el Big Bang, si la densidad del universo fuera algo mayor que la crítica, ya se habría producido hace muchos años un Big Crunch. Y si fuera inferior, la distancia entre las galaxias sería muchísimo mayor a la actual, e incluso no se habrían formado nunca galaxias, ni estrellas. De hecho, para hacer posible la formación de galaxias y estrellas como las que observamos, y que subsistan a día de hoy, la densidad del universo debe ser idéntica a la crítica $\pm 0,001$.²⁸ Por supuesto, además de la densidad, influye también el tamaño. Un universo consistente únicamente en la vía láctea habría tardado solo un mes en colapsar hacia un Big Crunch. Es por este motivo que el hombre necesita un universo inmenso para existir, puesto que, como ya vimos, para formar al ser humano, sus ingredientes necesitan cocinarse durante 13.000 millones de años. Esto supone que el hombre solo puede existir en un universo gigantesco y muy antiguo.

El descubrimiento en 1965 del fondo de microondas del que hablamos en el primer capítulo arrojó mucha luz a toda esta cuestión. Analizando el espectro de luz del fondo de microondas hemos podido comprobar que se corresponde con una temperatura muy cercana al cero absoluto ($2,9^{\circ}$ K). Pero lo más interesante es que, miremos hacia donde miremos, la energía que nos llega de ese fondo de microondas es exactamente la misma ($\pm 0,1\%$). Los científicos se sorprenden de cómo es posible entonces esa homogeneidad e isotropía. Las pocas diferencias que existen en el fondo de microondas son las “causas originales” de que se formaran, en el futuro, estrellas, galaxias, cúmulos de galaxias, etc. La semilla de cada elemento del universo está dibujada en esas pequeñas “imperfecciones” de la isotropía inicial.



Anisotropías detectadas en la “radiación cósmica de fondo”. La primera luz emitida por el universo, 380.000 años después del Big Bang. Cada irregularidad de la imagen es la causa de la existencia de cada galaxia y cada estrella que hoy vemos.

²⁸ The Anthropic Cosmological Principle. Barrow & Tipler. Pag 411. Oxford University Press.

“El Big Bang, el acontecimiento más semejante a un cataclismo que podamos imaginar, si se lo analiza detenidamente, aparece como finamente orquestado” (Smoot, premio Nobel de Física 2006).

Los puntos rojos representan radiaciones más calientes, y los azules representan radiaciones más frías. Pero las diferencias entre unos u otros son del orden de diez milésimas de grados, y representan las pequeñísimas “arrugas” en la isotropía general que permitirán la formación de “grumos”, que darán lugar a todas y a cada una de las estrellas y las galaxias que existen hoy.

“La evolución del universo está inscrita en sus inicios. Es, por decirlo así, una especie de ADN cósmico” (Smoot).

Si las diferencias de temperatura hubiesen sido levemente mayores el universo se habría “cuajado” de grumos gigantescos y se habría transformado enseguida en un gigantesco campo de agujeros negros. Si las diferencias entre esos puntos rojos y azules fueran levemente menores el universo se habría convertido en un espacio uniforme gaseoso, y nunca habría cuajado lo suficiente para formar ningún grumo, no habría estrellas, ni galaxias. El límite entre uno y otro extremo es pequeñísimo, es como caminar por encima del filo de un cuchillo.

Si despreciamos esas ínfimas diferencias entre los distintos puntos (por otra parte, diferencias clave para nuestra existencia), el resultado es de una isotropía casi total.

La isotropía generalizada la detectamos también cuando observamos las galaxias lejanas con el telescopio espacial Hubble. Da igual hacia donde miremos, el universo es exactamente igual, tiene el mismo aspecto y la misma densidad de galaxias en todas partes hacia donde dirijamos nuestro telescopio. Su homogeneidad es increíble. Decimos que es isotrópico, porque da igual donde miremos, es siempre igual.

El hecho de que el universo sea tan increíblemente isotrópico está muy relacionado con el hecho de que su densidad sea justo igual a la densidad crítica, y que su espacio-tiempo sea plano. Su expansión y densidad son **justo las suficientes** para que no se formen grandes grumos (grandes agujeros negros). Pero sí se han formado, gracias a Dios, “pequeños grumos” necesarios para la formación de estrellas y galaxias, absolutamente necesarias para nuestra existencia.

*La isotropía del universo y nuestra existencia son ambas resultado del hecho de que el universo se esté expandiendo **justo a la velocidad crítica**. No podríamos observar un universo diferente porque no sería posible nuestra existencia. Por tanto, uno puede decir, en cierto sentido, que la isotropía del universo es consecuencia de nuestra propia existencia. (Collins & Hawking).*

Hawking analizó esta cuestión de la isotropía del universo y sus resultados se obstinaban en afirmar que cualquier condición inicial que se imagine para los inicios del Big Bang acaba formando un universo anisotrópico porque la organización isotrópica es totalmente inestable. Como hemos dicho, o bien se formarían grandes agujeros negros, o bien no se formarían galaxias ni estrellas en absoluto. Un ejemplo didáctico sería meter 1.000 niños en el patio de un colegio y que se mantuvieran equidistantes durante todo el recreo. Los niños tienden a jugar en grupo. Las masas tienden a juntarse.

La organización actual de “grumos” homogéneamente expandidos, pero sin llegar a colapsar, solo puede ser debido a que el Big Bang, en sus condiciones iniciales, comenzó de una forma absolutamente precisa.

Tras analizar profundamente este misterio, Collin y Hawking llegan a la siguiente conclusión, para intentar explicar lo inexplicable:

*“No hay un único universo sino un infinito conjunto de universos con todas las posibles condiciones iniciales. Pero dada la existencia de la inestabilidad anisotrópica, se sigue que **prácticamente todos los universos acaban altamente anisotrópicos**. En todos estos universos no podemos esperar encontrar galaxias, dado que la condensación de formación de galaxias solo podemos encontrarlas en universos cuyo ratio de expansión es justo el suficiente para evitar el colapso. La existencia de galaxias sería una condición necesaria para el desarrollo de cualquier vida inteligente”* (Collin y Hawking)

En efecto, los universos que se expanden un poco más rápido de la velocidad crítica no se condensan lo suficiente para formar “grumos” (galaxias). Los que se expanden más despacio forman grumos, pero enseguida el conjunto se hace inestable. Cuando se forman demasiados grumos, digamos que ocurre como cuando cuaja la mahonesa, acaban formando enseguida inmensos agujeros negros y acaban colapsando en un Big Crunch.

“La velocidad de expansión debía de estar verdadera y exactamente ajustada hasta el 15 decimal, de lo contrario el Universo se hubiese desparramado, o desmoronado, y eso demasiado rápido como para que ninguna estructura pudiera formarse en él” (Alan Guth, padre de la teoría de la inflación).

Un nanosegundo después del Big Bang la relación entre la densidad del universo y la densidad crítica no podía diferir de 1, ¡salvo en el decimal número 24!, según los cálculos de Gamow.

Roger Penrose, con la aportación del cálculo de la radiación de un agujero negro realizado por Hawking, fue capaz de calcular la probabilidad de que un universo como este existiera.

Es decir, dando por hecho las leyes físicas actuales, y las variables de las leyes físicas que conducen la materia del universo ¿cuál era la probabilidad de que un universo como el que vemos ocurriera? ¿cuál era la probabilidad de que justo se expandiera a la velocidad crítica, que justo tuviera la densidad crítica? Vamos a tratar de explicar a continuación los cálculos que realizó Penrose. Estos cálculos parten de los estudios que realizó Hawking para poder conocer la entropía que existe en un agujero negro. Dado que esta explicación de Hawking no es relevante y además es algo compleja, la he incorporado en un apéndice, para aquel que tenga la curiosidad de analizarla.

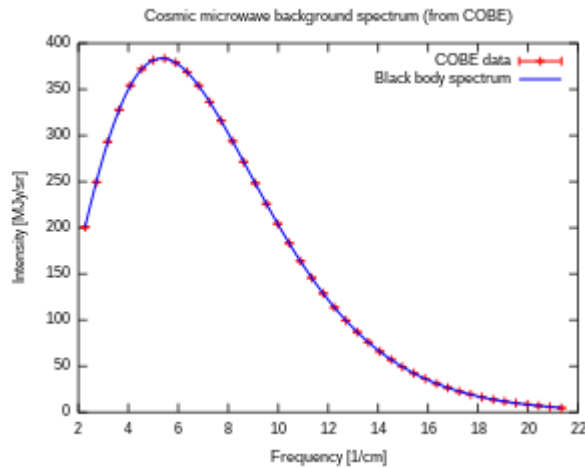
Basta decir que, en el caso de un agujero negro, tendremos más entropía cuanto mayor sea su superficie. Hawking también demostró que cuando dos agujeros negros se fusionan, la superficie del agujero negro resultante es mayor que la suma de la superficie de los dos. Es decir, cuando dos agujeros negros se fusionan incrementa la entropía del universo. Debemos imaginarnos los agujeros negros como “la nada” en la película de “La historia interminable”. Es algo que, irremisiblemente, va absorbiendo toda la materia, y cada vez se hace más grande. Es además el mayor desorden posible y el más irreversible, lo que entra ahí no sale jamás. Ya vimos que cuando un vaso de cristal se ha roto en mil pedazos, se ha incrementado el desorden y además en un proceso irreversible. Y vimos también que, precisamente, el hecho de tener un punto brillante en el cielo oscuro (el sol), es el milagro que ha hecho posible la vida, porque es una fuente de energía ordenada (de baja entropía). Cuando un agujero negro absorba al sol, aumentará la entropía, y será irreversible para siempre.

La fórmula de la entropía del agujero negro, si consideramos que no rota, fue obtenida por Hawking, y como vemos, es proporcional a su área:

$$S = \frac{A}{4hG}$$

Y ahora es cuando toma el relevo Sir Roger Penrose. La fórmula de la entropía de los agujeros negros que encontró Hawking le abrió un camino inesperado.

La siguiente clave está en la radiación de fondo de microondas, esa radiación misteriosa que encontraron Wilson y Penzias en 1965, y que era la prueba de la existencia del Big Bang. El espectro de emisión de esa radiación de fondo tiene esta pinta:



Fuente: FIRAS team. Nasa.

Como vemos, las frecuencias son bajísimas. Esta radiación corresponde a 2,9°K, muy cercano al cero absoluto. Pero no es eso lo importante.

