

El origen del Universo: luces y sombras

por **D. Bruno Escoubès**

*Conferencia pronunciada
el 30 de enero de 1996*

Forum Deusto

El origen del Universo: luces y sombras

por D. Bruno Escoubès*

Introducción: la búsqueda permanente de los orígenes

Desde los albores de la humanidad, el hombre quiso conocer sus orígenes, quizá para dar sentido a su vida. El conocimiento precientífico iba a la par con una visión mítica del mundo. Los monumentos megalíticos, como el de Stonehenge¹ (2400 AC), parecen ser a la vez un observatorio para medir el año sideral y un santuario para el culto solar.



1. Stonehenge

* Bruno Escoubès nació en Ginebra (Suiza), aunque posee nacionalidad francesa. Obtuvo la licenciatura en Ciencias Físicas por la Universidad de Grenoble (1961), completó la tesis de Tercer Ciclo en Paris-Orsay (1965), y obtuvo el doctorado de Estado también en París-Orsay en 1971. Escoubès ha desarrollado su carrera de investigador en Física de Altas Energías en el CERN de Ginebra entre 1962 y 1964, en la Junta de Energía Nuclear (hoy CIEMAT) de Madrid entre 1964 y 1970, y desde 1971 en el Centre de Recherches Nucléaires de Estrasburgo. Ha investigado y publicado numerosos artículos sobre física de altas energías, y con sus conferencias ha contribuido a la difusión de la cultura científica. Actualmente trabaja en la física de los rayos cósmicos.



2. La tumba de Tutankamon

También para los egipcios² el culto al Sol se acompañaba de observaciones destinadas a fijar las épocas de siembra y de cosecha.

Los aztecas³, un poco más brutos, sacaban el corazón palpitante de sus reos creyendo de esta manera ofrecer a sus dioses la energía necesaria para la re-creación permanente del Universo.



3. Sacrificio azteca

I. Los griegos

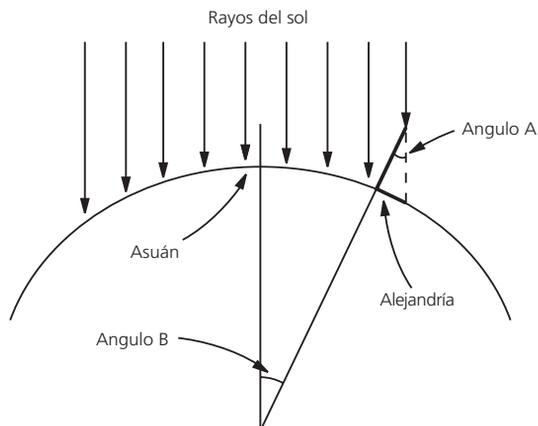
Pero fueron los griegos los inventores de las matemáticas como representación de los principios permanentes del mundo. Fueron los primeros en practicar la filosofía como especulación científica sobre la naturaleza de las cosas, los cuerpos celestes, el Universo, desarrollando a la par su propio imaginario mítico, religioso y artístico.

1. La Escuela de Mileto y los pitagóricos

Tales fue uno de los primeros en enunciar la idea de una *sustancia primordial* constituyente de todas las cosas. Para él era el agua. Para Anaxímenes, el aire: el fuego era el aire rarefacto, el agua el aire condensado, y a su vez el agua condensada daba las piedras. Anaximandro veía el mundo compuesto de una proporción definida de los cuatro elementos: aire, fuego, tierra y agua. Esta proporción varía con los objetos, y está reglamentada por una fatalidad: idea precursora, según algunos filósofos, de la noción de ley de la naturaleza.

Para Pitágoras, «*Todas las cosas son números*», afirmación que aflorará de manera recurrente en toda la historia de la física, con Galileo, Newton, Maxwell, Einstein, Dirac, hasta los físicos teóricos de hoy creadores de modelos de unificación de las fuerzas: las matemáticas están en el corazón de la realidad.

Un discípulo de Pitágoras, Eratóstenes, aplicó un razonamiento puramente geométrico para estimar la circunferencia de la Tierra⁴.



4. El cálculo de Eratóstenes

Su resultado (~40.000 km) era mucho más preciso que el que sirvió a Cristóbal Colón para convencer a la reina Isabel de apadrinar su expedición (25.000 km).

Midiendo el ángulo A a partir de la longitud de la sombra en Alejandría, Eratóstenes dedujo, de la igualdad entre los ángulos A y B, que la distancia angular entre Asuán y Alejandría era de 7°.

Mandando medir la longitud del camino entre estas dos ciudades (~800 km), estimó la circunferencia de la Tierra en unos $(360^\circ/7^\circ) \times 800 \sim 40.000$ km.

Frente a Parménides, que pensaba «*todo movimiento es una ilusión*», podemos citar a Heráclito, para quien todo nace de la muerte de algo: «*Los seres mortales son inmortales, los inmortales mortales, el uno vive de la muerte del otro y muere de la vida de otro*». En la física de hoy, la aniquilación materia-antimateria [como la experimentada en el CERN en el «Large Electron Positron collider», LEP] da lugar a partículas del tipo del fotón (grano de luz), que también muere en un par e^+ , e^- .

2. El atomismo de Lisipo y Demócrito

En lugar de una sustancia primordial continua, Lisipo y Demócrito ven «*todas las cosas compuestas de átomos en movimiento incesante en el vacío*». Son los precursores del atomismo: además, su filosofía es determinista: «*nada ocurre al azar*».

En su célebre poema, al final del siglo I AC, Lucrecio describe los «*átomos*», y su concepción es mecanicista: no cree en fuerzas teleológicas, finalistas.

