

ESTUDIOS

[EL TIEMPO EN LA RELATIVIDAD]

Carlos López

Departamento de Física
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Universidad de Chile.

RESUMEN

Se describe cómo la Teoría General de la Relatividad es muy superior a la Teoría de Gravitación de Newton para el análisis de la cosmología. Se discuten diversos modelos estáticos de Universo con o sin constante cosmológica y se verifica que ninguno es estable. El problema se resuelve en el año 1929 con ayuda del telescopio de Monte Wilson en California, demostrando que las galaxias se alejan unas de otras. Posteriormente, en el año 1965, se descubre la radiación de microondas y se discute la posibilidad de que el Universo colapse.

Las visiones del espacio y del tiempo que deseo presentarles han brotado exclusivamente de la física experimental, y en esto reside su fortaleza. Son radicales. De aquí en adelante el espacio por sí mismo y el tiempo por sí mismo, están condenados a desvanecerse en meras sombras, y sólo una especie de unión de los dos preservará una realidad independiente
Minkowski, 1908.

La teoría general de la relatividad ha tenido su campo de aplicación más fecundo en el dominio de la Cosmología, esto es, en el estudio del Universo en su conjunto. La teoría de gravitación de Newton había llegado a un callejón sin salida en sus esfuerzos por establecer un modelo coherente del Universo. La relatividad general, en cambio, por el hecho de ser una teoría geométrica en la que el espacio y el tiempo desempeñan un papel protagónico, estaba especialmente acondicionada para atacar el problema cosmológico desde nuevas perspectivas.

Contemplado en detalle, el Universo se nos presenta como un sistema complicado y caótico. Las estrellas, galaxias y cúmulos de galaxias son concentraciones de materia separadas por espacios casi vacíos y distribuidos aparentemente al azar. Sin embargo a gran escala, cuando se consideran regiones de miles de millones de años luz de extensión, desaparecen las irregularidades y el conjunto puede considerarse homogéneo e isótropo. La situación es análoga a la que se presenta con los líquidos y gases; a nuestra escala se comportan como si fueran fluidos continuos caracterizados por su presión, densidad y temperatura. A escala microscópica, en cambio, existe una mezcla desordenada de moléculas moviéndose en todas direcciones. Las

propiedades globales de líquidos y gases pueden estudiarse considerándolos como un continuo. En primera aproximación se considera también al Universo como un gas ideal con densidad y presión constantes en todo el espacio. Es la única manera de tratarlo matemáticamente en forma simple. Luego, en una segunda etapa, se pueden estudiar las inhomogeneidades locales (galaxias). Como sólo podemos observar una porción del Universo, aún con los más grandes telescopios, se postula como hipótesis de trabajo que el Universo es homogéneo e isótropo. Este es el "principio cosmológico", el cual puede reformularse diciendo que en un instante dado el Universo presenta el mismo aspecto (a gran escala) en todas partes. Podemos describir entonces el contenido de materia y radiación como un gas ideal, caracterizado por su densidad (ρ) y presión (p). Está claro que estas cantidades tienen el mismo valor numérico en todo el espacio; pero, en general, deben considerarse funciones del tiempo cósmico.

Para la física newtoniana, el principio cosmológico implicaba, además, que el Universo debía ser infinito. En caso contrario se perdería la homogeneidad en los bordes o confines donde "termina" el espacio. Aceptando esta hipótesis se llega inmediatamente a una contradicción. Para entenderlo imaginemos una esfera de radio r cuyo origen es un punto cualquiera P del espacio. La homogeneidad e isotropía exigen que se tenga simetría esférica con centro en P (véase la figura 1). Consideraremos ahora una "pequeña" masa (m)

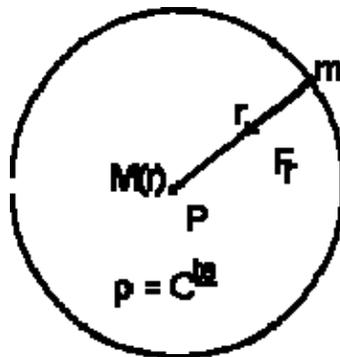


Fig. 1
Fuerza que actúe sobre una masa de prueba.