Los astrofísicos habían quedado sorprendidos por la enorme cantidad de entropía que contiene esa radiación. Esto es muy extraño porque habría cabido esperar que en el origen del Big Bang la entropía debía ser muy baja, ya que la entropía se incrementa siempre, y 13.800 millones de años después aún vemos mucho orden a nuestro alrededor.

Se ha calculado que la entropía de la radiación de fondo es de 10^8 por cada barión del universo (los bariones son los protones y los neutrones). El número de protones y neutrones (bariones) que hay en el universo es 10^{80} . Por tanto, la entropía de los inicios del Big Bang es $10^{80} \times 10^8 = 10^{88}$

Vamos a calcular ahora la entropía que debe existir en el universo actual, hoy. Los agujeros negros que hay en el interior de las galaxias son de aproximadamente un millón de masas solares. En ese caso, la entropía de cada galaxia, considerando que cada galaxia tiene 10^{11} estrellas, sería según los cálculos de Penrose de 10^{21} por cada barión. Es decir, la entropía del universo en su estado actual es de $10^{80} \times 10^{21} = 10^{101}$.

Ahora ya, la entropía del fondo de microondas no nos parece tan grande, porque es solo de 10^{88} , que es totalmente ridícula frente a 10^{101} , que es la entropía del universo actual. Es decir, en efecto, se ha incrementado muchísimo la entropía desde el origen de los tiempos hasta hoy, como no podría ser de otra forma, según la Segunda Ley de la Termodinámica.

Si todo el universo colapsara en un único e inmenso agujero negro, entonces cada barión (cada protón o neutrón) produciría una entropía de 10^{43} (según los cálculos de Hawking), por tanto, la entropía del Big Crunch sería de:

$$10^{80} \text{ bariones} \times 10^{43} = 10^{123}$$

Dado que la entropía es el logaritmo de las distintas opciones existentes, tenemos que pensar que el número de opciones de “diseño” que existían al inicio para que el universo hubiera acabado en un Big Crunch es de $10^{10^{123}}$ opciones distintas. Es decir, lo más probable, y lo más lógico es que el universo hubiera acabado en un Big Crunch nada más iniciarse.

Con un cálculo similar podemos llegar a la conclusión de que, para lograr crear un universo como el nuestro actual, es decir con galaxias y estrellas pero sin agujeros negros supermasivos que deriven en un big Crunch, el “creador” tenía a su disposición $10^{10^{101}}$ distintas opciones posibles.

Y ahora llegamos a la conclusión de Penrose. Como él mismo dice, el “creador” eligió un estado realmente preciso. Seleccionó un universo de los que están en el escogido y selectivo grupo de los “universos ordenados”, que son solo $10^{10^{101}}$ si hablamos de los universos como el nuestro, esto es, los universos “*con grumos razonablemente pequeños*”.

Vemos que el creador tuvo que escoger un universo “con grumos razonablemente pequeños” de entre todos los universos que son posibles.

Si suponemos que todos los posibles son la suma de ambos (los que acaban en Big Crunch y los que acaban en grumos razonables), veremos que la cifra:

$$10^{10^{101}} + 10^{10^{123}} \approx 10^{10^{123}}$$

Piénsalo, por ejemplo:

$$10.000.000.000.000.000 + 100.000 \approx 10.000.000.000.000.000$$

Por tanto, las probabilidades de escoger un universo ordenado con grumos de tamaño razonable serían de:

$$\frac{10^{10^{101}}}{10^{10^{101}} + 10^{10^{123}}} \approx \frac{10^{10^{101}}}{10^{10^{123}}} = 10^{(10^{101} - 10^{123})} \approx 10^{(-10^{123})} = \frac{1}{10^{10^{123}}}$$

Es decir, para intentar evitar un universo que acabara en un Big Crunch, pero que, sin embargo, tuviera estrellas y galaxias, el “creador”, como dice Penrose, tuvo que escoger con una precisión de:

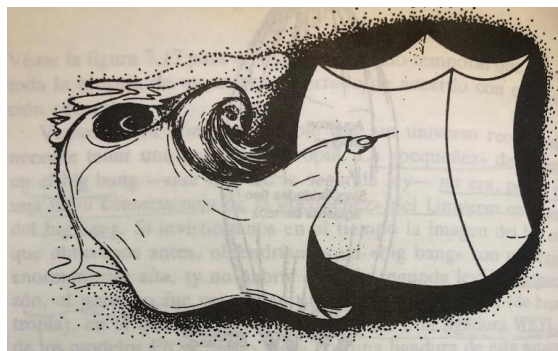
Una parte entre $10^{10^{123}}$

Para hacernos una idea de la precisión con la que se seleccionaron los inicios del universo, tenemos que pensar que esta cifra $10^{10^{123}}$, si la quisiéramos escribir, sería un 1 seguido de 10^{123} ceros. Como dice el propio Penrose, si pusiéramos un cero en cada uno de los protones y neutrones del universo, nos quedaríamos cortísimos para poder escribirla. Necesitaríamos todos los protones y neutrones de 10^{43} universos, ¡solo para poder escribir la cifra!

Pero es muy distinto poder escribir una cifra, que poder imaginar lo que representa. Intentemos imaginarlo de otra forma. Imaginemos que en cada protón o neutrón del universo hubiera 10^{43} llaves, es decir, que en cada protón o neutrón hubiera billones de billones de billones de billones de llaves, todas y cada una diferentes entre sí. Entonces, tendríamos $10^{80} \times 10^{43} = 10^{123}$ llaves distintas. Y de todas esas ¿el “creador” escogió la única válida para poner en marcha un universo capaz de albergar vida?

En realidad este ejemplo no refleja, en absoluto, la improbabilidad de la que hablamos. El ejemplo que acabamos de decir es equivocadísimo. El número de llaves que debemos imaginar no es 10^{123} . Es $10^{10^{123}}$. ¿Y esto es mucho mayor? Pues hombre si,... Es como si comparamos el número 7 con 10^7 .

En resumen, lo que todo esto nos quiere decir, es que nos somos capaces siquiera de poder imaginar un ejemplo que muestre esta precisión.



Famoso dibujo que encontramos en el libro “La nueva mente del emperador”, de Roger Penrose, donde se intenta representar la infinita precisión del “creador” para escoger el universo actual, capaz de poder desarrollar galaxias que aún sigan vivas 13.000 millones de años después.

Por tanto, el Big Bang se inició con una precisión ordenada asombrosa. Pero ese universo escogido ¿en qué sentido era tan ordenado en los inicios del Big Bang? Hemos visto que la entropía del Big Bang era enorme, esto es, de 10^8 por cada neutrón o protón. Las partículas vibraban como locas, el desorden y “caos” era enorme.

En realidad, el orden preciso y matemático no estaba en la disposición específica y concreta de las propias partículas, estaba en la “forma” que se le estaba dando al espacio-tiempo del universo en ese preciso instante. Se le estaba dando la aceleración **precisa** y **exacta**, la densidad precisa, la temperatura precisa. Se le estaba dando exactamente la velocidad de escape, de manera que, 13.800 millones de años después, tenemos los grumos suficientes y necesarios, pero no demasiado grandes ni demasiado pequeños. 13.800 millones de años después, la mahonesa aún no ha cuajado (no hay un big Crunch), pero, gracias a Dios, tenemos grumos de un tamaño razonable para poder vivir, tenemos galaxias, tenemos **estrellas**.

Vivimos en un universo con estrella

Esta velocidad de escape tan precisa se intenta explicar por la teoría inflacionaria, pero creo que lo fundamental está explicado, y no es preciso profundizar más.

Para complicar aún más las cosas, en 1998, contra todo pronóstico y contra el sentido común, los experimentos y medidas nos han demostrado que el universo, no solo se expande, sino que ¡lo hace de manera acelerada! Este misterio de un universo que se expande aceleradamente aún no ha sido resuelto y nadie ha podido plantear una hipótesis, y mucho menos una teoría satisfactoria. La única hipótesis que dan los científicos para intentar dar una explicación a esta expansión acelerada es la existencia de una supuesta **energía oscura**, también indetectable, que sería la responsable de acelerar dicha expansión.

Bueno, pero volviendo a lo importante ¿cómo explica la ciencia toda esta serie de coincidencias que hemos visto en este tema? Hemos visto que la existencia de vida en la tierra la justifica por la probable existencia de miles de millones de planetas similares, pero ¿cómo explica la ciencia las extraordinarias coincidencias que se dan en los valores de las constantes universales y en las condiciones iniciales de los primeros instantes del Big Bang si parece todo ello diseñado de manera inteligente para hacer posible que el ser humano pudiera existir?

“Pero ¿quién hizo esos ajustes? Una de las razones por las cuales los científicos son cautelosos ante el principio antrópico es que parece invalidar la revolución copernicana y volver a situar a la humanidad en el centro (en el sentido de “significante”) del universo”. (Johnjoe McFadden. Experto en genética molecular. Universidad de Surrey).

“No sería sorprendente que el origen y el destino de la energía en el universo no se puedan entender del todo si se aíslan de los fenómenos de la vida y la conciencia (...). Es concebible que la vida tenga un papel mayor de lo que hemos imaginado. El diseño del universo inanimado quizá no esté tan desconectado de las potencialidades de la vida y la inteligencia como los científicos del siglo XX habían tendido a suponer” (Freeman Dyson).

A continuación, presentamos al única solución que la ciencia ha logrado proponer para intentar dar una explicación a este increíble misterio.

1.3.3. La solución de los multiversos

La respuesta a la increíble acumulación de coincidencias que hemos visto en el tema anterior es casi inmediata. Habíamos dicho que la vida en la tierra es posible porque existen millones de millones de millones... de planetas, y entonces no nos parece tan sorprendente que en alguno de ellos exista la vida.

Por la misma razón, un universo tan extraordinario se explica porque hay infinitos universos con muy distintas leyes naturales y muy distintas constantes universales, y en alguno de ellos se tenían que dar precisamente estas que observamos. Surge así la Tesis de los Universos Múltiples, como única alternativa “científica” a la propuesta de un artesano divino. No es una solución muy original. El propio Demócrito ya había propuesto algo semejante hace 2.400 años

“Los mundos son infinitos en número y diferentes en tamaño. En algunos no hay ni sol ni luna, en otros hay más de un sol y más de una luna. Las distancias entre estos mundos son desiguales, en algunas direcciones hay muchos de ellos... La destrucción de estos mundos se produce por colisiones azarosas entre ellos. Algunos de estos mundos no tienen ni animales, ni plantas, ni vida” (Demócrito).

