



A LA BUSQUEDA DEL INFINITO

MODELOS DEL UNIVERSO

ISSA A. KATIME AMASHTA
JUAN ANTONIO PEREZ ORTIZ

Coordinador

FERNANDO MARIN ALONSO

Indice general

<i>Páginas</i>	<i>Capítulos</i>
<i>Prólogo</i>	IX
1 Introducción	1
2 El sistema solar	2
3 Las estrellas	7
4 Las galaxias	12
5 El mundo de Einstein	17
6 El mundo de De Sitter	23
7 El Universo, en expansión	25
8 Modelo de Eddington	29
9 Modelos de Friedmann (I)	31
10 El modelo de Lemaitre	34
11 Modelos de Friedmann (II)	36
12 Discusión	38
Apéndice: La teoría del estado estacionario	41
Símbolos utilizados, 44. Bibliografía y lecturas recomendadas, 45.	

A nuestros padres

I. K. y J. A. P. O.

Prólogo

En las dos últimas décadas de Cosmología ha experimentado un avance espectacular debido, por una parte, al desarrollo de la Radioastronomía (gracias a la incorporación de los telescopios espaciales), y por otra a las contribuciones de BAADE y SANDAGE que resolvieron magistralmente el problema de la escala del tiempo y con ello la constante de Hubble. De igual manera, las teorías sobre la nucleogénesis han experimentado un gran auge en estos últimos años.

En este libro hemos tratado de exponer de manera simple, y sin utilizar tratamientos matemáticos complicados, todas las teorías principales sobre las que se asienta la Cosmología actual, que incluye la newtoniana y la relativista. Con ello pretendemos que la introducción que proporciona esta obra a un campo tan complejo y en rápido crecimiento dará a nuestros lectores un conocimiento de los principios físicos básicos implicados en la Cosmología, así como una apreciación de los nuevos e importantes avances que comunica a esta ciencia su impulso actual.

Deseamos expresar nuestro afecto a muchos colegas y alumnos, quienes nos han ayudado y alentado en esta empresa. Sus nombres llenarían muchas páginas, y nuestro agradecimiento explícito ha de limitarse a unos pocos. Particularmente valiosos han sido la crítica y consejos del Profesor Dr. PEDRO GILI TRUJILLO, de la Universidad de La Laguna. Patentizamos también nuestro agradecimiento por sus útiles sugerencias al Profesor Dr. JESÚS MOYA, de la Universidad de Bilbao. Asimismo nos ha sido muy valiosa la colaboración de D.^a CONCEPCIÓN TRABANCA FRAGA en la corrección de las pruebas de imprenta.

Igualmente queremos expresar nuestro agradecimiento a Editorial Alhambra, por el interés y esmero habitual en ellos, que han puesto en la edición de esta obra.

Leioa (Bilbao), 1980.

I. KATIME y J. A. PÉREZ ORTIZ.

Introducción

Todo comenzó con el primer hombre que contempló, quizá con asombro y temor, la belleza de la bóveda celeste. Aquel hombre desconocido no hizo ningún descubrimiento crucial, pero sí nos legó la inquietud y la curiosidad que había nacido en él.

Por supuesto, el hombre actual no espera ver dioses en los cielos, como los antiguos los vieron en las constelaciones; lo que él busca son las leyes físicas que rigen al Universo y le dan armonía. Aun así, es posible que las motivaciones de su estudio no hayan cambiado totalmente, y su curiosidad científica tenga un fondo religioso, que le acompaña en la búsqueda de respuestas a los interrogantes que le plantea la observación del Cosmos.

Tal vez por esto, las preguntas básicas sobre el Universo tratan sobre su finitud o infinitud, en espacio (extensión) y en tiempo (duración). Al principio, estas preguntas las contestaban los poetas y los teólogos; en la actualidad, son los científicos quienes soportan la responsabilidad de buscar respuestas a ese ente desconocido y fascinante que es el Universo.

En este libro tratamos de ver cómo responde a estas cuestiones la ciencia contemporánea, cuya característica más notable y sorprendente es el avance que ha logrado en las últimas cinco décadas. Sobre todo comparado con el de los tres mil años de historia escrita del hombre y con el de los cientos de miles que lleva el hombre inteligente viviendo sobre la superficie de la Tierra.

Si se acepta que no hay ningún punto privilegiado, la Tierra debería carecer de «bordes», ya que en caso contrario un observador próximo al borde, límite o frontera, no estaría en igualdad de condiciones respecto a otro observador más alejado de él. Esto obliga a aceptar que no existe una frontera, lo que quiere decir que la Tierra debe de ser ilimitada.

Pues bien, un plano ilimitado es infinito. En cambio, una esfera es algo a la vez finito e ilimitado, por no encontrarse en ella una frontera. Por esto, a algunos filósofos griegos les pareció más satisfactoria la idea de una Tierra con la geometría esférica de la opción *b*). De hecho, toda la cultura griega muestra horror al infinito, y por ello busca constantemente el *metrón*, es decir, la posibilidad de medir. Una superficie esférica es finita, puede medirse.

Pronto llegaron unas observaciones más sutiles en favor de esta opción *b*). La sombra de la Tierra sobre la luna, en los eclipses lunares, es siempre circular. ERATÓSTENES (276-196 a. C.) calculó en $4 \cdot 10^4$ kilómetros el perímetro de la Tierra. Aun así, habría que esperar a la circunnavegación de ELCANO (1522) para tener pruebas más directas de la esfericidad de la Tierra. Hoy, con los satélites artificiales, ya poseemos evidencia visual de este hecho, que nos hace aceptar la opción *b*) sobre las otras dos.

Aceptada la forma esférica de la Tierra como la más correcta, pasemos a analizar la problemática histórica de cómo está formado el sistema solar y cuál de los cuerpos que lo forman es el que aparentemente se encuentra inmóvil.

PTOLOMEO (130 d. C.) introdujo una imagen del Universo centrado en la Tierra (teoría geocéntrica). Según esta teoría los planetas, junto con el Sol y la Luna, giraban en invisibles esferas en torno a la Tierra.

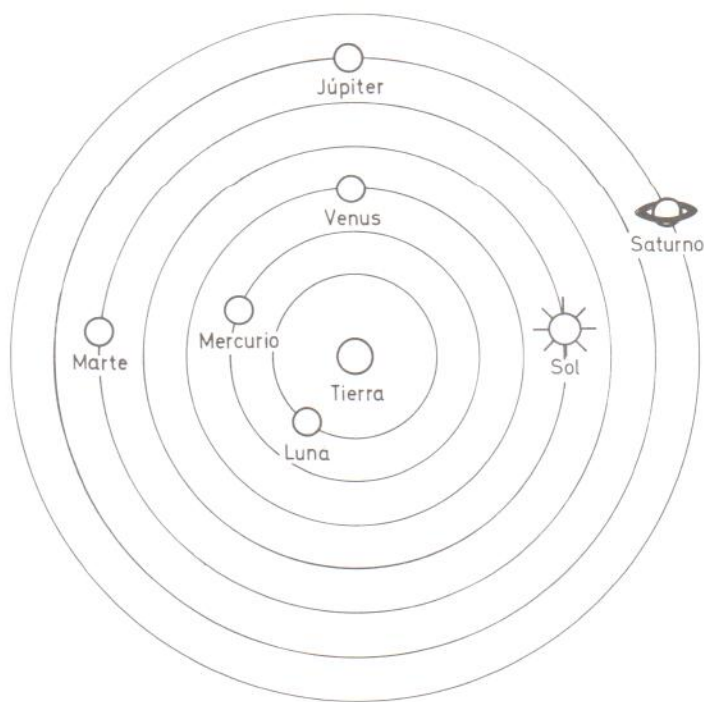


FIG. 1. Sistema de Ptolomeo.

observó que las posiciones tomadas por BRAHE no estaban situadas sobre una circunferencia. Fiado de la perfección de las medidas realizadas por éste, afirmó que la órbita podía no ser una circunferencia, sino más bien una elipse. Esta y otras consideraciones, nacidas del análisis de infinidad de medidas interpretadas a través de su intuición, le llevó a enunciar de forma empírica las denominadas «leyes de Kepler»:

Primera ley. Los planetas describen órbitas elípticas alrededor del Sol, que se encuentra en uno de los focos.