Este enfoque ha sido fructífero. Permitió en varias ocasiones pasar

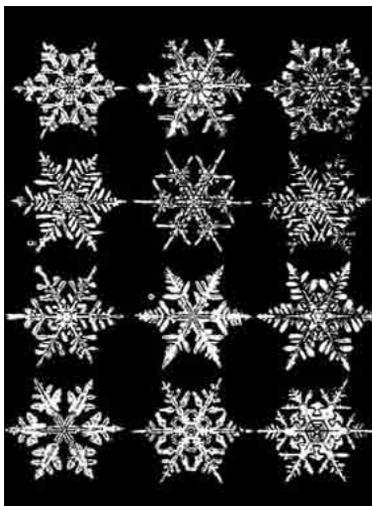
de la **complejidad aparente:** a la **invisible sencillez:**

- | | |
|----------------|-----------------------------------|
| —la naturaleza | —los elementos |
| —los elementos | —la clasificación periódica |
| —los isótopos | —los núcleos de sus átomos |
| —el núcleo | —los nucleones (protón y neutrón) |
| —los nucleones | —los quarks |

3. Platón, Aristóteles y Tolomeo

Como para Pitágoras, la matemática para Platón describe el mundo. Las reflexiones, no las percepciones, son el conocimiento. Es la teoría de las ideas.

La naturaleza ofrece ejemplos de «realidades» calcadas sobre perfecciones tan abstractas como las simetrías⁵.



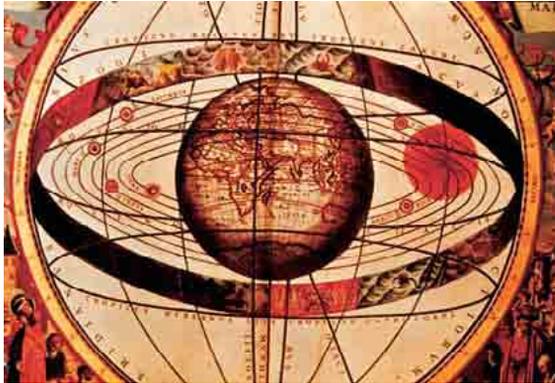
5. Copos de nieve (extracto del libro de Herman Weyl)

Las simetrías van a desempeñar un papel esencial en la física moderna: la concepción de Platón no ha perdido actualidad.

La física de Aristóteles, por el contrario, es esencialmente cualitativa y basada en las percepciones, pero ha producido la filosofía de la naturaleza más coherente y completa de la época antigua.

Y fue con respecto a ella como los físicos del Renacimiento pudieron avanzar, quizá por la ambición de Aristóteles de explicarlo todo.

Por ejemplo, distinguía entre el mundo perfecto de los cuerpos celestes y el mundo corrompido sublunar. Para él, la fuerza era proporcional a la velocidad, descripción más conforme al sentido común, a la experiencia de un niño, por ejemplo. Mientras los movimientos terrestres son teleológicos, cada cuerpo tendiendo a ocupar un sitio privilegiado («la naturaleza tiene horror al vacío»), los movimientos celestes son regulares y eternos.



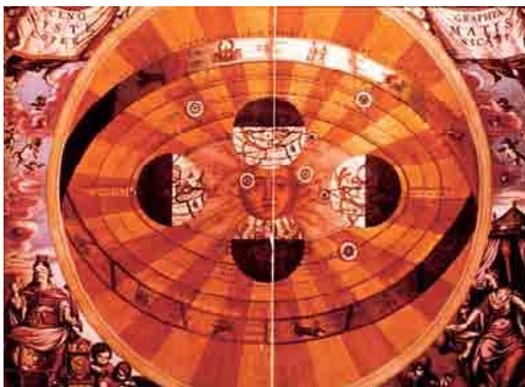
6. El cielo según Tolomeo

Tolomeo modeló en su célebre sistema geocéntrico todos los resultados de su tiempo sobre los movimientos celestes⁶.

II. De Copérnico a Maxwell

1. Copérnico, Kepler, Galileo y la mecánica

En 1543 Copérnico abolió el geocentrismo⁷. Kepler, utilizando las numerosas observaciones de Tycho Brahe, puso fin a la jerarquía de las esferas del cosmos de Aristóteles.

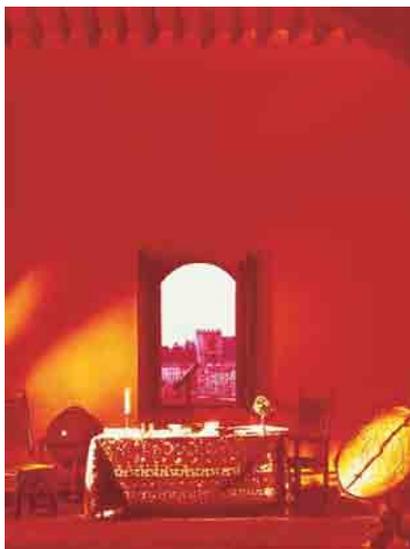


7. El cielo según Copérnico

Durante toda su vida intentó describir la estructura del sistema solar utilizando los 5 sólidos regulares ya mencionados por Platón —el cubo, el tetraedro, el dodecaedro, el icosaedro y el octaedro—, suponiendo que los 6 planetas entonces conocidos se desplazan sobre la superficie de las 6 esferas inscritas y circunscritas en los 5 sólidos citados⁸.



8. Las esferas de Kepler



9. El gabinete de trabajo de Galileo en Florencia

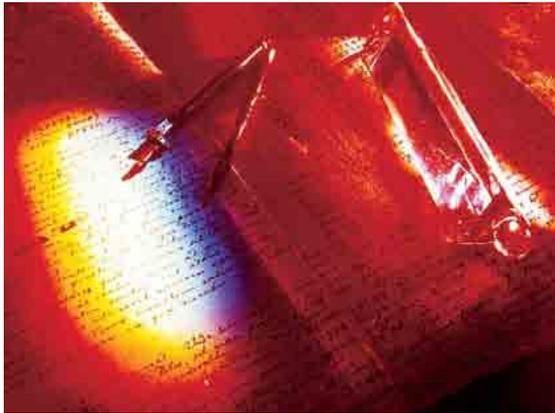
Pero por fin descubrió que las trayectorias de los planetas eran elipses, y no círculos, y encontró las leyes de su movimiento. Y a pesar —o quizá a causa— de su visión mística del Universo, liberó el sistema solar de los epiciclos de Tolomeo, donde estaba atenazado desde hacía 13 siglos.