Roger Penrose considera, respecto a esta solución de los multiversos que *“tiene un carácter algo dudoso y tiende a ser invocado por los científicos cuando no tienen ninguna teoría bastante buena para explicar los hechos observados”* (La nueva mente del emperador. Penrose).

A día de hoy, ningún científico serio se ha aventurado a decir de qué manera se generan estos otros universos, ni de qué manera se definen y se ponen en marcha las distintas constantes universales de cada universo. La ciencia imagina procesos de creación de infinitos universos, cada uno de ellos con constantes universales distintas, condiciones iniciales distintas e incluso leyes universales distintas.

La mayoría de ellos colapsarían nada más existir, otros existirían eternamente sin nada reseñable, y solo muy muy muy poquitos serían estables, y una pequeñísima porción de ellos albergaría vida, y de esos, muy muy poquitos albergarían vida consciente.

Hawking lo explica de la siguiente manera:

“Las leyes de la ciencia, tal como las conocemos actualmente, contienen muchas cantidades fundamentales, como la magnitud de la carga eléctrica del electrón y la relación entre las masas del protón y del electrón. (...) El hecho notable es que los valores de esas cantidades parecen haber sido ajustadas sutilmente para hacer posible el desarrollo de la vida. (...) parece evidente que hay relativamente pocas gamas de valores que permitirían el desarrollo de cualquier forma de vida inteligente. La mayor parte de los conjuntos de valores darían lugar a universos que, aunque podrían ser muy hermosos, no podrían contener a nadie capaz de maravillarse de esa belleza. Esto puede tomarse o bien como prueba de un propósito divino en la Creación y en la elección de las leyes de la ciencia, o bien como sostén del principio antrópico fuerte”. Hawking.

Imagino que son tantos los universos que “flotan” por ahí, que quizás en algunos existen personas como nosotros conviviendo con caballos con un solo cuerno...



Un habitante de otros universos

“Es extraño postular la infinidad de universos paralelos, inaccesibles y desconectados unos de otros, con el fin de desembarazarse de la sobra de un principio creador” (Trinh Xuan Thuan, descubridor de la galaxia más antigua conocida).

En los escogidos universos donde se dé la casualidad de que exista vida consciente, esos pobres seres infelices se preguntarán ¿cómo es que existimos? ¿cómo es que nuestro universo parece haber sido creado con un ajuste tan fino para que nosotros existamos?, ignorando que en realidad habitan en uno de los infinitos universos que flotan por ahí. Ignoran que, en realidad, no son nada especiales.

Parece que la solución de los múltiples universos lo arregla todo.

Solo queda una última dificultad, **la navaja de Ockham**.

Guillermo de Ockham fue un filósofo, teólogo y fraile franciscano inglés que vivió a caballo entre el siglo XIII y el siglo XIV. En una época en que se discutía hasta sobre el sexo de los ángeles, Ockham intentó encaminar el tiro. Él decía que siempre debe optarse por la explicación más sencilla. Lo que quería decir es que la razón más plausible de algo es la que se explica con un menor número de causas, factores o variables. Su frase más conocida es

“entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem” “no hay que multiplicar los entes sin necesidad.” (Ockham).

Volvamos entonces a nuestra hipótesis de infinitos universos ¿Qué opinaría Ockham? Yo imagino que Ockham diría algo así:

*“Caballeros, su hipótesis de los infinitos universos es realmente ingeniosa, y podría explicar la existencia de un universo tan extraordinario como el que nosotros disfrutamos. Pero tengan presente que, ante la dificultad de explicar la existencia de **nuestro especialísimo y único** universo, ustedes han multiplicado el problema infinitamente. Ahora no solo tenemos que explicar la existencia de un universo, sino que tenemos que explicar la existencia de **infinitos universos**. Que, por cierto, la existencia de esos supuestos universos jamás podrá ser demostrada, y por tanto es algo parecido a discutir sobre el sexo de los ángeles... Señores, no hay que multiplicar los entes sin necesidad.”* (Ockham ficticio imaginado por mí).

“La hipótesis de los universos múltiples representa evidentemente el fracaso del programa general de la cosmología fundamental, pues me parece contraria a la simplicidad impuesta por la navaja de Ockham, ya que resolvemos nuestra ausencia de comprensión multiplicando entidades invisibles hasta el infinito.” (Gregory Benford).

“Estas propuestas (los multiversos) son presentadas como teorías científicas. Pero ¿acaso son realmente científicas? Parecen más bien cuentos metafísicos o mitológicos. Porque estas teorías no pueden ser verificadas: no pueden ser ni validadas ni refutadas, porque están fuera del campo de la experiencia de las ciencias.” (Karl Popper, uno de los filósofos más influyentes del siglo XX).

En realidad, la hipótesis de los infinitos universos lo soluciona absolutamente todo. Si un día, explorando el cielo con nuestro telescopio, vemos una galaxia lejana con la forma exacta y precisa del rostro de Michael Jackson, y justo la de al lado tiene la forma exacta del retrato de Elton John, y la de al lado es clavadita a un retrato de Phill Collins, no deberíamos sorprendernos.

Como hay infinitos universos, y probablemente, hay infinitos universos con vida consciente, en uno de ellos puede perfectamente haber galaxias con esas formas específicas. Por supuesto, es lógico que en ese universo tan original las personas conscientes que observan por el telescopio queden totalmente asombrados cuando observan esas galaxias con forma de retratos de estrellas del pop. Pero pronto se acuerdan de que ellos habitan solo uno de los infinitos universos posibles y entonces, ya lo entienden. No hay nada de qué sorprenderse, simplemente a nosotros nos ha tocado habitar ese universo tan particular con algunas galaxias con forma de retratos de estrellas del pop, pero hay otros infinitos universos por ahí flotando que no tienen nada de particular.



Lo único malo que tiene esta tesis de los infinitos universos es que supone el fin y la destrucción de la ciencia para siempre.

Ya no es posible la exclamación de sorpresa que los griegos expresaban hace 2.500 años cuando descubrían un orden tan extraordinario en el universo, una curiosidad y sorpresa, por cierto, que supuso poner en marcha la propia ciencia occidental.

“La cosa más bella que podemos experimentar es lo misterioso. Es la emoción fundamental que hallamos en la cuna del auténtico arte y la ciencia. Aquel que ya lo conoce y ya no puede hacerse preguntas, que ya no siente asombro, está muerto, no es más que una vela apagada” (Einstein).

Algunos científicos modernos del siglo XXI, partidarios de la tesis de los multiversos, darían la siguiente respuesta a los griegos que se sorprendían por la existencia de un cosmos, un orden en la naturaleza: *“nos ha tocado un universo ordenado, pero hay otros muchos por ahí flotando que no lo son. Nuestro universo solo es uno de los infinitos que flotan por ahí, y no hay nada de qué sorprenderse”*.

Lo malo es que esos otros universos son absolutamente indetectables. Y por supuesto nadie ha sido capaz de imaginar una configuración de variables o leyes universales diferente de la que conocemos, que haga posible la vida.

En cualquier caso, incluso bajo la hipótesis de los infinitos universos, Collins y Hawking se ven en dificultades serias para justificar la existencia de este universo preciso y concreto en el que vivimos. En su trabajo “Why is the universe isotropic?” ellos mismos dan una probabilidad nula a que se dé, de manera espontánea, un universo como el que observamos.

Bueno, pero entonces ¿qué?, si no es lícita ni científica la tesis de los infinitos universos que flotan por ahí, ¿qué opción tenemos? ¿cómo podemos explicar que la historia del cosmos, la historia geológica y la historia biológica parecen haber estado “*conducida*” hacia un fin?

1.3.4. La filosofía de las causas finales

En efecto, parece que la tesis de las causas finales que fue postulada por Sócrates, Platón y, sobre todo, consolidada y estructurada por Aristóteles, y que sobrevivió durante 2.000 años hasta bien entrado el siglo XVII, comienza a resurgir ahora.

No cabe duda de que debemos a científicos como Aristóteles y Newton buena parte del desarrollo de la ciencia que nos ha llegado como legado. Conviene en este punto recordar cuál era la forma y estructura del pensamiento científico de estos genios, qué les guio y motivó para alcanzar sus grandes resultados.

En realidad, todo comenzó con Sócrates, quien se mostró decepcionado por las posturas mecanicistas de los filósofos que le precedieron, en especial decepcionado con Anaxágoras y su discípulo Demócrito, quienes consideraban que los átomos chocaban de manera alocada unos con otros, sin orden, sin razón, sin ningún fin, solo azar y caos.

Por el contrario, Sócrates considera totalmente inverosímil semejante propuesta. Él consideraba que todo obedece a una razón. Y como todo obedece a una razón, y hay una verdad, deberíamos ser capaces de encontrarla y entenderla. Por supuesto Platón defendió esta postura, especialmente en El Timeo, donde pone en boca de Sócrates todas sus críticas a Demócrito.

Pero es Aristóteles, el primer científico, “*el filósofo*” (como se le conocía en la Edad Media) quien más énfasis puso en su crítica al atomismo de Demócrito. Aristóteles consideraba que Demócrito únicamente había tenido en cuenta la causa eficiente, pero había dejado de lado la causa principal, **la causa final**. Para Aristóteles el trabajo de la ciencia y del sabio debe ser tratar de encontrar y conocer las causas finales de las cosas. Aristóteles razona de la siguiente manera.

Vemos delante nuestra que existe una casa, y nos preguntamos ¿**por qué** está ahí esa casa? Lo primero que vemos es que es hueca por dentro, que soporta un tejado, etc. Es decir, tiene una determinada *forma (causa formal)*. Por otra parte, la casa está constituida de ladrillos, argamasa, piedra, etc. Por tanto, es preciso que hubieran existido este tipo de sustancias materiales (piedra, ladrillo, etc) previamente a la existencia de la casa. Los ladrillos, la argamasa, la piedra son *la causa material*. Pero también nos damos cuenta de que alguien ha debido de construir la casa con una serie de herramientas. El constructor y las herramientas son *la causa eficiente*.

Pero la causa principal, la respuesta más importante de **por qué** existe la casa, es **la causa final**. La casa existe porque el constructor quería tener un lugar donde vivir y cobijarse. Y es esta causa, según Aristóteles, la que da razón a la existencia de la casa, y la que determina a todas las demás causas. Es este **fin** el que determina la causa formal, es decir la forma de la casa (hueca, con espacio para habitaciones, etc). Es este **fin** el que determina la causa material, es decir el material de que está hecha la casa (ladrillos y argamasa para hacerla resistente). Y es este **fin** el que determina el esfuerzo eficiente del constructor (causa eficiente). De no haber habido ladrillos, quizás otra casa algo distinta habría existido, quizás de madera. Es decir, habría cambiado la causa material, pero la causa final prevalece porque era necesario un lugar donde vivir y cobijarse.