Segunda ley. Las áreas barridas en tiempos iguales, por los rayos vectores que definen la posición de los planetas, son iguales (Fig. 3).

Tercera ley. El cuadrado de los periodos de los planetas (tiempo que tardan en dar una vuelta alrededor del Sol) es directamente proporcional al cubo de los semiejes mayores de la elipse que describa.

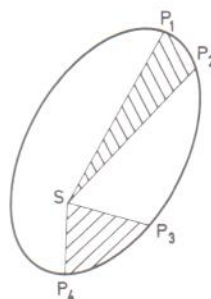


FIG. 3.

Estas leyes del Sistema Solar permanecieron empíricas hasta ISAAC NEWTON (1642-1727), quien reformó completamente las nociones de Mecánica heredadas de la Edad Media, y puede decirse que fundó nuevamente dicha ciencia. Siguiendo los pasos de GALILEO, que propugnaba la aplicación del número y la medida a los problemas físicos, desarrolló su Mecánica basándose en el cálculo infinitesimal, poderosa rama de las matemáticas descubierta por él mismo. Esta Mecánica es la que utilizaremos posteriormente al desarrollar algunos de los modelos del Universo.

NEWTON supuso la existencia de una fuerza universal, que lo mismo producía la caída de las manzanas en un huerto que dirigía a los planetas en sus órbitas. Esta «gravitación» universal, actuando sobre un objeto cualquiera, le produce una aceleración, g , directamente proporcional a la masa, m , del objeto causante de la fuerza, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, r , a la que actúa:

$$g = -\frac{\gamma m}{r^2} \quad [1]$$

siendo γ la constante de gravitación, de valor $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$. El signo menos indica que la aceleración posee sentido opuesto al vector que va del cuerpo atrayente al cuerpo atraído.

NEWTON declaró no entender el porqué de la gravitación; «No emito hipótesis», pero aun así el manejo de esta fuerza de gravitación era útil, y las conclusiones que con ella se obtenían eran correctas. Así, si m es la masa solar, $m = m_{\odot}$, y d la distancia Sol-planeta, la aceleración con que el planeta es atraído tiene un valor de:

$$g = -\gamma \frac{m_{\odot}}{d^2}$$

Las estrellas

Son esos puntos luminosos que brillan con luz propia en la bóveda celeste y que guardan aparentemente entre sí distancias constantes. A simple vista se pueden contar más de seis mil, pero incluso con el rudimentario telescopio de Galileo se divisan muchas más.

Los antiguos creían en una bóveda firme —«firmamento»— y sólida, en la que se hallaban fijas las estrellas. Esta bóveda fue quebrada, en el plano de la teorización, por G. BRUNO (1548-1600), que debió a esta osadía el acabar su vida en las piras de la Inquisición; y mucho más tarde, por E. HALLEY (1656-1742), quien descubrió los «movimientos propios» de las estrellas (1718).

Ya entonces las distancias estelares se sabían enormes, y fallaban, al intentar medirlas, los métodos trigonométricos de Cassini. Hoy sabemos que la estrella más próxima al Sol, α -Centauri, está a 4,5 años luz.

En verdad, actualmente sabemos mucho más sobre las estrellas que en tiempos de Newton. Expongamos algunas de sus características antes de hablar de las ideas cosmológicas de Newton.

Las distancias estelares son enormes, pero, por suerte, hay una estrella típica y representativa, bastante cercana a nosotros: el Sol. A través de estudios estadísticos realizados sobre mediciones sistemáticas en grupos de estrellas se ha llegado a obtener resultados promedio, significativos, comprobándose que el Sol es, en muchos aspectos, una estrella promedio.

Un estudio estadístico de este tipo es la clasificación estelar de E. HERTZPRUNG (1873-1967) y H. N. RUSSELL (1877-1957), acabada en 1913 (Fig. 4), hecha en base al *brillo estándar* de las estrellas y a su *clase espectral*. Veamos qué son estas magnitudes, denominadas «brillo» y «clase espectral».

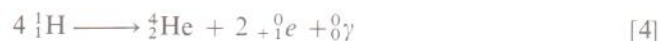
El brillo aparente de un astro es directamente proporcional a su luminosidad intrínseca e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia a nosotros, es decir, siendo B el brillo y L la luminosidad, se tiene

$$B = L \cdot r^{-2} \quad [3]$$

Estas dos magnitudes, magnitud absoluta y clase espectral, se reflejan en el diagrama de Hertzsprung-Russell. Los recientes estudios realizados por los científicos permiten seguir sobre este diagrama la evolución de una estrella. Las estrellas nacen, crecen y mueren según el siguiente proceso:

1) Los átomos de hidrógeno, que existen en el espacio interestelar, se van aproximando unos a otros, hasta formar nubes de hidrógeno. Se sabe que tales nubes abundan en el espacio interestelar, ya que emiten ondas parecidas a las de la radio de longitud de onda próxima a 21 centímetros. Los átomos de la parte central de la nube atraen a los de la parte exterior, haciendo que la nube se contraiga.

2) Según avanza el proceso contractivo, aumenta la presión en el interior de la protoestrella. Al aumentar esta presión, sube la temperatura, con lo que el núcleo de la estrella se calienta, hasta hacer posible el siguiente proceso de fusión nuclear:



En este proceso de fusión se pierde una parte, m , de la masa inicial, que se convierte en energía, de acuerdo con la fórmula de EINSTEIN (1879-1955)

$$E = mc^2$$

en la que c representa la velocidad de la luz (300 000 kilómetros por segundo). Esta energía liberada se escapa de la estrella en forma de radiación; en gran parte, en forma de radiación calorífica. La presión que realiza al escaparse equilibra, muy delicadamente, la contracción gravitatoria. Mientras se mantiene el proceso indicado en la ecuación [4], la estrella permanece en la *secuencia principal* del diagrama de la figura 4 (zona punteada). A esta secuencia pertenecen el 90 por 100 de las estrellas computadas, entre ellas el Sol.

3) La duración de la estancia de una estrella en la secuencia principal depende de cómo se desarrolla el proceso [4]. De hecho, la edad de una estrella puede calcularse conociendo su composición química en un instante dado y los procesos nucleares que ha sufrido hasta ese momento.

Realizando un estudio adecuado de la reacción [4], se comprueba que la velocidad de esta reacción depende de la cantidad inicial de hidrógeno de la estrella, esto es, de su masa. Así, el Sol radia energía a un ritmo actual de $4 \cdot 10^{34}$ julios/año, y se cree que lleva unos $5 \cdot 10^9$ años en la secuencia principal. Las *estrellas azules* que tienen mucha masa, consumen hidrógeno más rápidamente, y tienen una existencia más efímera (entre 2 y $3 \cdot 10^9$ años). Las pequeñas *enanas rojas*, merced a la parsimonia con que consumen su hidrógeno, pueden durar más aún que el Sol. La fase de secuencia principal es la más larga en la vida de una estrella.

4) Al acabarse el hidrógeno del núcleo, es decir, al terminarse esta especie de combustible, se fusiona el helio, luego el berilio, el carbono, etc.

Las «cenizas» de los residuos de fusión van obstruyendo la salida de radiación del núcleo, con lo cual la estrella se hincha y se enfría, pasando a ser una *gigante roja*. Esto le ocurrirá al Sol dentro de $6 \cdot 10^9$ años.