Galileo⁹ hizo desaparecer la distinción entre movimientos celestes y movimientos terrestres: «*las leyes físicas son universales*». Introdujo el concepto de *inercia* —la fuerza es proporcional a la aceleración, no a la velocidad—. Con lo cual unifica también las leyes del movimiento y del reposo. Populariza además el uso del anteojo astronómico, lo que permite a cualquiera ver que la luna también tiene montañas y valles... y, claro está, hace accesible la teoría heliocéntrica de Copérnico a los legos, lo que crea así los problemas con la Iglesia que ustedes recordarán seguramente.

2. Newton, la gravitación universal y la óptica

La tercera unificación, hecha por Newton, es capital: la igualdad de la fuerza con la variación de la cantidad de movimiento da cuenta *tanto* de la caída de la manzana *como* del movimiento de la Luna alrededor de la Tierra y de los planetas alrededor del Sol.

También analiza Newton el fenómeno de la dispersión de la luz por un prisma¹⁰: el espectro obtenido (las rayas de colores fundamentales) es característico de la materia que compone el Sol. Estudiando los espectros emitidos por los astros y comparándolos con los espectros de los elementos, se podrá llegar, a partir de la mitad del siglo XIX, a conocer la composición química de las estrellas, haciendo mentir a Auguste Comte, el positivista francés, que aseguró que nunca se podría saber de qué están hechas las estrellas, puesto que nunca podremos pisarlas, y que nunca podremos llegar a examinar un trozo de ellas.



10. Escritos de Newton a través de la luz descompuesta por un prisma

En su *Optica*, incorpora Newton a su sistema los conceptos atómicos¹¹. La mecánica de Newton será la base de la física hasta el descubrimiento de la mecánica cuántica en 1925. Durante el siglo XIX tuvo un éxito asombroso: véase por ejemplo el descubrimiento de Neptuno por Le Verrier, que calculó su posición a partir de las irregularidades de la trayectoria de Urano (descubierto un siglo antes por Herschel, el astrónomo-músico que se pasó la vida construyendo telescopios y con-

tando estrellas, con lo cual se quedó ciego), e indicó al astrónomo Gall dónde tenía que mirar para verlo¹².

All these things being consider't, it seems probable to me that God in the beginning form'd Matter in solid, massy, hard impenetrable, moveable Particles, of such Sizes and Figures, and with such other properties, and in such Proportion to Space, as most conduced to the End for which He formed them; and that these primitive Particles being Solids, are incomparably harder than any porous bodies compounded of them; even so very hard, as never to wear, of break in pieces; no ordinary Power being able to divide what God Himself made one in the first creation.

11. Cita de la Óptica de Newton



12. Descubrimiento de Neptuno por Le Verrier y Gall

En la constante lucha entre el enfoque continuo y el discontinuo de la naturaleza, ganó puntos el atomismo con los trabajos de los químicos, y del gran Boltzmann: su interpretación atomicista de la termodinámica, la famosa teoría cinética de los gases, se impuso a pesar de la oposición de físicos tan importantes como E. Mach, P. Duhem, W. Ostwald y el joven Planck. Con Boltzmann también se introdujo el concepto de irreversibilidad del paso del tiempo, de la evolución: concepto capital para describir un Universo en expansión.

3. Maxwell y el electromagnetismo

El enfoque continuo tuvo también su parte de éxito con la importantísima cuarta unificación (después de las dos de Galileo, y la de Newton), la que realizó Maxwell al describir en el mismo conjunto de ecuaciones las leyes de la electricidad y las del magnetismo. También fue capaz de deducir de sus ecuaciones la existencia de *ondas electromagnéticas*. Gracias a ellas, no se necesitaban fuerzas a *distancia* para mediatizar las interacciones electromagnéticas, como las que tuvo que introducir Newton, muy a su pesar, para mediatizar la interacción gravitacional. Maxwell introdujo la noción de *campo*, o sea que en cada punto del espacio y en cada instante definía una intensidad eléctrica

por un vector **E**, una intensidad magnética por un vector **H** perpendicular al primero, oscilando las dos intensidades de tal forma que de punto a punto se propagaba una onda en la dirección perpendicular a los dos *campos*.

En 1887 Heinrich Hertz produjo y detectó experimentalmente dichas ondas, las identificó como ondas del mismo tipo que las ondas luminosas, pero de frecuencias más pequeñas que éstas, y abrió la era de las telecomunicaciones: sus ondas podían ser reflejadas por cuerpos metálicos y dieléctricos, y se propagaban con la velocidad de la luz en el vacío. Cuando en 1897 J. J. Thomson descubre el electrón, como el componente de los rayos emitidos por un electrodo cargado puesto en un tubo vacío (lo que iba a ser el tubo de televisión), muchos físicos pensaron que la física estaba acabada, y que el siglo venidero no iba a traer nada verdaderamente importante. Se pensaba

- que el Universo era eterno, con sus cuerpos que se desplazaban en un espacio fijo, estático, con unos movimientos permanentes e indefinidamente previsibles con la mecánica de Newton.
- que la luz emitida por las estrellas viajaba en un *éter* que la sustentaba como el aire sustenta las ondas sonoras que ponen en vibración sus moléculas.
- que el conjunto de los fenómenos de la naturaleza eran describibles gracias a las dos únicas interacciones: la gravitación y el electromagnetismo.

La realidad fue muy distinta.

III. El terremoto del cambio de siglo

Lejos de estar acabada, la física se renovó más en treinta años que a lo largo de los treinta siglos anteriores.

1. *Einstein y las dos teorías de la relatividad*

No es éste el lugar adecuado para entrar en *El origen y el desarrollo de la teoría de la relatividad*, como reza el título del excelente libro del profesor José Manuel Sánchez Ron (Alianza Universitaria 362). Baste recordar que, reflexionando sobre los conceptos de medida del espacio y del tiempo, Einstein propuso en 1905 su teoría de la Relatividad Restringida, donde introducía un hiperespacio de cuatro dimensiones, las tres dimensiones del espacio ordinario y el tiempo, y demostraba la famosa relación de equivalencia entre energía y materia. Sus reflexiones

permitieron resolver los problemas ligados a la hipótesis del éter, el supuesto medio ligado a un espacio absoluto: las nuevas relaciones entre el espacio y el tiempo lo hicieron innecesario.