Según Aristóteles la ciencia debe tratar de estudiar y definir las cuatro causas de los objetos de estudio, pero sin duda, la más importante sería la causa final. Según “el filósofo”, si uno no conoce la causa final de algo, no lo entiende realmente.

Este planteamiento griego puso en marcha todo el desarrollo de la ciencia que veremos en la Biblioteca de Alejandría entre los siglos III a.C. y II d.C., y es la base de todo el pensamiento científico occidental hasta el siglo XVII.

“El fin es la causa de la materia, no la materia la causa del fin” (Aristóteles).

¿Y cuál era la forma de pensar antagónica? Tanto Anaxágoras como su discípulo Demócrito tenían un punto de vista que reconocemos como casi moderno. Anaxágoras razonaba de forma muy similar al propio Darwin. Su punto de vista era que el hombre se hizo inteligente debido a que tuvo manos primero. Aristóteles, sin embargo, replica que es debido a su increíble inteligencia que pasó a tener manos, porque las manos son solo una herramienta, y la naturaleza asigna las herramientas solo a aquel que sea capaz de usarlas, porque eso es lo razonable.

Es decir, para Aristóteles, el hombre tiene manos porque es inteligente, y por eso se le han dado unas herramientas (las manos) para que las use de manera inteligente. El filósofo considera que, si el ser humano no fuera inteligente, no habría tenido mucho sentido que se le hubieran otorgado unas manos hábiles, capaces de fabricar y manejar instrumentos de precisión. Un perro no sabría qué hacer con “manos” y le estorbarían. Por el mismo motivo, nadie regala un libro de física cuántica a un niño de 5 años. A cada uno se le “regala” lo que le viene bien.

Esta forma de pensar nos trastoca profundamente a los habitantes del siglo XXI, porque somos herederos de doscientos años de un tipo de pensamiento muy distinto. Pero veréis enseguida que, en realidad, la ciencia ya no está tan alejada de las causas finales.

“Diría que el universo tiene una finalidad. No está ahí simplemente por casualidad” (Roger Penrose, premio nobel de física).

La polémica aparece cuando hablamos de la existencia del hombre, y consideramos que el hombre es la causa final de la existencia del universo, como consideraban Platón y Aristóteles. Esto, en pleno siglo XXI, es totalmente inaceptable ¿cómo puede la existencia del hombre causar la existencia del universo? ¿cómo puede el futuro determinar el pasado? Algo de esto hablaremos en el siguiente capítulo y nos dejará casi trastocados.

Por otra parte, existen otras dificultades importantes. Si consideramos que el hombre es el fin del universo, como parece sostener el principio antrópico fuerte, surgen las siguientes preguntas:

- ¿Todas las cosas existentes en el universo existen para dar existencia al hombre? ¿o solo algunas? **¿y las otras por qué existen?** ¿por qué existen las galaxias lejanísimas que descubrimos ahora con el telescopio espacial Hubble?

- ¿Es solo el hombre el fin del universo? ¿o también pudiera haber otros seres inteligentes que fueran de alguna manera también fin de la existencia del universo?

En relación con la primera pregunta, Aristóteles aceptaba la existencia de fenómenos erráticos, fenómenos que no logran lo “intentado”, que no alcanzan el fin. Este tipo de fenómenos los llama “vanos”. Y también existen muchas cosas que no parecen conducir a ningún tipo de “fin”, y el mismo Aristóteles es consciente de esta categoría de acontecimientos.

Ahora bien, muchos elementos que antes se consideraban “superfluos”, con el tiempo y el avance de la ciencia, han pasado a considerarse totalmente necesarios para la existencia del hombre. Por ejemplo, la presencia de la Luna, de Júpiter, de Saturno, del campo magnético terrestre, de la extensión enorme de los océanos, de la inmensidad y antigüedad del universo, etc.

El hecho es que, la consideración de las causas finales entre los científicos entra en crisis en Europa en el siglo XVI, y su principal opositor comenzó siendo Francis Bacon (1561-1626), canciller de Inglaterra. Para él, las causas finales debían estudiarse en teología, pero la ciencia debía prescindir del estudio de este tipo de causas y centrarse en las causas eficientes y materiales. Por supuesto, este golpe de timón produjo una nueva revolución científica impresionante que nos ha llevado a nuestros días, esto es incuestionable.

Sin embargo, todavía Newton bien entrado el siglo XVII, es ferviente creyente en las causas finales

“¿Pudo el ciego azar saber que existe la luz, y conocer cómo funciona la refracción, para crear los ojos de las criaturas de las más curiosas maneras, para que sean usados?” (Newton)

Cuando Newton reflexiona acerca de la configuración del cosmos, y de la estructura de la naturaleza en la tierra, se impresiona.

“¿Cómo es posible que la naturaleza no haga nada en vano?” (Newton).

En efecto, Newton se desespera al comprobar que Descartes omite las causas finales en sus explicaciones. En su opinión, Descartes se queda a medias en sus explicaciones porque, a base de causas eficientes nunca será capaz de explicar la increíble y sorprendente economía (eficiencia y eficacia) de la estructura y constitución de la naturaleza.

Kant estaba de acuerdo con Newton y Aristóteles. Consideró que, en efecto, el mundo es un sistema de causas finales. Pero él llegaba a esta conclusión por una vía totalmente distinta. Kant consideraba que este sistema de causas finales estaba garantizado por la existencia de una Ley moral en el interior del ser humano.

Consideró el comportamiento moral como la causa final definitiva, el bien obrar sería el fin de la existencia del universo. Para Kant, la existencia de la moral (del comportamiento bueno consciente) es la garantía de que el mundo es un sistema de causas finales.

Pero la principal razón por la que las causas finales hoy nos chirrían hay que encontrarla en el siglo XIX. Sin duda la teoría de la evolución de Darwin parecía el inicio de un “*jaque mate*” a las causas finales. Fue la primera vez que se propuso un procedimiento “creador” capaz de producir “orden” **fruto del azar** y de las leyes naturales existentes. Pero ni siquiera el propio Darwin estaba del todo seguro a la hora de eliminar las causas finales.

“Es imposible concebir la inmensidad y maravilla del universo, incluido el hombre como el resultado del ciego azar o necesidad. Cuando reflexiono sobre ello me veo obligado a pensar en una Causa Final con una mente inteligente, en alguna manera, análoga a la del hombre, y por tanto, merezco ser llamado Teísta. Pero entonces, me asalta la duda ¿puede uno fiarse de las reflexiones del hombre, considerando que su mente ha evolucionado de la mente del animal más simple?” (Darwin).

Algunos filósofos modernos se desesperan con todo este tipo de reflexiones de los universos múltiples, las causas finales y todas estas cosas. **Para ellos las cosas son como son porque no podrían haber sido de otra manera.**

Su postura filosófica considera que el hombre está aquí, simplemente, debido a la concatenación de causas anteriores. Hay un único universo, que tiene unas leyes determinadas, y que se inició de una determinada manera, y desde entonces unas causas han dado lugar a unos efectos, que han sido a su vez causas de nuevos efectos, hasta llegar a la situación actual. Y no tiene sentido preguntarse cuál es la causa final de la existencia del universo, ni tendría sentido preguntarse si el universo pudiera haber empezado de otra forma. Solo cabe preguntarse cuál fue la concatenación de causas eficientes que produjeron la existencia del hombre, y algunos llegan a afirmar que, puesto que el hombre es la consecuencia de esas causas eficientes anteriores, **el hombre existe por necesidad**, y no hay más cuestiones que responder. El hombre está aquí porque no podría haber sucedido de otra forma²⁹.

Así razonan ellos.

²⁹ Este artículo expresa bien esta postura: <http://smjegupr.net/newsite/wp-content/uploads/2020/03/012-Examen-del-principio-antropico-en-cosmolog-a-por-Jes-s-Moster-n.pdf>

Sin embargo, la respuesta a este tipo de planteamiento ya viene de antiguo. Ya Aristóteles, y posteriormente Tomás de Aquino, se habían percatado hace siglos de la falacia de ese tipo de razonamiento que parecía hacer “necesario” todo lo que acontece. Santo Tomás lo explica así:

*“Enseña el Filósofo (Aristóteles), en el libro VI de la “Metafísica” que si decimos que todo efecto tiene alguna causa propia y añadimos que, puesta la causa propia, necesariamente se sigue el efecto, resultará que todos los futuros sucederán necesariamente (...) Por ejemplo, si preguntamos de alguien si será muerto por ladrones, este efecto tiene una causa precedente, que es el encuentro con los ladrones; y éste, otra, a saber, que el individuo salga de casa; y éste, otra, o sea, que quiera buscar agua; y esto tiene una causa anterior, es decir, la sed, que es causada por comidas saladas antes. Luego si, puesta la causa, se sigue necesariamente el efecto, será necesario también que, si come salado, tenga sed; y si la tiene, que vaya a buscar agua; y si quiere buscarla, que salga de casa; y si sale, que se encuentre con los ladrones; y si le encuentran, lo maten. **Por tanto, juntando lo primero con lo último, será necesario que a quien come salado lo maten los ladrones.** Por eso concluye el Filósofo que no es verdad que, puesta la causa, se siga necesariamente el efecto” (Tomás de Aquino).*

Es decir, no todo lo que ocurre **tenía que ocurrir**. Es seguro que, si sueltas una pelota, caerá hacia el suelo, pero no tiene por qué ocurrir que salgas a comprar algo y te roben. Hay sucesos que son necesarios y otros que son **contingentes**, y no tenían que ocurrir de manera necesaria e inevitable.

Llevado todo esto al caso que nos ocupa, es cierto que el hombre existe, pero lo lógico y más probable, es que no hubiera existido. El hombre, en principio, no debería ser un “ser necesario” en el universo.

La creencia en la existencia de causas finales puede parecernos casi medieval, pero la realidad es que prácticamente todas las disciplinas científicas trabajan con causas finales constantemente:

- **En biología:** Un buen biólogo debe preguntarse en todo momento qué es lo que aporta cada especie dentro del equilibrio de un determinado ecosistema. Sabe que, hasta las moscas, siempre tan molestas, cumplen **un fin** fundamental (polinizan las plantas, reciclan la materia orgánica en descomposición, etc), las cucarachas se comen los chinches, las ratas y ratones silvestres airean el suelo y beneficia a los árboles y plantas, etc. Cada elemento de la naturaleza está ordenado de acuerdo con **un fin**, y la función del biólogo es comprender muy bien cuál es su fin.