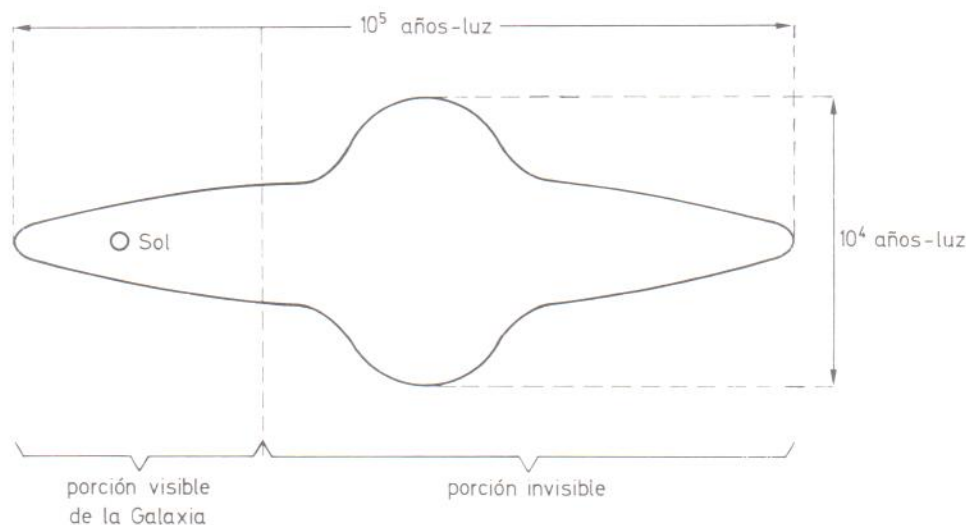
Los cambios de «combustible» nuclear implican fases de inestabilidad, en las que la estrella se hincha y se contrae sucesivamente, pasando a ser variable.

Existen relaciones entre el periodo de variación del brillo y la luminosidad de la estrella; éstas relaciones pueden usarse, mediante la ecuación [3] y, utilizando determinados métodos, para evaluar la distancia de la estrella.

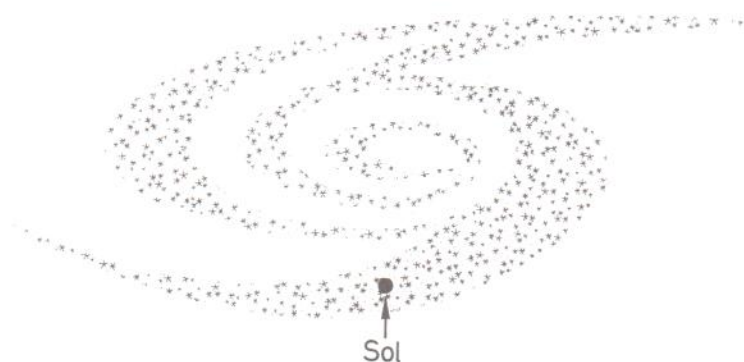
5) Los procesos de fusión citados duran hasta que en el núcleo se forma el isótopo ${}^{56}\text{Fe}$. A partir de ese instante, la estrella deja de emitir energía en forma de radiación y se rompe el equilibrio; triunfa la gravitación, y la estrella se colapsa,

ocasión que las estrellas tienden a agruparse en sistemas múltiples. Entre estas agrupaciones hay algunas importantes (de hasta 10^4 estrellas) como: los cúmulos globales, las Pléyades, o el M13 en la constelación de Hércules..., y más importante aún que las enumeradas son las agrupaciones estelares denominadas *galaxias*.

No ha sido tarea fácil la de averiguar la forma y la estructura (Fig. 5) de la Galaxia; el proceso se ha comparado con la de trazar el plano de una gran ciudad, desde un patio interior de sus arrabales y en un día de niebla.



a) Perfil de la Galaxia.



b) Planta de la Galaxia.

FIG. 5. La Galaxia.

Hoy sabemos que la Galaxia tiene un perfil lenticular y una planta en forma de doble espiral. De un lado al otro del disco hay 10^5 años luz y el abultamiento central mide 10^4 años luz (proporción 10/1). El Sol está situado en uno de los «brazos de la espiral», a unos $6 \cdot 10^4$ años luz del núcleo central galáctico.

La Galaxia está en rotación: las estrellas giran en torno a su centro (el Sol lo hace en un «año cósmico» de $2,5 \cdot 10^8$ años). Con estos datos, la aplicación de la tercera ley de Kepler da para la Galaxia una masa de unos $1,35 \cdot 10^{11}$ soles; de ellos,

unos 10^9 se hallan en el núcleo. Casi todo lo que se sabe del núcleo galáctico se debe a la radioastronomía, ya que las nubes de polvo impiden la observación visual de sus componentes.

En 1521, la expedición de MAGALLANES y ELCANO descubrió en el cielo austral dos nubes difusas, de diferentes tamaños: las nubes Grande y Pequeña de MAGALLANES. El telescopio mostró que eran agrupaciones estelares, de forma irregular. H. LEAVITT (1868-1921) investigó su distancia, hallando que era de $1,6 \cdot 10^5$ años luz; hoy sabemos que estas nubes magallánicas son galaxias satélites de nuestra Galaxia.

Durante mucho tiempo (¡hasta 1923!) se creía que este sistema constituía todo el Universo, pero había dudas sobre este punto. En los telescopios, además de nubes oscuras, aparecían nubes brillantes, o «nebulosas», algunos de estos objetos, como la nebulosa de Orión, pertenecen claramente a la Galaxia, y brillan por contener estrellas en su interior, pero había otros, de forma elíptica o espiral, sobre los que se desató la polémica; el más conocido era la «nebulosa Andrómeda».

PIERRE SIMON LAPLACE (1749-1827) sostenía que las nebulosas eran sistemas planetarios en proceso de formación, eran nubes de gas del cual se formarían los sistemas. El filósofo I. KANT se oponía a esta teoría; para él, estas nebulosas eran galaxias como la nuestra, sólo que muy distantes, por lo que no se podían observar en ellas las estrellas de las que estaban compuestas. De ser cierta la tesis kantiana, el ámbito del Universo se agrandaría enormemente, ya que, al haberse descubierto más galaxias, bien se podía suponer que su número era inmensamente mayor y que llenaban un Universo gigantesco.

La polémica entre ambas teorías fue decidida en 1923 por E. P. HUBBLE (1887-1953); disponiendo del potente telescopio de Monte Wilson, HUBBLE discernió estrellas individuales en los brazos de Andrómeda. Entre ellas había estrellas variables, lo que le permitió una evaluación de la distancia. En 1944 se supo que la escala de distancias usada entonces era incorrecta; hoy se sabe que la distancia a Andrómeda es de $2 \cdot 10^6$ años luz.

Entre 1923 y 1929, HUBBLE hizo lo mismo con otras nebulosas, demostrando su naturaleza de sistemas exteriores a nuestra galaxia; Andrómeda y sus congéneres eran otras galaxias lejanas, muy lejanas. La galaxia de Andrómeda, a $2 \cdot 10^6$ años luz, pasa a ser la galaxia importante más próxima a la Vía Láctea o Galaxia y a sus satélites magallánicos.

Al igual que HERTZPRUNG y RUSSELL habían hecho para las estrellas, HUBBLE hizo una clasificación de las galaxias (Fig. 6) por su forma externa; clasificándolas en elípticas, espirales y espirales barradas. La Galaxia es del tipo Sb.

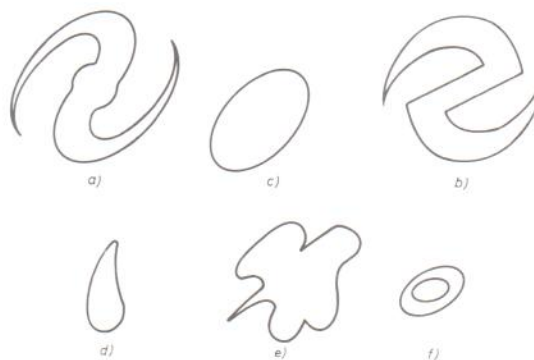


FIG. 6 bis. Clasificación de las Galaxias.

a), espiral; b), espiral barrada; c), elíptica; d), irregular; e), irregular, y f), irregular.