La relatividad restringida llevaba a la predicción de fenómenos inauditos, como el retraso de relojes llevados por un sistema que viaja a una velocidad cercana a la de la luz en el vacío (límite superior de la velocidad de cualquier objeto) con respecto a un observador en reposo, o como la dilatación de las reglas que miden en el sistema en movimiento una longitud con respecto a la regla en reposo: estos fenómenos se comprueban diariamente en todos los laboratorios del mundo. Pero esta teoría permite también que las ecuaciones de Maxwell sean válidas en cualquiera de estos sistemas, cosa que no era verdad en la concepción clásica del espacio y del tiempo. Lo que les dio un alcance universal.

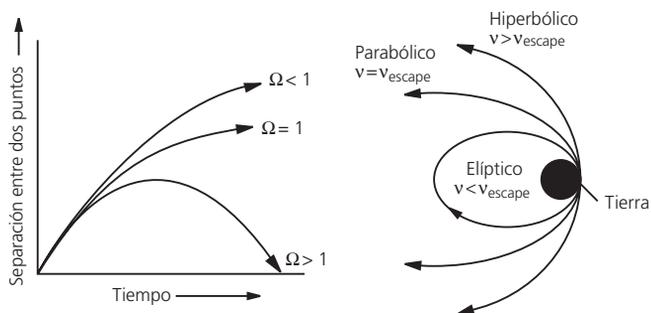
Al extender la relatividad a *cualquier* tipo de movimiento, Einstein llegó a asimilar la materia a la geometría del espacio. Identificó la dinámica de la gravitación y la geometría del espacio físico: fue la Relatividad General (1915). Sus ecuaciones describen el Universo. Entre las soluciones, las más sencillas describen un Universo en expansión. Al encontrarlas, Einstein se asustó e introdujo una constante *ad hoc*, la constante cosmológica, para que el Universo fuera estático. No tardaría en lamentarlo.

2. Friedmann, Lemaître y Hubble: el Universo en expansión

Partiendo del principio cosmológico de Einstein, «*el Universo debe ser homogéneo e isotrópico*», el ruso A. Friedmann (en 1922) y el abad belga G. Lemaître (en 1927)¹³, independientemente, encontraron las soluciones más sencillas (sin constante cosmológica) de las ecuaciones



13. A. Friedmann y G. Lemaître



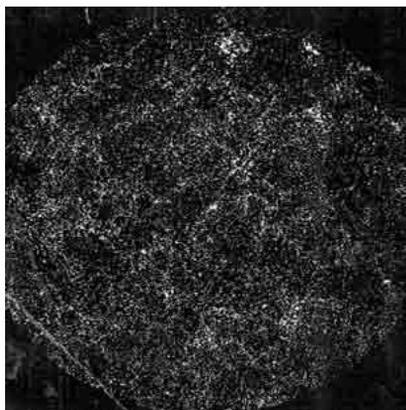
14. Las 3 expansiones posibles del Universo

de la Relatividad General: describían un Universo en expansión. Preveían tres tipos de expansión según el valor de la densidad (de materia) del Universo¹⁴: un valor muy pequeño da una expansión indefinida; con un valor alto la expansión se para al cabo de cierto tiempo y el Universo se contrae después; entre las dos existe un valor crítico de la densidad.

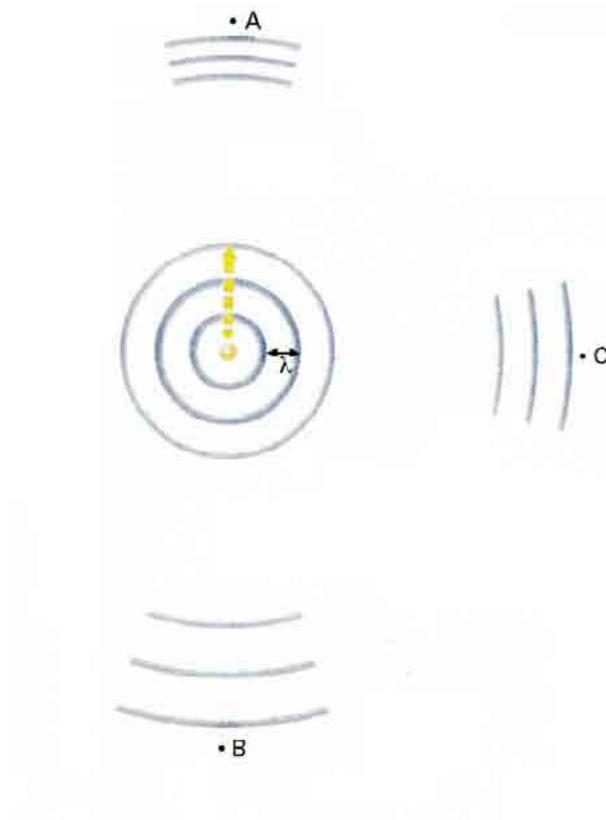
En 1929 E. Hubble¹⁵ descubre que las galaxias se alejan unas de otras tanto más deprisa cuanto más lejos están, y que la velocidad de alejamiento es proporcional a la distancia entre ellas. Esta constante de proporcionalidad (de dimensión velocidad/distancia, o sea el inverso de un tiempo) se llama desde entonces la constante de Hubble. También comprobó que, a larga distancia, el Universo parecía homogéneo¹⁶.