- **En medicina:** Un buen médico debe conocer **para qué sirve** cada órgano, cada tipo de proteína, cada tipo de hormona, etc. Cada cosa en el cuerpo humano tiene una función precisa, tiene **un fin**. Todo está perfectamente ordenado. El médico debe conocer muy bien cuál es el fin de cada elemento del cuerpo.
- **En química:** Hemos visto que los átomos de cada elemento son como son, y no pueden ser de otra manera. Cada elemento tiene una serie de capas de electrones, un número de protones y neutrones en su núcleo y un número determinado de electrones en su última capa. Estos sencillos números determinan todo su comportamiento químico. Y ha resultado que ese comportamiento químico de los distintos elementos permite que formen sustancias, que tienen unas propiedades extraordinarias, que parecen diseñadas específicamente para hacer posible la vida. El químico debe conocer cuáles son las propiedades de cada sustancia y de cada elemento, y por qué esas propiedades son tan importantes para el ser humano. Debe conocer cuál es el fin de la capa de ozono, el fin del oxígeno en la atmósfera, el fin de que haya una determinada composición de CO₂ en la atmósfera, y no más, etc.
- **En astronomía,** empieza a ser cada vez más habitual estudiar el fin de los distintos elementos astronómicos ¿por qué necesitamos a la luna, por qué Júpiter es fundamental para la vida, por qué hacen falta los demás planetas, qué beneficios aporta el sol, de qué manera influyeron los impactos de meteoritos y/o cometas o las etapas de vulcanismo en la evolución de las especies?, etc. Las propias estrellas han servido desde tiempos inmemoriales para guiarnos, para conocer cuándo comenzaba cada estación, etc. Uno de los ejemplos interesantes es el de Kepler, que estaba convencido de que los planetas tenían que girar formando una curva geométrica matemática, definida y perfecta, y tras mucho buscar la encontró. Eran las elipses. Solo esa forma de pensar le pudo llevar al éxito. Este descubrimiento permitió que Newton pudiera proponer su teoría de la gravitación universal, cambiando la ciencia occidental para siempre.
- **En psicología, sociología, economía, historia, y las ciencias humanas en general.** En todas estas ciencias que tratan al ser humano es evidente que cualquier científico opera, directamente, en relación con fines. Es muchísimo más fácil explicar que una persona bajó al bar a tomar algo porque tenía hambre y le apeteció bajar a ver si veía a algún amigo (es decir bajó persiguiendo un fin concreto), que explicar todos los intrincados y complejísimos fenómenos de causas eficientes que se dan en su sistema nervioso, su sistema digestivo y su sistema locomotor para acabar con su cuerpo en el bar, sin una causa final real.

Cuando los economistas analizan la reacción de los consumidores ante la subida de precios saben que ellos reaccionan de una determinada manera porque persiguen el fin de ahorrar dinero, de esta manera los economistas “simplifican” el problema inmensamente. Si habláramos solo de causas eficientes habría que explicar cómo hace cada neurona de cada consumidor para llegar a esos resultados.

- **En matemáticas y física, ¿también en la física?** Enseguida veremos cómo hay determinados problemas que son más fáciles de resolver si se considera que todo conduce a un fin. Se llama el Principio de acción mínima, y permitió la formulación de la función lagrangiana y hamiltoniana que ha sido fundamental para simplificar los problemas matemáticos de la relatividad general y la mecánica cuántica.

En muchas de estas ciencias es mucho más fácil y eficaz trabajar en base a causas finales que trabajar solo con las causas eficientes. El problema no solo se simplifica enormemente, sino que parece ser un enfoque más realista. Todo esto nos hace pensar que, quizás, descartar las causas finales de manera tajante no es tan buena idea.

Pero, sobre todo, estos ejemplos que hemos visto en este gran capítulo nos hacen maravillarnos ante la idea de que, no solo parece todo ordenado en la naturaleza, lo realmente sorprendente es que ¡nada parece desordenado! Como bien decía Newton:

“¿Cómo es posible que la naturaleza no haga nada en vano?” (Newton).

Si volvemos al ejemplo de los muchos monos escribiendo en muchos teclados, es posible que, después de muchos meses golpeando teclas, haya dado la casualidad de que en un determinado momento han escrito la palabra “ladrillo”. Pero lo que habrán escrito justo antes y justo después será algo así:

*Akhdsfalfjlsdjfglsdgljs ndopc909fflkdjfnv**ladrillo**lkjasdc092348cr2uyox ndodicfn*

Tras millones y millones de letras y números sin sentido alguno, podremos encontrar, entre todo ese caos, una palabra con sentido.

Esto es justo lo contrario de lo que encontramos en el universo y en la naturaleza. La ciencia cuando analiza este tipo de cuestiones echa de menos una especie de *trastero* o vertedero que debería haber en el universo en general, y en el planeta Tierra en particular, donde debería quedar almacenado y abandonado todo lo que ya no sirve, todos los desechos, y todo lo que ha salido defectuoso por azar. Reflexiona un momento en la cantidad de desperdicio y cosas inservibles que generamos en casa cada día, y no digamos en una gran ciudad.

En el caso de los monos, habría toneladas y toneladas de papel desperdiciado que habría sido necesario para que el azar hubiera podido escribir la palabra “ladrillo”.

Sin embargo, ni en el planeta Tierra, ni en el universo, encontramos ningún almacén de desperdicios, ningún “trastero”. Todo parece testarudamente ordenado, reciclable, utilizable, perfecto.

La ciencia propone la tesis de los muchos universos porque les permite hablar de un almacén descomunal de universos inútiles por ahí flotando. Nuestro universo sería el equivalente a la palabra “ladrillo”, pero nos rodean infinitos universos absurdos que serían el inmenso trastero que andan buscando los científicos desesperadamente.

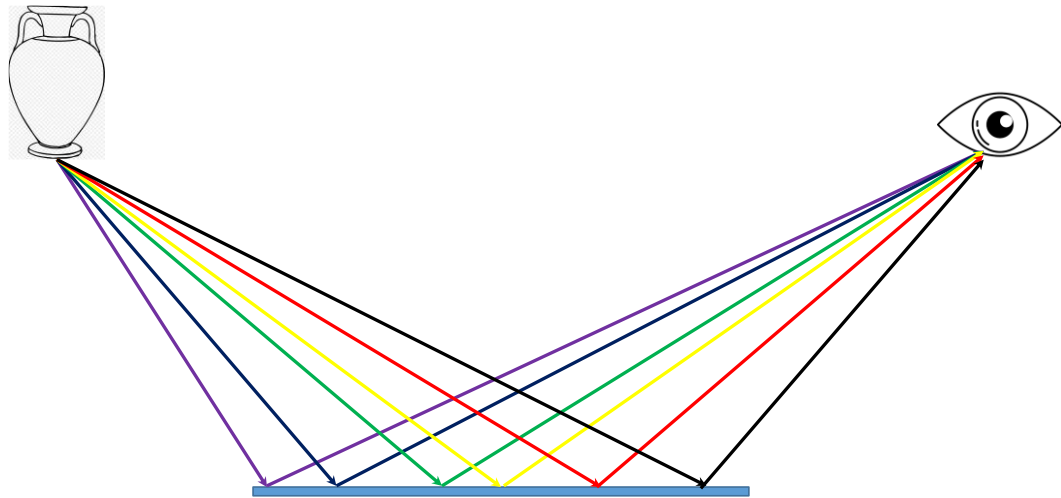


Para terminar este capítulo, acabaremos con un breve análisis sobre el principio de acción mínima. Veremos que este principio parece sugerirnos que incluso la propia física ¡se comporta siguiendo causas finales!

El principio de acción mínima

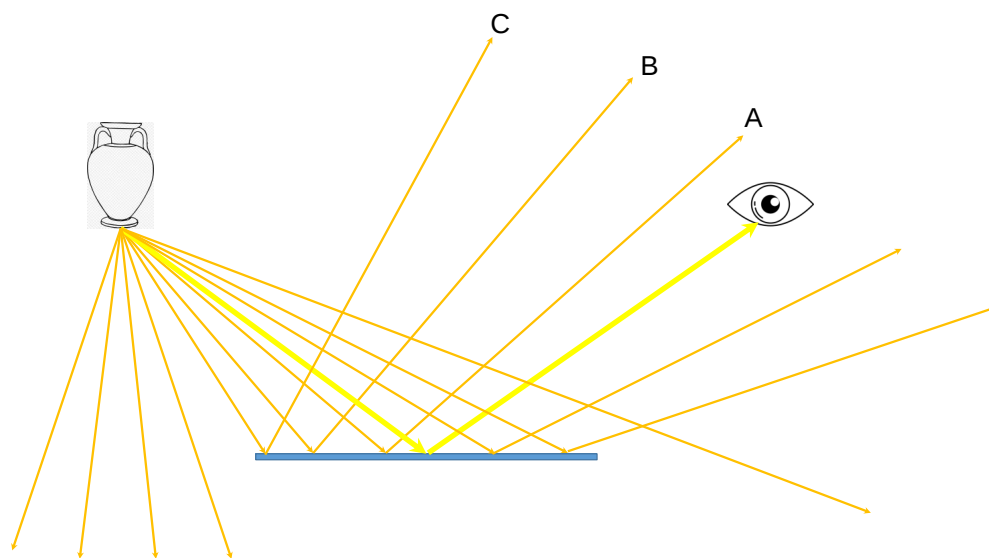
Como hemos visto, el sistema de causas finales de Aristóteles, y la fe ciega en que existe un orden y unas leyes en el universo, puso en marcha la ciencia occidental en época antigua, y alcanzó su cúspide en Alejandría.

En el siglo I d.C., en ese entorno de sabios de Alejandría, Herón investigó el comportamiento de la luz, y comprobó que un haz de luz que va de un objeto hacia un espejo, y del espejo al ojo del observador, recorre **el camino más corto posible** de todos los que puede recorrer chocando en el espejo.



En el dibujo representamos algunos de los posibles caminos que van del jarrón al ojo, rebotando en el espejo. Todos los caminos son más largos que el amarillo. El haz de luz real, por supuesto, recorrería el amarillo, que coincide que es el camino más corto de todos los representados. Herón se sorprende al comprobar que el haz de luz parece saber dónde está el ojo, antes de salir, y escoge el camino más corto para llegar hasta él.