ubicada en la superficie de esta esfera (se trata naturalmente de una esfera matemática). Para fijar ideas podemos pensar que esta masa de prueba es una estrella (actualmente es más apropiado reemplazarla por una galaxia o tal vez por un cúmulo de galaxias). Debido a la simetría esférica, la fuerza F_r que actúa sobre m depende sólo de la materia contenida en el interior de la esfera y es igual a la que existiría si toda esta masa estuviera concentrada en el centro P de la esfera (teorema de Newton). Según la ley de la inversa del cuadrado de la distancia, la fuerza es igual a

$$F_r = G \frac{mM(r)}{r^2}$$

Donde G es la constante de Newton y $M(r)$ es la masa contenida en la esfera, es decir,

$$M(r) = \frac{4}{3} \rho r^3$$

Por lo tanto, la fuerza F_r resulta ser lineal en r

$$F_r = (G m \frac{4}{3} \rho r) r = C^{te} r$$

Este resultado nos dice que la fuerza que actúa sobre la estrella está dirigida hacia el punto P y **crece** con la distancia. La conclusión es que la estrella debe caer hacia P con una aceleración que es tanto mayor cuanto más lejos se encuentre de ese punto. El equilibrio es entonces imposible. La homogeneidad e isotropía nos dicen que P puede ser cualquier punto del espacio, de manera que toda estrella debe caer hacia todo punto del espacio. Esto significa que el conjunto de las estrellas, el Universo entero, debe desplomarse simétricamente. Todas las distancias se reducirán a la mitad, a la cuarta parte, etc., hasta que se produzca el colapso catastrófico del Universo.

El panorama del Universo que presentaba la astronomía de principios de siglo era diametralmente opuesto a la visión apocalíptica que acabamos de reseñar. La parte del Universo conocida en esa época era el conjunto de estrellas de nuestra galaxia (la Vía Láctea) cuyas velocidades propias son muy pequeñas. Todo hacía sugerir que el Universo se mantenía en equilibrio estático, en abierta contradicción con el modelo teórico.

A la misma conclusión se llega tratando de responder una pregunta que parece muy ingenua: ¿Por qué el cielo nocturno es oscuro? Vemos las estrellas brillando sobre un fondo negro pese a que debería ser tan brillante como el Sol si en verdad el Universo es homogéneo e infinito. Este sorprendente resultado es consecuencia de la ley de la inversa del cuadrado de la distancia referido a la intensidad de la radiación emitida por una estrella. En la figura 2 se muestra claramente que la radiación emitida por una zona

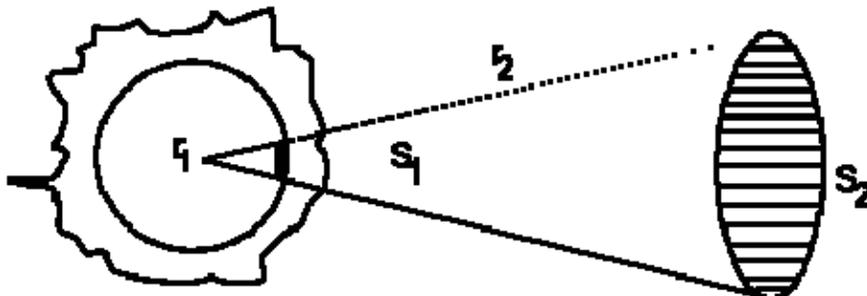


Fig. 2

La radiación emitida por S_1 cubre a la distancia r_2 una superficie S_2 . La intensidad (radiación por unidad de área) decrece con el cuadrado de la distancia.

De la superficie de una estrella de área S_1 se propaga en el interior de un cono cuyo vértice coincide con el centro de la estrella. A una distancia r_2 el área S_2 es igual a

$$S_2 = S_1 \frac{(r_2)^2}{(r_1)^2}$$

y como la intensidad es igual a la radiación por unidad de área se tiene que

$$I_2 = I_1 \frac{(r_1)^2}{(r_2)^2} = \frac{C^{cte}}{(r_2)^2}$$

Por otro lado, el número de estrellas que se encuentran a una distancia r de un cierto punto P crece con el cuadrado de la distancia, de manera que la intensidad total debida a la contribución de todas las estrellas es independiente de r . Como el número de estrellas es infinito, la intensidad total debiera ser también infinita. En realidad, parte de la radiación es absorbida en el camino, debido a que las estrellas se apantallan entre sí, dando por resultado que la intensidad total sea igual a la de la superficie de una estrella promedio. En resumen, todo el cielo debiera verse tan brillante como la superficie del Sol. Esta es la paradoja de Olbers, enunciada en 1826. Su existencia es otra prueba de la inconsistencia del modelo de Universo considerado.