15. E. Hubble



16. Homogeneidad del Universo a larga distancia



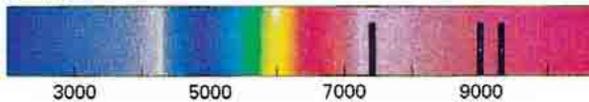
$z = 0$ (estrella en reposo)



$z = 0.1$



$z = 1.1$



3000

5000

7000

9000

17. El efecto Doppler

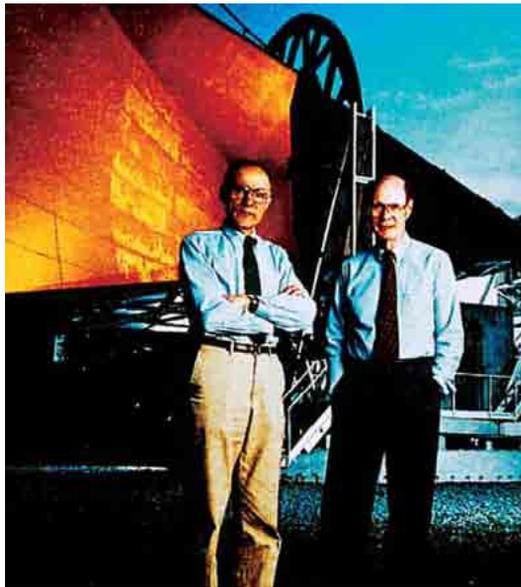
Para calcular la velocidad a la cual se aleja un astro de nosotros, se utiliza el efecto Doppler¹⁷. Es el mismo efecto que hace que una ambulancia que uno oye desde el puente de una autopista baje bruscamente la *altura* del sonido de su sirena al pasar al otro lado del puente: la frecuencia es más alta al acercarse la sirena al observador, y más baja al alejarse de él. El mismo efecto Doppler se aplica en astronomía a la frecuencia de las ondas luminosas, y hace que las frecuencias (inversas de las longitudes de ondas) aumenten al acercarse la estrella (la longitud de onda se hace más corta, se hace más azul la luz), y disminuyan al alejarse la estrella (la longitud de onda se hace más larga, se hace más roja la luz). Puesto que el espectro de la luz de las estrellas, que refleja la composición química de éstas, se conoce perfectamente para los elementos en reposo, se puede calcular el desplazamiento y deducir la velocidad del astro con respecto a nosotros.

Para estimar la distancia que nos separa de una galaxia, se utiliza la relación que existe entre el período de pulsación de la luz emitida por algunas estrellas (las llamadas Cefeidas) y su luminosidad intrínseca: cuanto mayor es el tamaño de tal estrella, mayor es su período de pulsación y mayor su luminosidad. Midiendo el período de pulsación se estima la luminosidad intrínseca. Y se deduce la distancia, puesto que la luminosidad aparente es la intrínseca dividida por el cuadrado de dicha distancia (el ángulo sólido en el cual la vemos). Si la velocidad de expansión fuese siempre la misma, ¡la edad del Universo sería la inversa de la constante de Hubble! Pero es evidente que la velocidad de expansión es cada vez más baja, debido a la atracción gravitacional entre las masas que constituyen la materia (y el espacio) del Universo. Hay que conocer la densidad del Universo para calcular su edad. Y para eso, hay que conocer la estructura de la materia.

3. *Penzias y Wilson: la radiación fósil del Big Bang*

El desarrollo de la física cuántica —que recordaremos dentro de unos instantes— y la Segunda Guerra Mundial desplazaron durante cuatro décadas el interés de la mayoría de los físicos hacia la física nuclear. La cosmología volvió a ponerse de moda cuando en 1965 dos físicos de los laboratorios Bell, Arno Penzias y Robert Wilson¹⁸ detectaron un «*ruido de fondo*» en una sofisticada antena de radio. Esta señal la creaba una onda electromagnética de manera totalmente isotrópica y uniforme, su intensidad era la misma en todas las direcciones del espa-

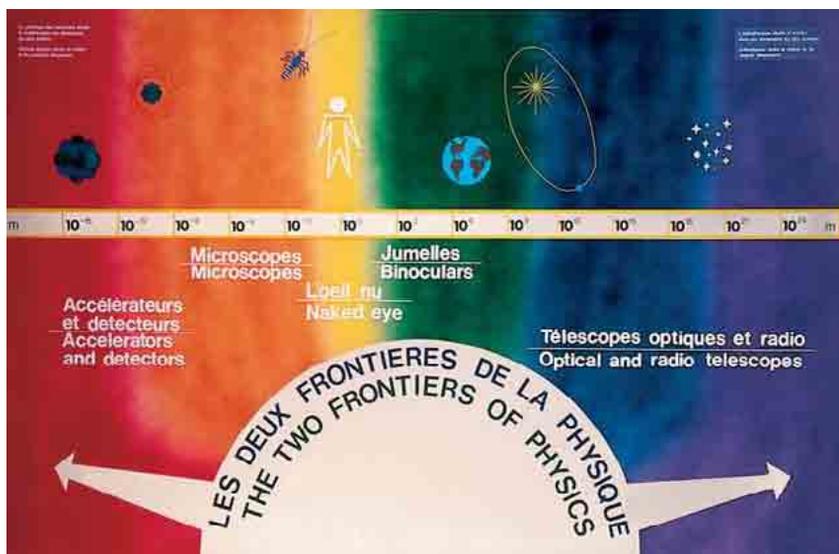
cio. Los físicos teóricos de la Universidad de Princeton interpretaron esta señal como emitida por el Universo en su totalidad, como si el Universo estuviera bañado por esta radiación, en equilibrio con ella. Su espectro era similar al que emite un horno de temperatura dada, en este caso una temperatura muy baja: -270.3°C , o sea 2.7 K . El Universo se bañaba en un gas de fotones que le llenaban desde los primeros años de su historia, como veremos, y ese gas era como el termómetro que nos daba su temperatura hoy. La vieja teoría de Friedmann-Lemaître, con la ayuda de Gamow, se tomaba en serio: se había descubierto la radiación fósil del Big Bang.



18. Penzias y Wilson

4. *Planck y muchos más: la física cuántica, nuclear y de partículas*

El Universo en expansión es el cuadro, en el espacio-tiempo, en el cual evoluciona la materia, cuya masa (energía) constituye su geometría. Pero ¿cuál es la estructura de esta materia? Para saberlo, tenemos que pasar de una frontera de la física —lo infinitamente grande— a la otra —lo infinitamente pequeño¹⁹—.