Evidentemente, la ciencia moderna de la óptica lo explica hoy de otra manera. En realidad, son muchos los rayos de luz que realmente salen del jarrón, en todas las direcciones. Cuando chocan con el espejo, siempre lo hacen respetando la igualdad del ángulo de incidencia y el ángulo de salida, y por tanto no rebotan como en el dibujo anterior. De todos esos haces solo uno de ellos es el que llega al ojo. Se entiende bien en el siguiente dibujo:



Como vemos en el dibujo, los haces de luz se reflejan en el espejo siempre cumpliendo que el ángulo de incidencia sobre el espejo es igual al ángulo de salida. Uno de ellos llega al ojo, otros deben llegar a A, a B, a C, etc, donde no hay ningún ojo. Matemáticamente se cumple que respetar la igualdad del ángulo de incidencia y el de salida es precisamente la condición para el camino más corto. En principio quizás esto sea una casualidad. Por eso, siempre se cumple lo que Herón señaló, que la luz realiza el camino más corto cuando llega a nuestro ojo.

Si el ojo del observador se va moviendo hacia la izquierda, seguiría viendo el jarrón reflejado en el espejo, es decir vería el rayo A. Y si se sigue moviendo hacia la izquierda vería el rayo B, y el C, etc, de manera que sigue viendo el jarrón reflejado. En todos los casos el rayo que ve el observador ha realizado el camino más corto de los posibles, pero evidentemente el rayo no sabe dónde está el ojo cuando sale del jarrón, son infinitos los rayos que salen y solo uno es el que vemos, dependiendo de en qué posición nos encontremos. Pero sí es cierto que, en todos los casos y en todos los rayos representados en este segundo dibujo, **la luz recorre el camino más corto**.

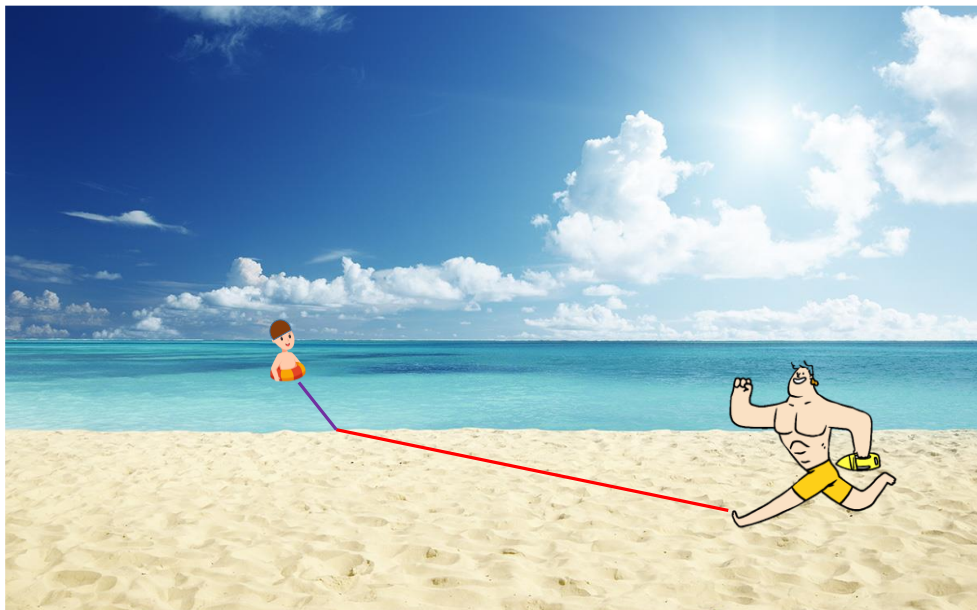
En cualquier caso, lo interesante es que la propuesta matemática de Herón funciona perfectamente y es capaz de predecir el comportamiento del haz de luz que llega hasta el ojo. De hecho, veremos a lo largo de todo este apartado que todos los fenómenos naturales se pueden explicar con un principio de “mínimo esfuerzo” o “acción mínima” como el que Herón proponía. Pero las repercusiones filosóficas serían enormes si se asumiera esa forma de reflexionar en la física ¿Significaría que las cosas tienden a un fin?

Mil setecientos años después, estas ideas resucitarán con el magnífico matemático Fermat. Este filósofo francés propuso que, en un entorno complejo lleno de refracciones y reflexiones de la luz, con espejos y cristales semi translúcidos, la luz recorrería siempre **el camino por el que tarda el mínimo tiempo posible**. Lo más increíble es que su intuición era rigurosamente cierta, y doscientos años después se demostraría que la luz cambia de ángulo al refractarse debido a que tiene diferente velocidad de propagación en medios distintos, y en efecto, cumple siempre que recorre el camino en el que tarda el mínimo tiempo posible.

Imaginemos por ejemplo que un buzo está dentro del agua y mira hacia arriba a un pájaro que está volando fuera en el aire. La velocidad de la luz en el aire es más rápida que en el agua ¿Cuál es el camino que tomaría el rayo de luz?



Curiosamente la luz vuelve a tomar ¡el camino más rápido! En este caso el amarillo. La velocidad de la luz en el aire es mayor que la velocidad en el agua, por eso la luz no recorre ahora el camino directo (camino negro en el dibujo). Dado que el camino en el aire es más rápido, recorre más espacio en el aire, y al entrar en el agua hace un quiebro para que el camino por el agua sea más corto. En realidad, es lo mismo que hacen los socorristas cuando quieren salvar a alguien que se está ahogando en la playa.



El socorrista corre mucho más rápido que lo que nada. Por eso corre por la arena todo lo que puede (camino rojo en el dibujo), acortando mucho el camino que deben nadar (camino morado), de manera que intentan encontrar el camino que menos tiempo le llevará para alcanzar a la persona en apuros.

Esto sí empieza a ser ahora más misterioso. Que este camino lo escoja el socorrista lo entendemos perfectamente, pero que lo escoja la luz es un poco raro.

Aunque Fermat tenía razón y lo que dijo era exacto, su propuesta, evidentemente, no fue muy bien recibida en 1.662. En esta época Descartes ya había iniciado el ataque a las causas finales.

"Todo ese género de causas que se obtienen habitualmente del fin no tiene ningún uso en las cosas físicas y naturales" (Descartes).

Los ataques que recibió Fermat a su propuesta pueden resumirse en estos comentarios del cartesiano Clerselier:

"El principio de Fermat no puede ser la causa, pues de lo contrario estaríamos atribuyendo conocimiento a la naturaleza: y aquí, por naturaleza, entendemos sólo que el orden y la legalidad en el mundo, tal como es, que actúa sin conocimiento previo, sin elección, sino por una determinación necesaria" (Clerselier).

La verdad es que lo que le respondieron a Fermat nos suena a nosotros, habitantes del siglo XXI, bastante lógico, ¿cómo puede saber la luz que su velocidad va a ser menor en el agua y por tanto ahorrar tiempo trazando un camino más largo en el aire y uno más corto en el agua? A ver, que esto lo sepa hacer el socorrista se entiende, ¿pero el fotón como lo va a saber si aún no ha entrado en el agua ni sabe hacia dónde se dirige?

Y, sin embargo, misteriosamente, Fermat tenía razón, y el camino que **"escoge"** la luz es el que consigue realizar en **un tiempo mínimo**.

Casi un siglo después Maupertuis sigue profundizando en este misterio de la acción mínima. En 1744 lo aplicó al movimiento de los cuerpos. El tipo de movimiento que realiza cualquier cuerpo al chocar con otro es el que hace mínimo el valor de mvs (masa x velocidad x espacio recorrido). Maupertuis consideraba que el principio de acción mínima se cumplía **en todos los fenómenos de la naturaleza**, en realidad:

"Es un principio verdaderamente universal, del que parten estas leyes, que se verifica en el movimiento de los cuerpos duros, de los cuerpos elásticos, de la luz y de todas las sustancias corpóreas" (Maupertuis).

*“Todos los fenómenos de la refracción concuerdan ahora con el gran principio de que la Naturaleza en la producción de sus efectos, actúa siempre por las vías **más simples**”* (Maupertuis).

Esta ley la conocemos popularmente como “la ley del mínimo esfuerzo”. La corriente eléctrica circula por el camino de menor resistencia, el agua se mueve por el camino de máxima pendiente, los cuerpos golpeados se mueven en línea recta, los estados atómicos de mayor energía tienden hacia los de menor energía, que son los estables, etc.

Cuando se habla del principio de acción mínima de Maupertuis, un ejemplo habitual es considerar que, cuando dejamos caer una piedra desde un puente, cae por el camino más recto posible. Pero cuando el portero golpea la pelota con el pie y la envía al otro campo, claramente la pelota no está recorriendo un camino recto, sino parabólico ¿se cumple también en este caso el principio de acción mínima?

¿No os recuerda todo esto a lo que hemos visto en el capítulo de relatividad? Recordad que decíamos que la pelota que lanza el portero, y que traza una trayectoria parabólica, está recorriendo en realidad una línea geodésica en el espacio-tiempo deformado por la gravedad terrestre, ¡y vimos que precisamente la geodésica era el camino más corto posible en el espacio-tiempo! **¡luego la pelota está recorriendo el camino más corto posible!**, pero en un espacio-tiempo deformado.

Está claro que hay algo simple y bello en esta forma de entender el comportamiento natural. El propio Einstein lo expresa así:

“Si la naturaleza nos conduce a formas matemáticas de gran simplicidad y belleza que nadie ha hallado anteriormente, no podemos dejar de pensar que son «ciertas», que nos descubren una característica real de la naturaleza. [...] Puede usted objetarme que, al hablar de simplicidad y belleza, introduzco criterios estéticos de verdad, y yo admito con toda franqueza que estoy muy influenciado por la simplicidad y la belleza de los esquemas matemáticos con los que la naturaleza se presenta ante nosotros” (Einstein).

Euler consideraba que este principio de acción mínima era aún más universal que las leyes de Newton porque parecía cumplirse en cualquier fenómeno de la naturaleza:

*“Ni una ni otra puede pasar por un principio universal. Después de que tantos grandes hombres han trabajado sobre esta materia, casi no me atrevo a decir que he descubierto el principio universal sobre el cual están fundadas **todas las leyes**.*

Es el principio de mínima cantidad de acción, principio tan sabio, tan digno del Ser Supremo y al cual la naturaleza parece tan constantemente vinculada, que lo observa no solamente en sus cambios, sino que en su permanencia aún tiende a observarlo” (Euler).