El mundo de Einstein

NEWTON, con su teoría de la gravitación, había introducido en la Física el inquietante concepto de «acción a distancia». Además de en el campo gravitacional, este concepto apareció posteriormente en el campo electromagnético, estudiado hacia 1860 por J. C. MAXWELL (1831-1879); sólo que en este último campo la acción no era instantánea, sino que se propagaba como una onda a la velocidad $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$, idéntica a la velocidad de la luz, por lo que *luz* y *onda electromagnética* se consideraron sinónimos.

Los físicos del siglo XIX habían considerado al espacio lleno de un medio no muy diferente, conceptualmente, a la antigua «quintaesencia»: el éter cósmico o éter luminífero, medio a través del cual se transmitían las ondas luminosas. La introducción del éter procedía, obviamente, de la analogía que se hacía con las ondas sonoras, que precisan un medio material (aire, agua...) para propagarse. Se suponía que el éter estaba en reposo absoluto, y que los cuerpos se podían mover a través de él sin que sufrieran ningún tipo de oposición, de modo que había de ser extremadamente sutil para no causar rozamientos.

Las experiencias que se realizaron nunca llegaron a demostrar la existencia del éter, hasta que, en 1881, MICHELSON y MORLEY comprobaron la imposibilidad de su existencia. Se suponía al éter como una sustancia inmóvil en el espacio y con respecto a la cual la luz se movía a velocidad $c = 3 \cdot 10^5$ kilómetros por segundo. Por tanto, al medir la velocidad con la cual la luz llegaba a la Tierra en sentido contrario al de su giro, la velocidad obtenida debía ser la suma de ambas velocidades, $v_1 = c + v_r$; si se medía en el sentido de giro de la Tierra, la nueva velocidad sería $v_2 = c - v_r$. Esta diferencia entre la velocidad en uno y otro sentido de giro es lo que midieron MICHELSON y MORLEY por medio del interferómetro que construyeron, llegando al convencimiento de que ambos valores de la velocidad de la luz eran iguales, independientemente del sentido de giro. Esta igualdad no hubiera sido posible de existir el éter, como tal ente inmóvil que rodeaba la Tierra y dentro del cual la luz se propagaba a la velocidad antes indicada.

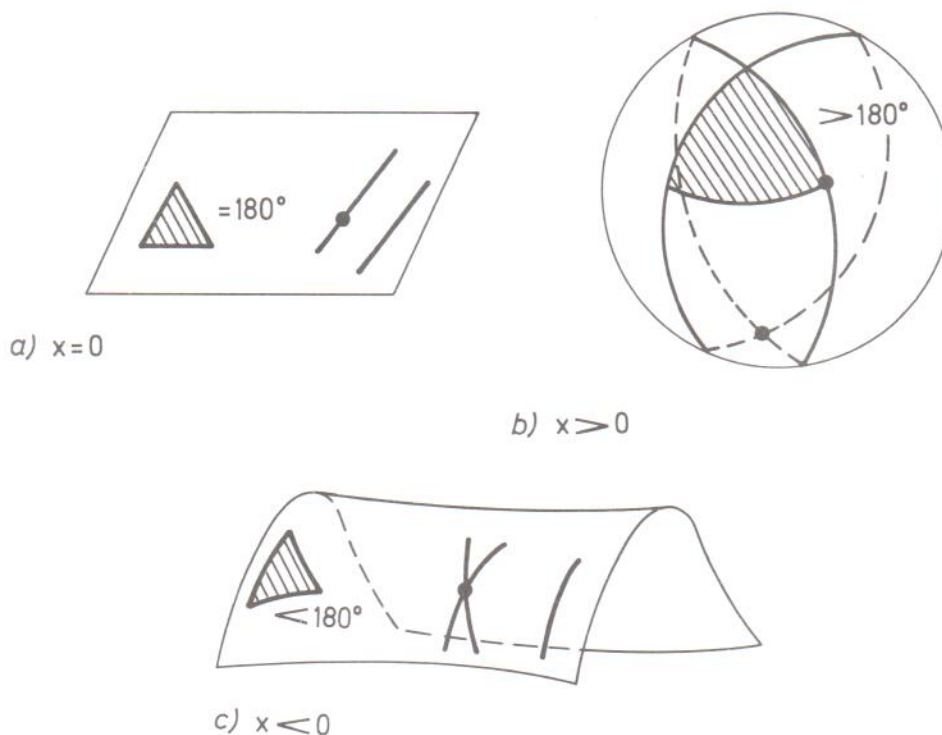


FIG. 7. Geometría del espacio (analogías bidimensionales).

b) El espacio hiperbólico, o pseudoesférico, con $\kappa < 0$, curvatura negativa, cuya geometría, desarrollada en 1829 por N. LOBATCHEWSKIY (1793-1856), puede representarse en dos dimensiones sobre un hiperboloide (Fig. 7, c).

c) El espacio esférico, con $\kappa > 0$, con curvatura positiva, cuya geometría, investigada en 1854 por B. RIEMANN (1826-1866) es representable en dos dimensiones sobre una esfera (Fig. 7, b).

Siendo ilimitado el espacio en las opciones a) y b), ya que el espacio es infinito y abierto (pues las geodésicas son, respectivamente, rectas e hipérbolas, que son curvas abiertas); en cambio, en la opción c) el espacio es finito y cerrado (ya que las geodésicas son arcos de circunferencia, líneas que se curvan y cierran sobre sí mismas).

Las tres geometías se diferencian en el signo de κ , la curvatura del espacio. También pueden diferenciarse, como puede verse en la figura 7, por algunas propiedades de las figuras geométricas, como, por ejemplo, la suma de los ángulos de un triángulo. De hecho, K. F. GAUSS (1777-1855) intentó averiguar la geometría del mundo real midiendo los ángulos del triángulo formado por tres montes. Fue un fracaso; pues del mismo modo que toda curva, circunferencia o hipérbola puede considerarse aproximadamente una recta en partes pequeñas de ella, y la Tierra esférica puede parecer plana en pequeñas parcelas, así, el espacio es aparentemente plano en regiones pequeñas; por esta causa, GAUSS no halló desviación respecto al comportamiento clásico de la geometría euclidiana. Se precisaba un método más sutil para apreciar diferencias notables.

El principio de FERMAT (1601-1665), que afirma que la luz viaja de un punto a otro por el camino más corto entre ellos, asigna el papel de líneas geodésicas a los

su centro en la galaxia de referencia. La masa exterior a la esfera no influirá en la galaxia de prueba, pues el campo gravitatorio en el interior de una esfera hueca homogénea es nulo. Como la masa interior a la esfera está, al igual que la exterior, distribuida homogéneamente, causará sobre la galaxia de prueba una aceleración

$$g = -\gamma \frac{m}{r^2} \quad [7]$$

Pero EINSTEIN, en 1915, opinaba que el Universo debía de ser estático, es decir, r debía ser constante con el tiempo, con lo que la velocidad y la aceleración de una galaxia con respecto a la otra sería $v = 0$ y $a = 0$ en todo momento. Si sólo actuase la gravitación y por tanto fuese $a = g$, sería imposible obtener $a = 0$, excepto en el caso de un universo vacío ($m = 0$).

Para lograr un universo estático EINSTEIN introdujo una «quinta fuerza», capaz de neutralizar la gravitación y dar una aceleración neta nula:

5) *Repulsión cósmica*. Era una fuerza exclusivamente de largo alcance; su intensidad aumentaba con la distancia (en los otros cuatro tipos, disminuye), según la expresión

$$I = \Lambda r$$

siendo I la intensidad de repulsión del campo cósmico y Λ la constante cósmica.

A partir de estos presupuestos, EINSTEIN analizó matemáticamente el Universo y llegó a la conclusión de que el factor R^* , que mide cómo varía la escala de dicho Universo, era constante. En la figura 8 aparece la representación de la función $R(t)$ como una recta paralela al eje de abscisas; al no variar R , el tamaño del Universo no varía.