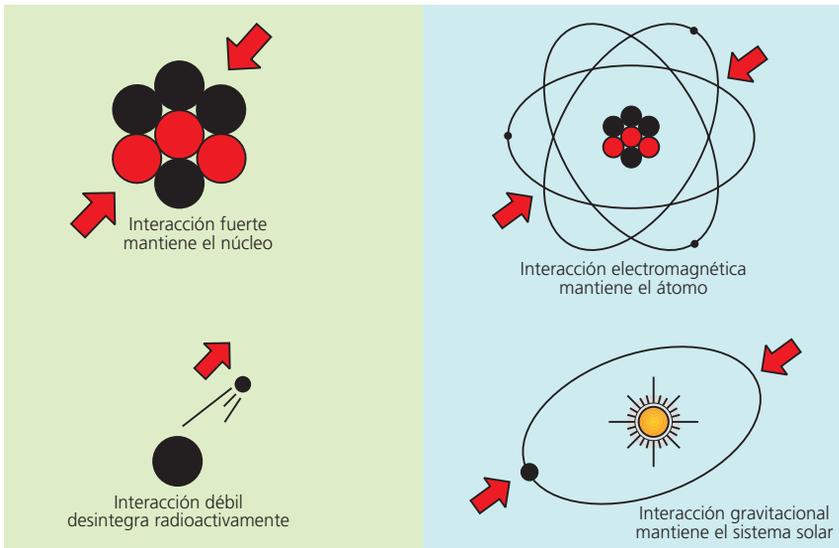
19. Las dos fronteras de la física

A grandes rasgos (remito al lector de formación universitaria en física y que sepa leer el francés a nuestro libro: J. Leite Lopes, B. Escoubès, *Sources et évolution de la physique quantique*, Masson ed., París 1994):

- Max Planck descubre que el intercambio de energía entre la radiación y la materia (por ejemplo, entre la luz de un horno y las paredes de aquel) se hace de manera discontinua, por paquetitos hechos de un número entero de una cantidad mínima, la pequeñísima energía transportada por una radiación que vibrara una vez por segundo: *la constante de Planck h* . Esta sí que es una constante, como la velocidad de la luz en el vacío, c , y no como la constante de Hubble, cuyo valor varía con el momento de la vida del Universo en que se mide.
- A. Einstein (¡otra vez!) introduce el fotón, el grano de luz, y asigna a un fotón de longitud de onda λ (o de frecuencia $\nu = c/\lambda$) la energía $\varepsilon = h\nu$.
- Louis de Broglie extenderá este tipo de relación a cualquier partícula, como por ejemplo al electrón. Los enfoques discontinuo (corpúscular) y continuo (onda), antes antagonistas, se hacen complementarios (Niels Bohr). Se crea la mecánica ondulatoria, y

después cuántica, para describir esencialmente el mundo microscópico (Schrödinger, Heisenberg, Born, Pauli, Dirac...).

- Rutherford descubre que el mal llamado átomo se compone de un núcleo de dimensiones reducidísimas (10^{-13} cm), alrededor del cual un cortejo de electrones circulan con energías y momentos angulares discretos, a distancias del orden de 10^{-8} cm, estando casi toda la masa concentrada en el núcleo.
- Chadwick descubre que en el núcleo, además de protones (núcleos de hidrógeno) hay neutrones. El neutrón es un compañero sin carga, de masa muy parecida a la del protón. Y que para mantener juntos los protones, positivamente cargados, y los neutrones, sin carga, en el interior del núcleo, hace falta una tercera interacción (después de la gravitación y del electromagnetismo), la *interacción nuclear fuerte*.



20. Las cuatro interacciones

- E. Fermi introduce una cuarta interacción, la *interacción nuclear débil*, para explicar ciertas desintegraciones radioactivas, las que emiten electrones. Con lo cual todos los fenómenos de la naturaleza se pueden interpretar con sólo cuatro interacciones²⁰.

- W. Pauli postula la existencia de un compañero del electrón sin carga y sin masa: es el *neutrino*, sólo afectado por la interacción débil. Inventado en 1931, se descubrió en 1956.
- H. Bethe²¹ explica la producción de la energía en las estrellas por la interacción fuerte (y débil) entre los protones (los núcleos de hidrógeno) del espacio y los neutrones, o sea por la fusión de los núcleos más ligeros, que conduce a la *nucleosíntesis*, la fabricación de los núcleos más pesados, una operación que desprende una formidable energía, y permite a un astro como el Sol luchar contra el colapso gravitacional durante unos diez mil millones de años.

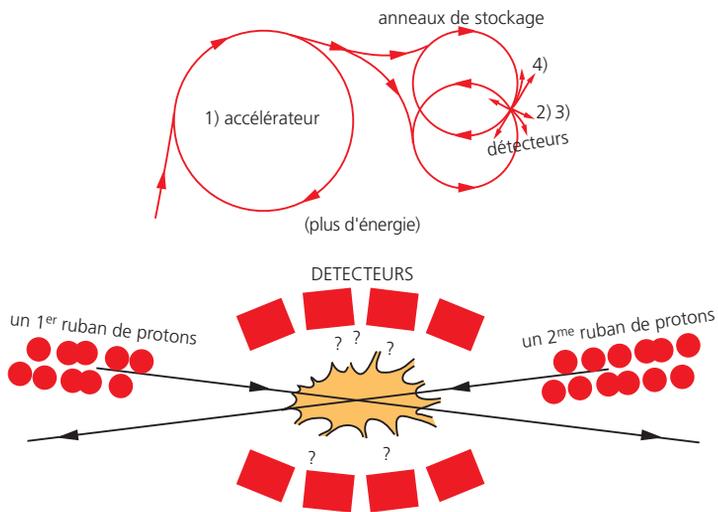


21. Bethe

- Se consigue liberar la también formidable energía que se desprende de la fisión de los núcleos más pesados (como el Uranio) por neutrones. Se construyen armas «atómicas» y centrales nucleares.
- Se construyen aceleradores cada vez más potentes, desde el ciclotrón de Lawrence (unas decenas de centímetros, 1930) hasta los actuales del CERN, por ejemplo (el LEP tiene una circunferencia de 27 km²²). Cuanto mayor es la energía de colisión entre los dos haces²³, más fina es la estructura de la materia que se puede alcanzar.