El principio de acción mínima ha sido clave en el desarrollo de las formulaciones matemáticas en la relatividad general, como vamos a ver.

Entre 1772 y 1778 Lagrange reformuló la mecánica clásica de Newton. El principio de acción mínima le permitió **simplificar** las fórmulas y facilitar mucho los cálculos. Todo el trabajo que realiza es tan elegante que Hamilton lo describió como “un poema científico”.

Aunque no es excesivamente complicado, no vamos a describir el detalle matemático de la fórmula de Lagrange. En realidad, lo que hizo es definir una variable que él llamó “Lagrangiano” (L) y descubrió que cualquier mecanismo cumplía siempre que $\int L dt$ **es un mínimo**.

Hamilton lo generalizó todo aún más. Se dio cuenta de que los cuerpos cargados tienden a descargarse, los muelles buscan su posición de equilibrio, etc. Cualquier proceso de la naturaleza se debía de poder expresar matemáticamente con el principio de **acción mínima**. Definió las ecuaciones en función de un nuevo concepto que se llamó Hamiltoniano.

En determinadas condiciones simplificadas, las fórmulas del sistema hamiltoniano han resultado equivalentes a **la conservación de la energía**. Hoy en día consideramos como algo totalmente natural que la energía se conserve en cualquier proceso, pero en realidad es algo muy extraño. Lo cierto es que, sin duda, la ley de conservación de la energía **simplifica muchísimo** los problemas de física, porque cuando decimos que la energía cinética + la energía potencial debe ser constante, podemos calcular el estado final del sistema **¡sin necesidad de conocer nada de lo que ha ocurrido entre el estado inicial y el final!**

Por ejemplo, si yo tengo una pelota a una altura h_1 y la lanzo con una velocidad v_1 (en realidad me da igual incluso la dirección en la que la lance), puedo calcular la velocidad v_2 que llevará la pelota cuando llegue al suelo, **sin necesidad de conocer nada de su trayectoria**. Porque siempre cumplirá esto:

$$mgh_1 + \frac{mv_1^2}{2} = mgh_2 + \frac{mv_2^2}{2}$$

El premio nobel Richard Feynman expresa esta extraña ley de la conservación de la energía del siguiente modo:

*“Hay un hecho, o si prefiere una ley, que gobierna todos los fenómenos naturales conocidos hasta la fecha. No se conoce excepción a esta ley —es exacta hasta donde sabemos—. La ley se llama la conservación de la energía. Establece que hay cierta cantidad que llamamos energía, que no cambia en los múltiples cambios que ocurre en la naturaleza. Esta **es una idea muy abstracta, porque es un principio matemático**; significa que hay una cantidad numérica que no cambia cuando algo ocurre. No es la descripción de un mecanismo, o de algo concreto; ciertamente es un hecho **raro** que podamos calcular cierto número y que cuando terminemos de observar que la naturaleza haga sus trucos y calculemos el número otra vez, éste será el mismo”* (Feynman).

Cuando estudiábamos física en la escuela estábamos deseando que el problema que nos ponían en el examen pudiera resolverse por conservación de la energía, a través del cálculo de energía inicial y final porque, sin duda, era la manera más fácil de resolverlo. Es decir, lo resolvíamos en base a causas finales siguiendo la hipótesis de que el sistema evolucionaría siempre conservando su energía. Nos era indiferente lo que hubiera ocurrido a lo largo de cada instante entre el momento inicial y final. Pero si no era posible calcularlo por energías, debíamos analizar cada movimiento del sistema, instante a instante, a través de integrales complicadas, es decir, debíamos resolverlo con el cálculo de las causas eficientes en cada instante, un proceso mucho más complicado.

La ciencia física moderna, cuando considera que un término llamado “energía” es constante en todo el universo, es en realidad, **platónica**. De algún modo, en algún sitio, está “escrita” o fijada matemáticamente, de alguna manera, la energía total del universo, y ese término platónico se mantiene estable e inmutable a lo largo de los eones del tiempo. Es como si alguien llevar la contabilidad de cada proceso que se produce, cuánta energía se convierte en energía química, cuánta en energía térmica, cuánta en energía eléctrica, ... y en todo momento, la energía debe permanecer constante ¿dónde quedan registradas esas cuentas?

Te resultará sorprendente saber que el término “energía” solo comenzamos a aplicarlo para la ciencia en el siglo XIX. Fue Young quien en 1802 comienza a utilizar este término por primera vez y define su concepto. De hecho, si volvieras al pasado y le dijeras a Napoleón que debía ahorrar energía en los esfuerzos logísticos de esa batalla, no tendría ni la más remota idea de a qué te estás refiriendo. La palabra es en realidad de origen griego y aparece por primera vez en la obra “ética a Nicómaco” de Aristóteles, y se refiere a la actividad para la que está capacitado algo. Por ejemplo, el sistema digestivo está capacitado para comer, ese es su fin, y por eso comer produce placer. Exactamente igual ocurriría, según Aristóteles, con el sistema reproductivo, etc.

Cada persona sería feliz si se dedica a aquellas actividades para las que está capacitado (diseñado).

Cuando Young incorpora en 1802 el término energía $E = \frac{mv^2}{2}$ abrió un camino realmente fructífero para la ciencia. Fue tan enorme su repercusión que hoy, algo más de dos siglos después, todo el mundo habla corrientemente de *las energías*, la mayoría de ellos sin saber muy bien qué están diciendo.

En la complicada ciencia contemporánea actual, las formulaciones lagrangianas y hamiltonianas, basadas en el principio de acción mínima, han resultado ser más transferibles a los marcos de la relatividad general y de la mecánica cuántica que la teoría mecanicista de Newton, y son una herramienta matemática increíblemente poderosa por su simplicidad. Todo esto realmente hace cuestionarse a los científicos si el principio de acción mínima no estará dándonos pistas sobre un aspecto profundo de la naturaleza.

El propio Planck consideraba que el principio de acción mínima expresaba mejor el comportamiento de la naturaleza que el sistema mecanicista. Esto querría decir que es más acertado pensar que la naturaleza se comporta en base a fines, que basada en un comportamiento mecánico de concatenación de causas eficientes.

A lo largo del siglo XX los éxitos de este principio de acción mínima no han dejado de aparecer. Hilbert descubrió la forma final de las ecuaciones de la relatividad de manera distinta que el propio Einstein, pero mucho más simple, con una simple integral de acción mínima.

R. Feynmann y John Wheeler desarrollaron una teoría que explicaba el comportamiento de las partículas cargadas eléctricamente **¡en función de su interacción con partículas en el pasado y en el futuro!**, ¿es posible que las partículas del futuro interaccionen con las del pasado? Esto que parece totalmente extraño, tiene cierto sentido si lo contemplamos en base a causas finales. Tener una bonita casa construida (futuro) es la causa final de que me hubiera puesto a talar árboles (pasado).

Para terminar, y como preámbulo al gran desafío de la mecánica cuántica, dedicamos un breve apartado a la relación causa final-significado.

La causa final y el significado

Finalizamos este apasionante capítulo con una brevísima reflexión sobre el significado de las cosas, que está muy relacionado con la causa final de ellas. Como ya podéis observar, a mí me apasiona la ciencia. Sin embargo, tengo que reconocer que, a mi entender, el científico peca de tener una visión excesivamente **miope** de las cosas. Me da la impresión de que, a la ciencia, al limitar su esfera de conocimiento exclusivamente a lo que puede entrar en el método científico, se le escapan muchas cosas que a un niño pequeño no se le escapan.

Por ejemplo. Si a un científico le colocamos delante del cuadro de “Las Meninas”,



y le preguntamos ¿qué ves?, quizás podría respondernos algo así:

- Científico: “Se trata de un cuadro de 3,18 m x 2,76 m que contiene restos de pinturas sobre un lienzo. Las pinturas son mayoritariamente de un color oscuro. Los diferentes colores, por los análisis químicos realizados, podemos afirmar que se han obtenido a partir de... etc...”

Y el niño le diría “¿pero de verdad no ves al perro y a las niñas?”

- Científico: “No veo en la sala ningún perro ni ninguna niña”.

Y el niño insistiría ¡pero es evidente que lo que hay en el cuadro es un perro y unas niñas!

- Científico: “Insisto en que aquí en esta sala no hay ningún perro, ni ninguna niña, y muchísimo menos en el cuadro porque es imposible, dado que cualquier perro o cualquier niña tiene un cuerpo tridimensional, mientras que el cuadro es plano”.

Curiosamente ningún animal es capaz de ver en ese cuadro a las niñas, ni al perro. Esa capacidad está solo reservada a aquellos seres con una visión poética de las cosas.

“He aquí mi secreto. Es muy simple. No se ve bien sino con el corazón. Lo esencial es invisible a los ojos” (El Principito. Antoine de Saint-Exupéry)

El mismo ejemplo podemos hacerlo para el análisis de una novela, o de una canción. El científico podría analizar las frecuencias, los tipos de sonidos, qué instrumentos los han podido producir, etc, pero la canción hay que escucharla, y aún mejor, ¡bailarla!

Cuando la ciencia estudia el universo, la vida, o al ser humano, hace un análisis excesivamente reduccionista. Cuando la ciencia habla de conceptos como “la belleza” es de lo más lamentable que puede uno escuchar. Tampoco es capaz de hablar de las intenciones de una persona, ni puede hablar de su responsabilidad, ni de su valentía, ni de su egoísmo, etc. La intención de alguien solo la conoce ese alguien, y por tanto no podemos analizar el concepto *intención* en el método científico. De hecho, la ciencia no puede llegar a reconocer aún que una persona es libre, que tiene voluntad propia, de manera que la intención queda descartada del método científico.

Me da la impresión de que la ciencia mira al hombre y al universo como el científico mira el cuadro de Las Meninas en el ejemplo anterior. Por supuesto, la ciencia debe seguir haciéndolo de esta manera si quiere seguir siendo ciencia ¡y debe seguir siéndolo! Pero cada uno de nosotros, como personas, tengamos en cuenta las enormes limitaciones inherentes al instrumento humano que llamamos *ciencia*. Cuando miramos a través de un filtro rojo, no somos capaces de detectar las cosas rojas. Si queremos conocer la realidad, debemos saber que la ciencia **tiene sus filtros reduccionistas**, y hay muchas cosas que no nos puede solucionar, ni nos puede mostrar.