El modelo de Einstein es un Universo estático, pleno, cerrado y finito, pero ilimitado; eterno, sin principio ni final, con un pasado infinito y con un futuro también infinito. Para EINSTEIN, su universo no sufre cambios globales, sus com-

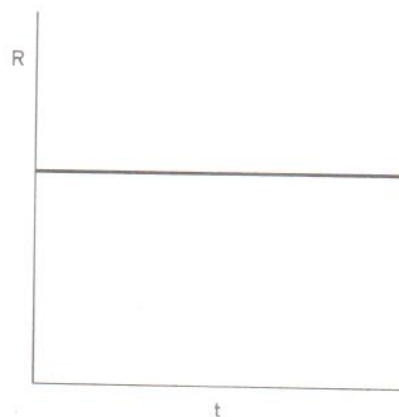


FIG. 8. El mundo de Einstein.

* Este factor de escala del Universo se define como el cociente entre la distancia a la Galaxia de prueba en los tiempos t y t_0 , siendo t_0 un valor arbitrario no nulo.

El mundo de De Sitter

Para el cálculo de la densidad del Universo, se evalúa la masa contenida en una región de espacio lo suficientemente representativa en tamaño. La densidad de la Tierra es, 5 500 kilogramos por m^{-3} . La del sistema solar es de $2,3 \cdot 10^{-9}$ kilogramos por m^{-3} . La de la Galaxia, aún en nuestras inmediaciones cósmicas, es del orden de $5 \cdot 10^{-23}$ kilogramos por m^{-3} , esto es,

[illegible]

En 1917 aún no se conocían otras galaxias, ni los terribles abismos de vacío intergaláctico. Aun así, W. DE SITTER (1872-1934) pensó que esa densidad era ínfima, similar a la de un volumen como el de la Tierra que encierre una mota de polvo.

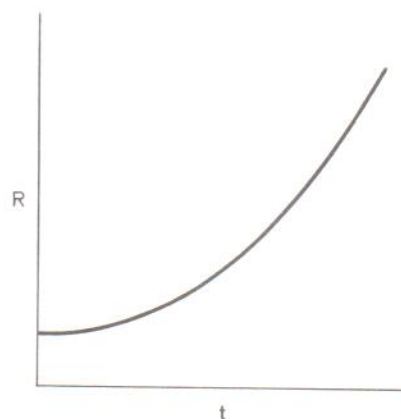


FIG. 9. El mundo de De Sitter.

El Universo, en expansión

Entre 1923 y 1929, E. P. HUBBLE dedicó su trabajo al estudio de las galaxias, y especialmente a analizar los movimientos relativos entre ellas.

La radiación emitida por una galaxia se puede descomponer mediante un prisma o una red de difracción, igualmente que como se dijo en el caso de las estrellas, obteniéndose el espectro de la galaxia, que, a su vez, será reflejo del espectro de sus estrellas componentes, especialmente de aquellas que pertenecen a su núcleo galáctico, que es la parte más brillante.

Por medio del análisis de estos espectros se puede conocer la composición química de los astros; en ellos la longitud de onda de una raya sólo debe depender de la naturaleza química y la temperatura del material que forma el foco emisor de la radiación. Según esto las longitudes de onda emitidas por las estrellas no debían cambiar. Aun así, se pudo observar que las líneas características de los átomos no aparecían con sus longitudes de onda teóricas, sino que constantemente aumentaba el valor de estas longitudes. Este es el fenómeno que se conoce con el nombre de corrimiento o *desplazamiento al rojo* de las líneas espectrales.

No podía interpretarse el desplazamiento al rojo como prueba de la existencia de nuevos elementos en las galaxias, pues el Sistema Periódico, ya establecido, «no dejaba sitio» para nuevas sustancias. Esto hizo que la explicación se buscara a través del efecto DOPPLER (1803-1853)-FIZEAU (1819-1896).

Para comprender en qué consiste este efecto, recordemos que cuando se está escuchando el silbido de una locomotora que se acerca hacia nosotros, el silbido se oye muy agudo, y cuando ha pasado y se aleja, el silbido se escucha con un tono grave. En el primer caso se escucha agudo porque las ondas emitidas son empujadas por la locomotora hacia nosotros, con lo cual se comprimen, disminuyendo su longitud de onda y aumentando su frecuencia. Al alejarse, las ondas son estiradas, con lo cual aumenta la longitud de onda y disminuye su frecuencia, pasando a ser un sonido grave.

Igualmente, al alejarse una estrella se alarga la longitud de onda que ella emite,

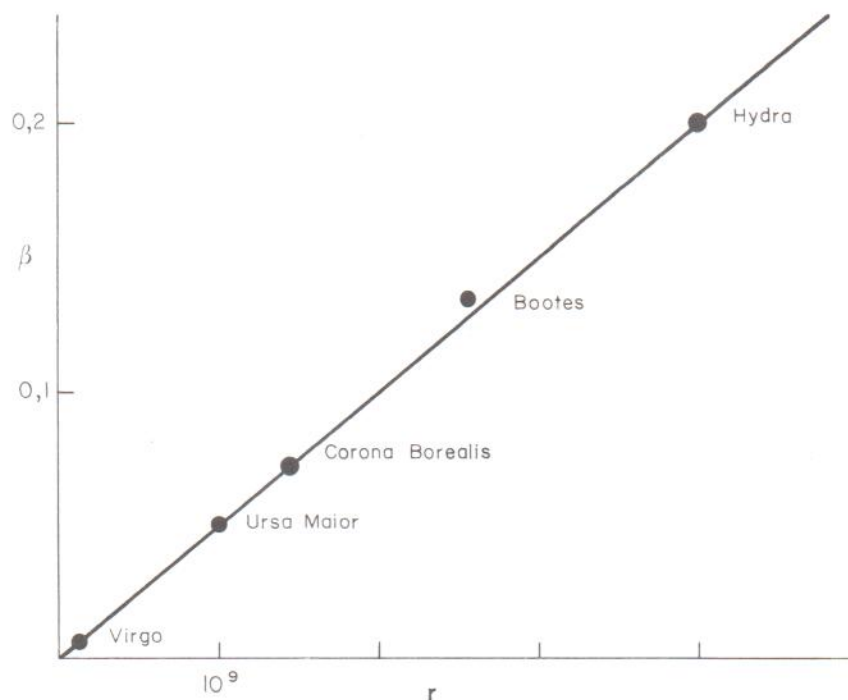


FIG. 10. Ley de Hubble.

resulta $S = 1,910^{10}$ años luz, de los que el telescopio del Monte Palomar apenas si abarca unas dos terceras partes.

El hecho de que el espacio observable sea finito y limitado no afecta a la geometría, ya que aquél es una porción (porción diferente para cada observador) del espacio global ilimitado. El tamaño del espacio observable puede variar con el tiempo, aunque en un instante dado tiene el mismo tamaño para todos los observadores, como pide el principio cosmológico.

La existencia del espacio observable permite deshacernos de la paradoja de OLBERS. Según la Mecánica Cuántica, fundada en 1900 por PLANCK, la energía de una radiación luminosa es inversamente proporcional a su longitud de onda. Mas he aquí que éstas dependen, según el efecto DOPPLER-FIZEAU, de la velocidad de alejamiento de la galaxia emisora; y a su vez, esta velocidad aumenta con la distancia. Por consiguiente, la energía luminosa emitida por las galaxias ya no coincide con la observada en la Tierra; esta última va decreciendo al aumentar las distancias. Un desplazamiento al rojo infinito estira infinitamente las longitudes de onda y reduce a cero la energía observada. De las galaxias situadas a una distancia mayor que el radio límite, aceptando que esto sea posible, no nos llegará jamás energía luminosa alguna. Por eso, el espacio global (no el observable) puede ser infinito y contener infinitas galaxias, sin que por ello la energía luminosa observada en la Tierra sea infinita.

Así pues, los trabajos de HUBBLE mostraban que el Universo, lejos de ser estático, como querían las concepciones de NEWTON y de EINSTEIN, era dinámico, más acorde a las ideas de DE SITTER de que el Universo estaría en expansión.

Por supuesto, las galaxias se alejan todas entre sí, y no solamente de la nuestra. Cualquier par de galaxias, de prueba y referencia, se alejan mutuamente. No somos

Modelo de Eddington

El Universo de EINSTEIN era estático, debido a que entre las fuerzas gravitatorias, que atraen a los cuerpos, y las de la repulsión cósmica, que los alejan entre sí, existía un equilibrio perfecto.