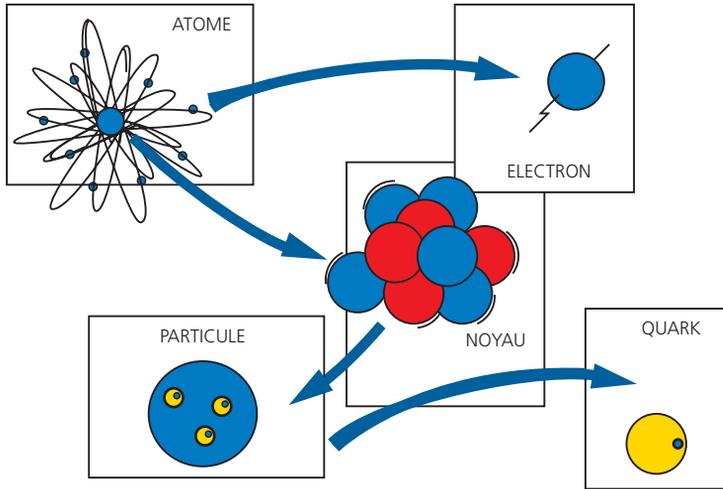


22. El CERN y sus distintos aceleradores



23. Una experiencia de colisión de haces

Todos los resultados obtenidos durante estos años sugieren una estructura de la materia que parece abrirse a distintos niveles²⁴: moléculas, átomos, nucleones (protón y neutrón), quarks; electrones, neutrinos. Y el fotón.



24. Estructura de la materia

IV. El Big Bang

Tenemos ya todos los ingredientes para desarrollar el modelo del Big Bang, que describe la evolución del Universo como las apariciones sucesivas de estructuras cada vez más complejas a medida que dicho Universo se va enfriando.

1. De la complejidad de hoy a la sencillez de ayer

Recordemos que describimos el Universo de hoy con partículas e interacciones. Las partículas son de dos tipos: por una parte, los fermiones, o sea los ladrillos que componen el núcleo del átomo (al final, los quarks), que llamamos *hadrones*, así como los electrones y sus compañeros los neutrinos, que llamamos *leptones* [su característica común

es que todos tienen un espín —momento orbital intrínseco— de valor semientero con respecto a la constante de Planck]; por otra parte, los bosones, como el fotón, cuyo valor del espín es entero. La diferencia esencial es que el fotón es el agente mediatizador de la interacción electromagnética, que se ejerce entre fermiones cargados.

Las interacciones son cuatro²⁵ y todas se describen como la electro-magnética, por el intercambio de un agente. Hasta hoy, no se ha descubierto el gravitón.

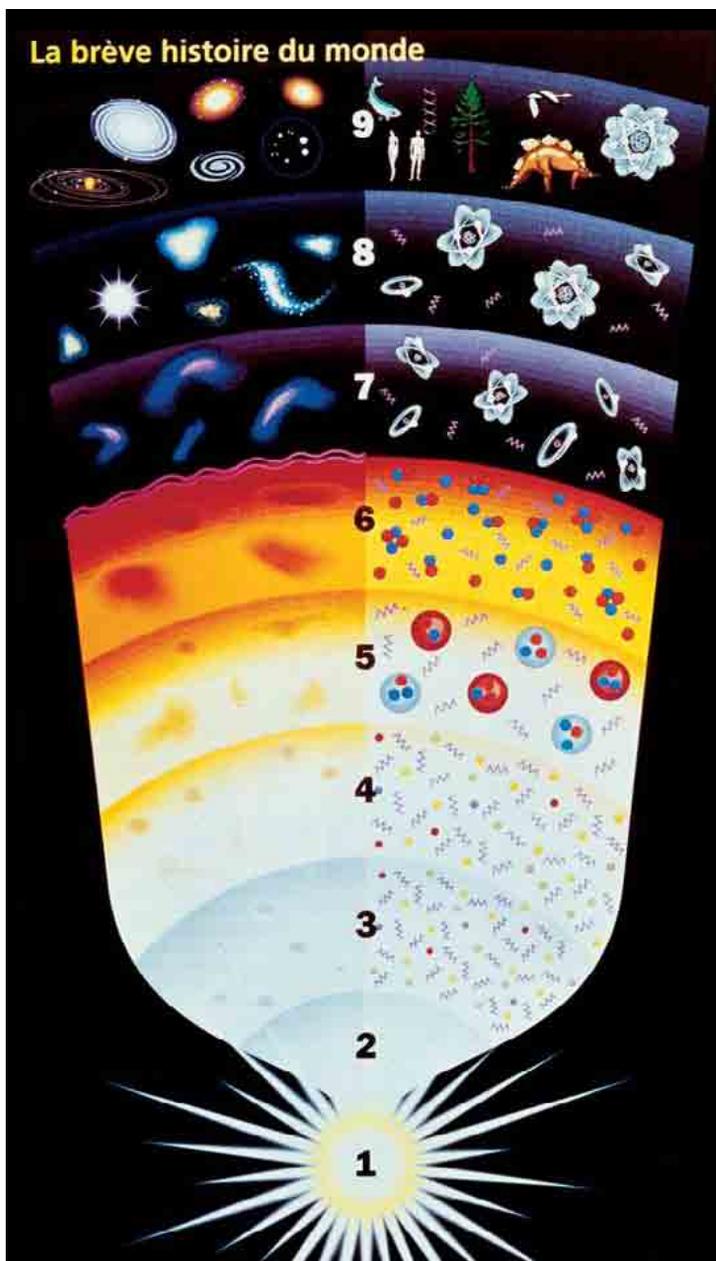
Interacciones	Intensidad relativa a baja energía	Partículas intercambiadas	Manifestaciones
Fuerza fuerte	1	Glucos	Núcleo
Fuerza electromagnética	$\frac{1}{1000}$	Fotón	Átomo
Fuerza débil	$\frac{1}{100\ 000}$	Bosones	Desintegración radioactiva
Gravitación	10^{-38}	Gravitón (?)	Sistemas planetarios

Fuerzas transmitidas por el intercambio de partículas

25. Los agentes de las cuatro interacciones

Pues bien: para llegar a estructuras cada vez más íntimas de la materia, hemos tenido que romperla cada vez con más energía, o sea cada vez con más calor. Cuanto más alta era la temperatura del Universo, menos estructurado estaba.