El científico se pega demasiado al cuadro de las meninas cuando lo analiza tan en detalle. Hace falta separarse un poco del cuadro para poder distinguir a las niñas y al perro, hace falta escuchar en silencio la canción para poder disfrutarla, hace falta *leer* la novela de los hermanos Karamazov para poder entenderla.

Cuando pensamos en la naturaleza, el universo, o en el hombre, mirémoslo un poco más de lejos, escuchemos, leamos entre líneas, observemos con ojos de niño. Creo que esta visión poética es una forma complementaria a la visión científica, y es absolutamente imprescindible.

*“Ni la inteligencia geométrica ni el razonamiento filosófico permiten al hombre llegar por sí solo a una «visión clara» del mundo y de sí mismo. El que está ocupado en los detalles de sus cálculos no tiene la ventaja de la **visión de conjunto** que le permite “ver todos los principios”. Esto es el resultado de la «inteligencia intuitiva», cuyos méritos también alaba Pascal, porque cuando se busca captar la realidad «hay que ver la cosa **de golpe, de una sola mirada**». [64] Esta inteligencia intuitiva está conectada con lo que Pascal llama el “corazón”: «Conocemos la verdad, no solamente por la razón, sino también por el corazón. De esta última manera es como conocemos los primeros principios y es en vano que el razonamiento, que no tiene ninguna parte en ello, trate de combatirlos». (Sublimitas et miseria hominis. Francisco I. 19/06/2023. Cuarto centenario del nacimiento de Pascal) .*

“Insisto en que el misterio del hombre se ve increíblemente disminuido por el reduccionismo científico y su pretensión materialista de llegar a rendir algún día cuentas del mundo del espíritu en términos de actividad neuronal. Semejante creencia no puede ser considerada sino como una superstición”. (John Eccles. Premio Nobel de medicina. 1963).

“Me parece indispensable cuestionar con rigor la concepción materialista y reduccionista de la naturaleza y del espíritu humano, concepción supuestamente derivada de la actitud objetiva y analítica actualmente predominante en las ciencias del cerebro y del comportamiento. (...) Sospecho que hemos sido engañados y que la ciencia vendió a la sociedad y así misma únicamente baratijas y chatarra” (Roger Sperry. Premio Nobel de medicina. 1981)

A lo largo de todo este capítulo hemos tratado de hacer una revisión de algunos aspectos misteriosos de las matemáticas y la física. Muchos de estos misterios se han relacionado de alguna manera con el hombre. Vimos que el universo tuvo un comienzo que permite que las cosas “existan”, cuando lo lógico sería que nada existiera, la segunda ley de la termodinámica tiene relación con la manera en que entendemos los seres humanos el orden, vimos que las leyes naturales y las condiciones iniciales del Big Bang parecen diseñadas para que exista la vida, hemos visto que el hombre es capaz de captar o intuir verdades matemáticas que no es posible demostrar en un sistema lógico y que, sin embargo, son verdaderas (teorema de Gödel), hemos estudiado como la ciencia actual trabaja en el día a día con las causas finales.

Creo que ya estamos preparados para adentrarnos en el país de las maravillas. Entraremos enseguida en la mecánica cuántica, un lugar donde el hombre puede resultar ser más importante de lo que se pensó en un inicio, quizás sea incluso pieza clave en la *realidad* del universo.

Por otra parte, durante el descanso, que sin duda os tomaréis ahora, y que os habéis ganado, y antes de entrar en la mecánica cuántica, reflexionad acerca de la siguiente pregunta filosófica. Ojo, que no es evidente en absoluto “¿*realmente podría existir un universo sin habitantes conscientes?*”

Lo pregunto mejor de otra forma

“¿Existe realmente algo, si nadie ha sido consciente de su existencia nunca jamás?”

La inmensa mayor parte de los ciudadanos occidentales actuales responderían que no hay ninguna relación entre ser consciente de la existencia de algo, con su existencia o no. Por ejemplo, dirían, una galaxia lejana, que nadie ha visto hasta ahora, puede existir perfectamente, aunque nadie la haya visto jamás, o un animal en el fondo del océano que nadie ha visto hasta ahora, puede existir perfectamente ¡obviamente! Otro ejemplo; es evidente que los trilobites y los dinosaurios existieron cuando no había ningún habitante consciente que los viera ¿o es que sólo pasaron a existir en el siglo XIX y XX cuando el científico fue consciente y demostró que habían existido? Sería absurdo pensar algo así.

Sin embargo, algunos de los más importantes filósofos de la historia moderna del pensamiento occidental (siglos XVII, XVIII y XIX) dirían que la realidad no puede existir sin un espíritu, sin un sujeto que los perciba. **La realidad es la interacción entre objeto-sujeto.**

La cadena clave de filósofos que soportan esta forma de pensar, para aquel que quiera profundizar, es Berkeley- Kant- Fichte – Schelling – Hegel.

Reflexiona por un momento ¿qué tipo de realidad tienen las cosas materiales, si nadie consciente las ve, si nadie es **consciente** de su existencia? Profundizaremos en todo esto en el próximo capítulo porque la mecánica cuántica ha logrado poner en jaque todo nuestro sentido común.

Para terminar, una pequeña broma irónica al gran Copérnico:

El hombre ocupa, evidentemente, el centro geométrico del universo observable.

Miremos donde miremos, vemos galaxias lejanísimas, y las más lejanas que somos capaces de ver están todas a la misma distancia, miremos donde miremos.

Igual que cuando estamos perdidos en el inmenso mar, estamos en el centro geométrico del ancho mar que divisamos, porque todo lo que vemos en el lejano horizonte, en todas las direcciones, estaría a la misma distancia.

*Por tanto, es evidente que **estamos exactamente en el centro del universo observable.***

¿Y lo que no es observable? Sobre eso no podemos decir gran cosa...

2. APÉNDICE. CÁLCULO DE LA ENTROPÍA DE UN AGUJERO NEGRO. HAWKING.

Este apéndice no es importante leerlo. Solo lo incluyo para aquellos que quieran entender mejor el cálculo que hizo Roger Penrose para determinar el número de opciones distintas posibles que tuvo “el creador” para elegir tan ajustadamente las condiciones iniciales del universo. Cuando explicamos esto quedó pendiente una explicación más detallada de como Hawking calculaba la entropía de un agujero negro.

En 1970 Bill Unruh demostró que, si estamos en una caja en el espacio vacío, sin gravedad, y sin aire, la temperatura sería 0°K. Si alguien tira de la caja hacia arriba con una aceleración, entonces la temperatura dentro de la caja se incrementaría ligeramente (debido a efectos cuánticos). ¿cómo es posible que haya temperatura si no hay partículas en el espacio vacío?

La explicación es que, en todo momento, en cualquier punto del universo, existe el potencial de que se generen partículas y antipartículas (por ejemplo, electrones y positrones). Pero como ambas se aniquilan, es totalmente indetectable. Pero si aceleramos la caja en el espacio, es posible que algunas de esas partículas queden en un lugar inalcanzable por la antipartícula, y entonces, durante un brevísimo lapso de tiempo, tenemos una partícula vibrando por ahí... Es un fenómeno cuántico que quizás entendamos mejor en el próximo capítulo.

La explicación es que una pequeñísima parte de la energía que hemos imprimido a la caja se convierte en temperatura de partículas vibrantes que han aparecido **de la nada**.

Esto mismo puede ocurrir en la frontera de un agujero negro, donde la inmensa gravedad equivale a fortísimas aceleraciones. En la superficie del agujero negro, como en todos sitios, existe el potencial de crearse partículas y antipartículas. Pero justo en el horizonte, alguna partícula puede quedar del lado de fuera del agujero negro, y su antipartícula del lado de dentro, de manera que, durante un breve lapso de tiempo, esa partícula vibra por ahí, al ras del horizonte del agujero negro.

Hawking, a partir de aquí, pudo calcular la temperatura que tenía un agujero negro en su superficie debido a su gravedad, y demostró que la temperatura era inversamente proporcional a su masa. Es decir, los agujeros negros más pequeños están más calientes en su superficie.

Como estas partículas en vibración están a una determinada temperatura, aunque rozando el cero absoluto, emiten energía, porque todo lo que tiene temperatura emite energía. Esta es la llamada radiación de Hawking.

Como vimos que la energía y la masa se relacionan íntimamente ($E = mc^2$), resulta que el agujero negro ¡debe perder masa! Esto es lo que llamamos *evaporación del agujero negro*.

Según va perdiendo masa el agujero negro, se incrementa su temperatura (ya hemos dicho que la temperatura del agujero negro es inversamente proporcional a su masa). Se va por tanto evaporando poco a poco, va reduciendo su masa, y se va haciendo más caliente

¿Puede llegar a desaparecer?

En realidad, el proceso es tan lento que un agujero negro de la masa solar tardaría 10^{60} veces la edad del universo en evaporarse.

Ahora, para poder llegar a las asombrosas conclusiones de Penrose y Hawking debemos comenzar a hablar de la entropía de los agujeros negros.

Ya sabemos que la entropía es una medida del desorden de las partículas. Un gas a alta temperatura tiene una gran entropía porque sus partículas se mueven muy rápida y aleatoriamente (muy desordenadamente). Cuanto mayor es la temperatura del gas, mayor es su entropía.

En el caso de un agujero negro, tendremos más entropía cuantas más partículas vibrando tengamos. Y esto sucede a lo largo de toda la frontera del agujero negro. Cuanto mayor sea su superficie, mayor será la entropía. Es decir, aunque un agujero negro grande está más frío que uno pequeño, tiene más entropía, porque tiene más superficie.

Hawking también demostró que cuando dos agujeros negros se fusionan, la superficie del agujero negro resultante es mayor que la suma de la superficie de los dos. Es decir, cuando dos agujeros negros se fusionan incrementa la entropía del universo.

Debemos imaginarnos los agujeros negros como “la nada” en la película de “La historia interminable”. Es algo que, irremisiblemente, va absorbiendo toda la materia, y cada vez se hace más grande. Es además el mayor desorden posible y el más irreversible.

Ya vimos que cuando un vaso de cristal se ha roto en mil pedazos, se ha incrementado el desorden y además en un proceso irreversible.

Y vimos también que, precisamente, el hecho de tener un punto brillante en el cielo oscuro (el sol), es el milagro que ha hecho posible la vida, porque es una fuente de energía ordenada (de baja entropía).

Cuando un agujero negro absorba al sol, aumentará la entropía, y será irreversible para siempre.

La fórmula de la entropía del agujero negro, si consideramos que no rota, fue obtenida por Hawking, y como hemos dicho, es proporcional a su área:

$$S = \frac{A}{4hG}$$