Este equilibrio se entiende a escala universal; en proporciones pequeñas de espacio, incluso en el interior de una galaxia, las fuerzas de la gravitación adquieren un carácter relevante.

Ya vimos cuán precario era ese equilibrio respecto a las variaciones de densidad, ya que la variación de un solo gramo de materia en el universo pleno einsteiniano rompería el equilibrio y haría que ya no fuese $R = \text{constante}$. Aunque este hecho se puede considerar como un peligro meramente imaginario, porque, ¿de dónde procedería o hacia dónde iría la materia que produjera, en el universo de EINSTEIN, este desequilibrio, si su espacio es cerrado y finito?, aun así, hay otras formas de variar la densidad; por ejemplo, la formación de condensaciones locales, tales como estrellas, o la disgregación de las ya existentes. En 1930, EDDINGTON demostró que el universo einsteiniano tenía un equilibrio que era inestable cuando se producían tales perturbaciones.

Se pueden encontrar muchos ejemplos de equilibrios análogos metaestables. Así, un cono puede teóricamente sostenerse sobre su vértice; pero cualquier perturbación produciéndole inclinación hacia un lado tenderá a aumentar y el cono caerá hacia ese mismo lado con velocidad cada vez mayor. También ocurre frecuentemente que un estanque en invierno continúe en estado líquido por debajo del punto de congelación del agua, $273,16^\circ \text{K}$; pero si se introduce en el agua un trozo de hielo, se perturba su equilibrio térmico y el estanque subenfriado se congela bruscamente.

Así, EDDINGTON supuso que en cierto momento de la existencia del universo einsteiniano se produjo una perturbación, en el sentido de la expansión. Esta perturbación pudo ser tan pequeña como se quiera imaginar; bastaría que un hombre levantase la mano para que el mundo einsteiniano comenzase a expandirse. Sin em-

Modelos de Friedmann (I)

Todos los objetos del Universo han tenido un comienzo, y después una historia. Hubo un nacimiento de la Galaxia, una formación del sistema solar, un comienzo de la vida en la Tierra y un amanecer del hombre; y cada ser vivo posee su propio nacimiento. ¿No era lógico pensar que el Universo había tenido también un principio?

Ya sabemos que las estrellas emiten su energía a partir de reacciones nucleares; acabada la fase en que se «quema» hidrógeno, comienza la del helio, etc... Ahora bien, resulta que el hidrógeno es el elemento más abundante del Universo, y un 90 por 100 de las estrellas, las de secuencia principal utilizan el proceso de fusión, descrito con anterioridad, como fuente de energía. Si el Universo tuviese a sus espaldas un pasado infinito, ya el hidrógeno se habría transmutado completamente en helio hace muchos eones (el eon o evo, es una unidad de tiempo muy usada, y equivale a 10^9 años).

Por otra parte, si en el Universo expansivo las galaxias se van alejando mutuamente, en el futuro estarán más lejos, pero en el pasado debieron estar más cerca. Se llegó así a la idea de que hubo un momento en que todas ellas coincidieron en un punto del espacio, en el que toda la materia del Universo se hallaba condensada en una única superestrella densísima, a la que LEMAÎTRE llamó *Atomo primitivo*, y GAMOW, inspirado en antiguas cosmologías orientales, *Huevo cósmico*.

LEMAÎTRE imaginó que el átomo primitivo era radiactivo y que estalló en una fantástica explosión, disgregándose en átomos-galaxias y posteriormente en átomos-estrellas.

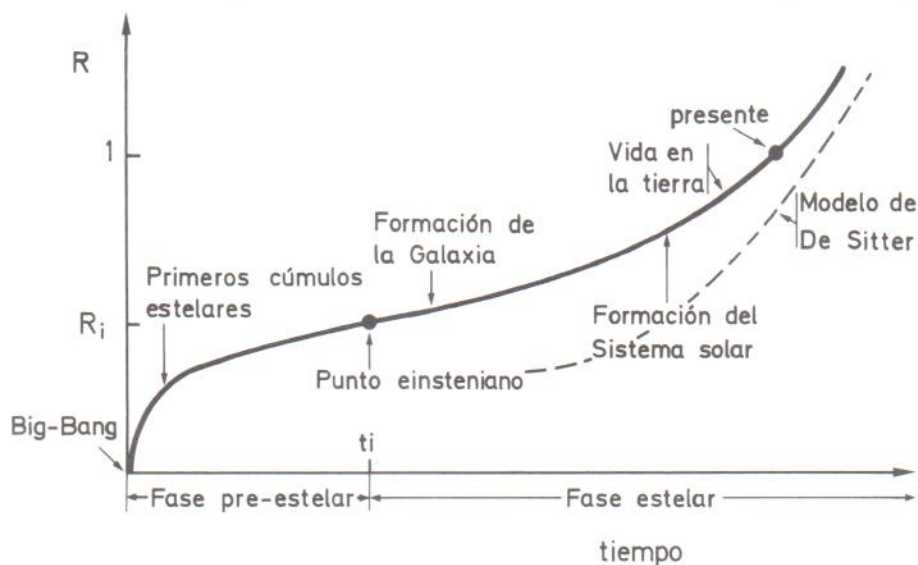
Más tarde, en la década de los cuarenta, GAMOW supuso que los elementos se formaban por fusión, es decir, en sentido inverso a la fisión. GAMOW explica que la presión interior del Huevo cósmico juntaba los protones del núcleo atómico y los electrones de la corteza, formando neutrones apiñados a presión, como sucede en las estrellas de neutrones, formándose «materia degenerada» o «hylem». El

El problema de la escala del tiempo surgió en base a un error de HUBBLE; la escala de distancias elegida por él le hacía considerar que el valor de T era $2 \cdot 10^9$ años, con lo cual el Universo era más joven que la Tierra (de edad $4,5 \cdot 10^9$ años, según la Geología). Más tarde, en 1944, se soslayaría este problema al fijar el valor de T en $1,9 \cdot 10^{10}$ años.

Las consideraciones anteriores hicieron que se buscaran modelos $R(t)$ que incluían este «punto de origen» ($t = 0$, $R = 0$). Entre otros, algunos de los modelos de FRIEDMANN incluían esa característica.

Vamos aquí a referirnos como «modelos de Friedmann» a los modelos con sólo la gravitación como fuerza en juego; es decir, sin repulsión cósmica ($\Lambda = 0$). Aunque hay tres modelos de esta clase, en este capítulo sólo vamos a considerar aquellos modelos en que R puede ser infinito: en uno de ellos el espacio es hiperbólico y en el otro es plano, pero en ambos casos, abierto e infinito.

Asimismo, en ambos casos, el Universo tiene origen en el *big-bang* ($t = 0$, $R = 0$), pero no tienen final, pues se expande eterna e indefinidamente (Fig. 13). Las galaxias se alejan unas de otras, en un viaje inmortal, interminable, por un espacio infinito. Cuando traspasen el horizonte cosmológico de la Galaxia, las perderemos de vista, pero para entonces la evolución estelar habrá reducido a las estrellas, en nuestra Galaxia, a un cementerio de enanas blancas o agujeros negros, es decir, a un conjunto de astros extintos; lo que evidentemente es una tétrica perspectiva.

FIG. 14. Modelo de Lemaître con $\Omega = 0,1$.

elementos fueron corregidas por GAMOW y precisadas después por HOYLE. Al aumentar el valor de R , comienza el predominio de la gravitación sobre la repulsión cósmica, se encuentran favorecidas las condensaciones a todo lo largo y ancho del Universo y nacen las estrellas a partir de nubes de hidrógeno. Las estrellas se agrupan en galaxias; las galaxias, en hipergalaxias; las hipergalaxias, en supergalaxias o cúmulos de cúmulos, y éstos en la metagalaxia o Universo (esta teoría del «Universo jerarquía» se debe a C. W. CHARLIER [1862-1934]). En esta fase, de expansión frenada, se van formando los astros; la mayor parte aún no existen. Es la fase preestelar.