Si hacemos pasar *a/ revés* la película de la evolución del Universo descubierta por Hubble, vemos que en un tiempo del orden de la inversa de su constante, o sea del orden de unos 8 a 15 mil millones de años, todo el espacio y toda la materia estaban concentrados en un



26. Esquema del Big Bang

volumen de algunos milímetros cúbicos muy cerca del tiempo cero. La temperatura era altísima, y todas las especies de partículas estaban confundidas en una sola especie. Entremos en la cronología más concreta del Big Bang.

2. Cronología del Big Bang

Siguiendo el esquema²⁷, vamos a distinguir nueve fases en la historia del Universo de acuerdo con el cuadro Friedmann-Lemaître y con lo que sabemos de las partículas y sus interacciones.

1. Tiempo transcurrido: 0 s. No se puede decir nada de esta fase.
2. Tiempo transcurrido: 10^{-43} s. Tamaño: 10^{-33} cm. Temp. $\sim 10^{32}$ K. Es la era de Planck. Las 4 fuerzas están unidas. Una sola clase de partículas. Al final, la gravitación se separa de sus tres hermanas, y aparecen los leptones, los quarks, los bosones y sus antipartículas.
3. Tiempo transcurrido: 10^{-35} a 10^{-33} s. Tamaño: 10 cm. Temp. $\sim 10^{28}$ K. Un período de inflación, en el cual el radio del Universo se multiplica por un factor $\sim 10^{30}$, y la temperatura baja bruscamente. Al final, la temperatura vuelve a subir, se han creado un gran número de fotones. Hay tanta materia como antimateria.
4. Tiempo transcurrido: 10^{-6} s. Tamaño \nearrow Temp. $\sim 10^{12}$ K. Después de una masiva aniquilación materia-antimateria, al cabo de la cual sólo un quark sobrevive frente a mil millones de muertes quark-antiquark —sin que sepamos por qué—, los quarks supervivientes se asocian en grupos de tres para formar los protones y los neutrones.
5. Tiempo transcurrido: 3 min. Tamaño \nearrow Temp. $\sim 10^6$ K. Protones y neutrones se asocian para formar los núcleos de los elementos más ligeros.
6. Tiempo transcurrido: 700.000 años. Tamaño \nearrow Temp. ~ 3.000 K. Los electrones se juntan con los núcleos para formar los primeros átomos. La luz, liberada, baña todo el cosmos.
7. Tiempo transcurrido: 1.000 millones de años. Tamaño \nearrow Temp. 100 K. Se forman las primeras galaxias, debido a unas pequeñas fluctuaciones en la radiación fósil²⁶.



27. El satélite COsmic Background Explorer y su creador, John Mather, que puso en evidencia las pequeñas fluctuaciones de la densidad del Universo que darían lugar después a la formación de las galaxias

8. Tiempo transcurrido: 10.000 millones de años. Tamaño ↗ Temp. ~ 10 K. Se forma el sistema solar.
9. Tiempo transcurrido: 15.000 millones de años. Tamaño ↗ Temp. = 2.7 K. Hoy.

3. *Problemas externos e internos del Big Bang*

El horizonte

El radio del Universo al final de la era de Planck era mucho mayor que la distancia que podía haber recorrido la luz en esa época (10^{10} cm/s $\times 10^{-43}$ s = 10^{-33} cm). Así, gran parte del Universo no tenía relación causal con la otra parte. El mecanismo de la inflación permite resolver este «fallo» del modelo original del Big Bang.

La edad del Universo

Nuevas medidas de la constante de Hubble dan, si se supone que la densidad del Universo es casi la densidad crítica y que la constante

cosmológica es nula, una edad *demasiado joven*, más joven que ciertas galaxias. Habrá que revisar estas dos hipótesis.

La masa que falta

Las medidas del período de rotación de las galaxias dan unos resultados incompatibles, en lo que se refiere a sus masas, con los resultados que se sacan de su luminosidad: ¡falta casi un 90 % de materia! También falta materia para dar cuenta de la velocidad actual de expansión del Universo. En muchos laboratorios del mundo se está a la caza de la materia oscura, que debe existir para que nuestras observaciones sean coherentes con el modelo, pero que no se ve.

Las ondas gravitacionales

Otro fantasma, previsto por la teoría de Einstein, sobre todo cuando una estrella se colapsa (supernova), buscado entre otras por una magnífica experiencia llamada Virgo.

Conclusión: Interpretaciones

Tres peligros parecen acosar las interpretaciones no físicas del Big Bang.

1. *Confundir un modelo científico y un mito*

El primero es parcial y provisional, mientras el segundo es totalizador y eterno, inmodificable.

2. *Confundir principio y origen*

De hecho, yo mismo cometí tal confusión al titular mi charla «El origen del Universo». En rigor, el modelo del Big Bang se propone describir el principio del Universo, y además con la importante salvedad de que nunca podrá acercarse al instante cero. Para nosotros el instante cero está tan lejos de los 10^{-43} s de la era de Planck como de hoy, aunque parezca paradójico. Basta escribir el tiempo en escala logarítmica para darse cuenta que la distancia de cero a -43 es menos que de -43 a $-\infty$. Dicho de otra manera, sería absurdo pretender que un día podamos «tocar» el instante cero. El instante cero, el principio, no pertenece a la física. El origen, que supone que sepamos a partir de qué empezó todo, es todavía menos accesible a los físicos que el principio.

3. *El concordismo*

«Sistema de exégesis corriente en el siglo XIX que consiste en interpretar la Biblia de manera que esté de acuerdo con los resultados de las ciencias interesadas (geología, prehistoria, historia). El ejemplo típico es el de la interpretación de los textos bíblicos sobre la creación del mundo en seis días, en los cuales se quería encontrar a cualquier precio las etapas científicas de la génesis del Universo» (Definición del diccionario enciclopédico Larousse). Hay ejemplos pasados y recientes de los problemas que acarrea esta concepción de la Biblia. Y personalmente, pienso que este enfoque es nefasto tanto para los científicos como para los creyentes, ¡peor si se trata de la misma persona!