Para cierto valor de R , que denominaremos R_i , se toca durante un instante el equilibrio einsteiniano. Pero hay un residuo de velocidad remanente positiva, que sirve para recomenzar el proceso de expansión.

Cuando R sobrepasa dicho valor R_i , el predominio de la repulsión expande eternamente el Universo. En esta fase existen la mayoría de los astros, aunque otros siguen naciendo; el Universo se encuentra en la fase estelar. La Galaxia se formó al principio de esta tercera fase, casi inmediatamente después de la fase einsteiniana. Por consiguiente, su edad será de unos $24 - 8,8 = 15,2$ evos, lo que coincide con las estimaciones experimentales (~ 15 evos). El futuro de este Universo es el mismo que se predice para los modelos vistos en el capítulo anterior, sólo que en este modelo de Lemaître la repulsión cósmica va disgregando las acumulaciones formadas en la fase preestelar, desde las supergalaxias a los cúmulos estelares y los mismos planetas. Para el instante $t \rightarrow \infty$, el Universo, reducida su densidad a cero por ser $R = \infty$, tiende al modelo sitteriano vacío. En la figura 14 se muestran todas estas vicisitudes cósmicas.

El Universo tiene en este modelo un origen, pero no un final, y su espacio es plano, abierto e infinito. Su futuro es el ya descrito al final del capítulo 9.

Hasta el momento, todos los modelos no estáticos a los que hemos pasado revista (de Sitter, Eddington, los dos modelos de Friedmann y el modelo de Lemaître) predicen ese destino futuro de expansión indefinida del Universo; pero vamos a pasar a examinar otros modelos con una visión radicalmente diferente del futuro cósmico.

cos, uno que se obtiene dando al parámetro Ω el valor 2, en el que la edad actual del Universo sería de unos 11 evos, siendo el periodo del ciclo de unos 120 evos, lo que daría unos 49 evos hasta el comienzo de la fase contractiva. En la figura 15 se representa dicho modelo.

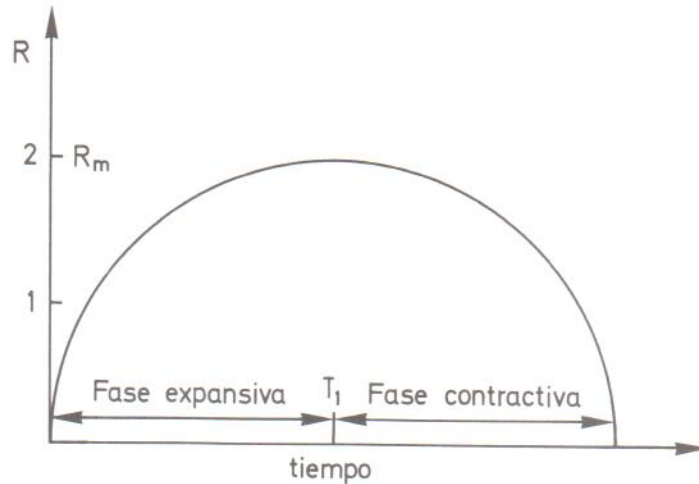


FIG. 15. Modelos de Friedmann, ciclos ($\Omega = 2$).

En este modelo, el Universo tiene un origen y un final, pero no en sentido absoluto, pues aunque en esos puntos se producen cambios drásticos, estos cambios son periódicos: los ciclos podrían durar eternamente, con lo que el Universo, repitiendo sin cesar su eterno retorno a los orígenes, poseería una especie de eternidad en sentido filosófico. Sería un Universo-Fénix, que renace y se renueva sin cesar. En cuanto al espacio, sería esférico, finito y cerrado.

y no en un laboratorio terrestre, o bien que la quinta fuerza sólo fuese un aspecto hasta ahora ignorado de la misma gravitación. Otros muchos autores prefieren mantenerla: EDDINGTON declaró «Prefiero volver a la teoría de Newton, a renunciar a la repulsión cósmica.» Lo cierto es que la mayor parte de los enfoques recientes se han hecho considerando sólo los modelos de Friedmann y desechando el de Lemaître.

La realidad es que si conociéramos con certeza el valor de Ω podríamos distinguir entre los modelos de Friedmann y el de Lemaître y quizá llegar a conclusiones prácticamente definitivas.

La densidad crítica, introducida al definir Ω , vale $\rho_c = 5 \cdot 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$; es un valor pequeño, pero ya vimos en el capítulo 6 que el Universo está muy vacío y, por tanto, en lo posible cabe que su densidad sea menor.

Por desgracia, la densidad del Universo no se conoce bien, P. DIRAC (1902-) calculó, basándose en las mediciones de las masas de ciertas galaxias típicas, que el valor de Ω era 0,12, con lo que nos encontraríamos en un Universo en expansión eterna, según los modelos de Friedmann no cíclicos y el modelo de Lemaître. No obstante, TOLMAN defendió su modelo criticando la anterior medición; podría haber más masa que la galáctica, en forma de hidrógeno frío intergaláctico o de indetectables agujeros negros, masa suficiente para aumentar la densidad hasta hacer que $\Omega > 1$.

Otro parámetro sugerido para tomar una decisión en la elección del modelo, fue la edad actual del Universo, t_a . Todos los modelos aceptables han de pasar (Fig. 16) por el punto P, que representa el «presente»; en este punto se cumple que $t = t_a$, y que $R = R_a$, y que la pendiente de la gráfica $R \leftrightarrow t$ sea $H \cdot R_a$.

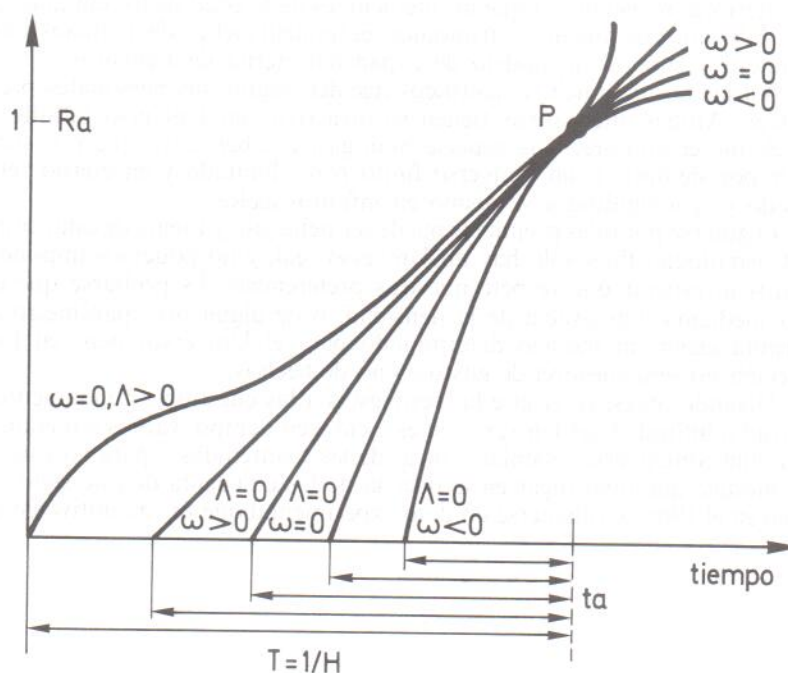


FIG. 16. La edad del Universo.

La teoría del estado estacionario

Todos los modelos considerados aceptables en la discusión anterior son modelos evolutivos, en los que la expansión del Universo hace que la densidad de éste sea función del tiempo, $\rho = \rho(t)$, e igualmente lo sea la constante de HUBBLE, $H = H(t)$; en todos ellos el Universo posee un origen en el tiempo.

Hacia 1948, BONDI, GOLD y HOYLE pensaban en una extensión al tiempo del principio cosmológico. Para ello, sustituyeron la frase «en una época dada» por «en toda época». El resultado fue denominado «principio cosmológico perfecto». Según esto, el Universo debería siempre aparecer idéntico ante cualquiera, independientemente del lugar y del instante en el cual se realizaba la observación.

Ahora ρ y H debían ser invariantes con el tiempo, no habría origen; este modelo tendría una geometría similar a la sitteriana si bien, como veremos a continuación, ahora ya no representaría un espacio vacío.

Pero en un modelo sitteriano el Universo se expande eternamente por un espacio plano, abierto e infinito. Para que, a pesar de esta expansión, la densidad se mantenga invariante, la masa habrá de aumentar con el tiempo. Esto significa que se crea continuamente materia en el Universo. La materia surgiría en el espacio intergaláctico en forma de hidrógeno, del cual, y con el paso del tiempo, se condensarían nuevas galaxias, de modo que en cualquier región del espacio, y en cualquier época, la densidad de las galaxias permanecería constante. Según esto, ya no era necesario que las galaxias hubieran convergido en un Huevo cósmico, ya que ahora, al invertir la marcha de la película del tiempo, las veríamos desaparecer; en este proceso hipotético de contracción, la creación continua pasaría a ser destrucción continua. En este modelo, el hidrógeno se crea constantemente a partir de la energía, dando lugar a nuevas galaxias, que llenan los huecos que dejan las galaxias ya existentes al alejarse unas de otras. De esta manera todo observador, en cualquier época y desde cualquier lugar, ve un universo que mantiene su densidad y características. El Universo permanece eternamente joven e igual a sí mismo; es la versión cósmica del mito de la eterna juventud del *Fausto* (de GOETHE).

a gran distancia. Así, los quasars serían cuerpos celestes propios de la «juventud del Universo», ya que la luz o radiación que nos llega ahora de ellos sería la que han emitido cuando el Universo se encontraba en sus comienzos. Como esta fase, el «comienzo», no existía en la teoría del estado estacionario, este hecho la desacreditaba.

c) La prueba final, más directa, llegó en 1965. Toda radiación lleva asociada una temperatura. Por consiguiente, cualquier cuerpo o sistema que radia energía, debe tener una temperatura proporcional a la frecuencia de la radiación. Unos 10^{-10} segundos después del *big-bang*, la temperatura absoluta de la radiación debió de ser del orden de los 10^{11} K, lo que, según la ley de Wien, nos lleva a una frecuencia, dentro del espectro de ondas electromagnéticas, que corresponde a una radiación gamma. Actualmente, la radiación debe tener una temperatura de 3 K, es decir, debe estar en forma de microondas de radio de unos 7 centímetros de longitud de onda. Como el *big-bang* impelió en todas las direcciones a las galaxias, ya que la distribución de éstas aparece en la actualidad como isótropa, es decir, con igual distribución en todas las direcciones, la mencionada radiación de microondas debería aparecer en la actualidad como un fondo isótropo, podríamos decir, que se debe escuchar como un sonido de fondo en todo el Universo.

En 1965, y de forma casual, A. PENZIAS y R. WILSON encontraron ese «fósil cosmológico», ese fondo isótropo de microondas de 7 centímetros y 3 K, que ante nosotros aparece como un eco de la gran explosión (*big-bang*). A partir de este descubrimiento, la teoría del estado fijo ha sido totalmente abandonada.

BIBLIOGRAFIA Y LECTURAS RECOMENDADAS

A continuación presentamos algunos libros y artículos en relación mayor o menor con el tema tratado. Algunas de las citas se han usado extensamente en la redacción de este libro; en otras, el lector interesado podrá hallar bibliografía complementaria sobre el tema.

- Almanaque Mundial 1976, *El Universo, alfa y omega*, E.A.S.A.
- ASIMOV, I., *Cien preguntas básicas sobre la Ciencia*, Alianza Editorial, Madrid, 1977.
- ASIMOV, I., *El Universo*, Alianza Editorial, Madrid, 1979.
- ASIMOV, I., *¿Hay alguien ahí?*, Ed. Picazo.
- ASIMOV, I., *Introducción a la Ciencia*, Plaza-Janés, Barcelona.
- BONDI, H., *Cosmología*, Ed. Labor, 1972.
- BORN, M., *Experiment and Theory in Physics*, Cambridge, 1943.
- BUSCHER, G., *El libro de las maravillas*, Ed. Mateu.
- CLARK, G. W., «Estrellas de rayos X en cúmulos globulares», *Investigación y Ciencia*, diciembre, 1977.
- COLEMAN, J. A., *La relatividad y el hombre común*, Ed. Sudamericana.
- COLEMAN, J. A., *Teorías modernas del Universo*, Ed. Sudamericana.
- DELACHET, A., *La geometría contemporánea*, Ed. Fabril.
- DICKMAN, R. L., «Los glóbulos de Bok», *Investigación y Ciencia*, agosto, 1977.
- DIRTHFURTH, H. VON, *Hijos del Universo*, Plaza-Janés, Barcelona.
- DUQUESNE, M., *Materia y antimateria*, Ed. Fabril.
- EDDINGTON, A. S., *The expanding Universe*, Cambridge, 1933.
- EINSTEIN, A., y otros, *La teoría de la relatividad*, Alianza Editorial.
- EINSTEIN, A., *The Theory of Relativity*, Methuen, 1936.
- FERREROS, A., *El Universo*, Ed. Bruguera.
- GEHALLE, T. R., «El parsec, central de la Galaxia», *Investigación y Ciencia*, septiembre 1979.
- GLASTONE, S., *Sourcebook on the Space Sciences*, Van Nostrand, 1965.
- GOTT, J. R., y otros, «¿Expansión indefinida del Universo?», *Investigación y Ciencia*, octubre, 1976.
- HERFIEL, A., *La Ciencia actual y Dios*, Ed. Vasallo de Mumbert.
- HOYLE, F., *De Stonehenge a la cosmología contemporánea*, Alianza Editorial.
- HUBBLE, E., *The Observational Approach to Cosmology*, Oxford, 1937.
- JACOT, L., *El Universo y la Tierra*, Espasa-Calpe.
- JOHNSON, M., *Time, Knowledge and the Nebulae*, Oxford, 1948.
- LANDAU, L. y RUMER, Y., *Qué es la teoría de la relatividad*, Ed. R. Aguilera.
- LEMAÎTRE, G., *L'atome primitif*, Ginebra, 1948.
- MEIER, D. L. y SUNYAEN, R. A., «Las galaxias primitivas», *Investigación y Ciencia*, enero 1980.
- MIRAVITLLES, L., *Visado para el futuro*, Salvat.
- NOGUER (Ed.), *El Universo*, Ed. Noguer.
- D'MANQUE, J., *Energía en evolución*, Plaza-Janés.
- PAPP, D., *El problema del origen de los mundos*, Espasa-Calpe.
- PAPP, D., *Más allá del Sol*, Espasa-Calpe.
- REGGE, T., *Einstein, el Científico*, «El viejo topo», junio 1979.
- ROMAN, C. A., *Secretos del Cosmos*, Salvat.
- SALVAT (Ed.), *Origen y evolución del Universo*, Ed. Salvat.
- SANTALÓ, L. F., *Vectores y tensores*, E. U. de B. A.
- SEARS, F. y ZEMANSKY, M., *Física General*, Ed. Aguilar.
- SINGH, J., *Ideas y teorías fundamentales de la moderna Cosmología*, Alianza Editorial.
- STRICKLAND, J., *Supermundos*, Plaza-Janés.
- STROM, S. E. y STROM, K. M., «Evolución de las galaxias de disco», *Investigación y Ciencia*, junio 1979.
- STRUVE, O. y ZEBERGS, V., *Astronomy of the 20th Century*, Macmillan, 1962.
- SULLIVAN, W., *No estamos solos*, Noguer Ed.
- TOLMAN, R. C., *Relativity, Thermodynamics and Cosmology*, Oxford, 1934.
- TOULMIN, S., *La filosofía de la Ciencia*, Fabril Ed.
- WEINERG, S., *Los tres primeros minutos del Universo*, Alianza Ed.
- WELLS, H. G., *La máquina del tiempo*, Editorial ZYX.