Para salvar estas dificultades, sin abandonar la teoría newtoniana de gravitación, se sugirió que el Universo no es homogéneo como lo exige el principio cosmológico. Sería este el caso por ejemplo si no existieran otras galaxias aparte de nuestra Vía Láctea. Los cien mil millones de estrellas que contiene formarían un Universo-Isla flotando en el espacio infinito. La paradoja de Olbers no se plantea ahora debido a que el número total de estrellas es finito. El colapso hacia el centro de la galaxia puede evitarse reemplazando el equilibrio estático por un equilibrio dinámico producido por la rotación de la galaxia en torno a un cierto eje (esta descripción es correcta en el caso de una galaxia, como lo sabemos hoy, pero falsa en el caso del Universo). La situación es parecida a la que existe en el sistema solar. La Tierra no cae hacia el Sol o, si se prefiera, está cayendo constantemente, pero se mantiene en su órbita debido a la inercia. Este modelo de Universo-Isla presenta también serias dificultades que lo hacen insostenible. El equilibrio dinámico no puede mantenerse indefinidamente debido a que las

estrellas paulatinamente se "evaporan" y abandonan el sistema para irse al infinito. Esto no ocurre con el sistema solar debido a la enorme masa del Sol comparada con la de los planetas. La perturbación producida en la órbita de la Tierra por los demás planetas es demasiado pequeña para alterar su estabilidad. En el caso de las estrellas la situación es muy diferente ya que todas ellas tienen masas comparables. No existe una masa central que sirva de núcleo de atracción, garantizando la estabilidad del conjunto. Las estrellas se comportan como las moléculas de un gas; debido a la interacción mutua, una de ellas alcanzará la velocidad de escape y se irá al infinito. En un tiempo largo pero finito el Universo-Isla habrá desaparecido.

Este era el callejón sin salida en que se encontraba la cosmología newtoniana a comienzos del siglo. El problema cosmológico no tenía solución satisfactoria.

Cuando Einstein formuló su teoría general de la relatividad, en 1916, se propuso de inmediato aplicarla al problema cosmológico. Tenía la esperanza de que la nueva teoría de gravitación tuviera éxito donde la antigua había fracasado. Pronto se dio cuenta que se trataba sólo de una ilusión ya que las mismas dificultades seguían estando presentes a pesar del cambio en la ley de fuerzas. Para Einstein el problema era todavía más complicado debido a que exigía que se cumpliera el principio de Mach, es decir, que la inercia estuviera determinada por la distribución de las masas. Para un Universo-Isla, una partícula muy distante del centro de masas debería tener una inercia despreciable, es decir, una masa inerte muy pequeña que tendería a cero en el infinito. La relatividad general, en cambio, nos dice que la inercia sería la misma en el centro del Universo que en el infinito. El principio de Mach, al igual que el principio cosmológico, exige un modelo de Universo homogéneo e isótropo. Pero ahora ya no es obligatorio que el Universo sea infinito como en la teoría de Newton, la cual introduce un espacio y tiempo absolutos. Esta posibilidad es consecuencia de la curvatura del espacio-tiempo producida por el conjunto de todas las masas del Universo. El Sol, por ejemplo, crea una curvatura del espacio-tiempo a su alrededor que explica el movimiento de los planetas (leyes de Kepler) del mismo modo como la Tierra curva el espacio-tiempo en su vecindad (aunque mucho menos que el Sol) determinando el movimiento de la Luna o la caída de las piedras (leyes de Galileo). Como el alcance de las fuerzas gravitacionales es infinito, estas curvaturas se extienden a todo el espacio, naturalmente con magnitudes decrecientes con la distancia. Es concebible entonces que una distribución de materia con una densidad suficientemente grande sea capaz de curvar el espacio de tal manera que se cierre sobre sí mismo. El Universo sería espacialmente finito; pero ilimitado manteniendo en todas partes la homogeneidad e isotropía. Su forma corresponde a la hipersuperficie tridimensional de una esfera de cuatro dimensiones (la cuarta dimensión es sólo una ficción matemática). Se comprende mejor esta posibilidad si se piensa en la superficie de la Tierra como un espacio de dos dimensiones. Este espacio es finito; pero no tiene límites. Si nos movemos en línea recta (geodésica), llegaremos de nuevo al punto de partida después de dar la vuelta al mundo. En

el caso de la Tierra, por cierto, la tercera dimensión es real; pero para los efectos de nuestra comparación debemos imaginar que sólo existe la superficie de la esfera. En nuestro Universo, en cambio, el espacio tiene tres dimensiones de modo que nos es imposible imaginarnos la curvatura. Pero matemáticamente se la concibe sin dificultad, generalizando las expresiones correspondientes al agregarle una dimensión más. Este Universo esférico fue propuesto por Einstein en su intento por resolver el problema cosmológico. Estudiémoslo ahora con más detalle.

El Universo de Einstein es esférico respecto de sus tres dimensiones espaciales. El tiempo, en cambio, fluye sin ser afectado por la materia: es rectilíneo. ¿Cómo podríamos verificar directamente por medio de la observación que nuestro Universo es esférico? Para entenderlo es útil volver al ejemplo simple de un Universo bidimensional como la superficie de la Tierra. Consideremos seres chatos, habitantes de un tal Universo. ¿Cómo podrían saber que viven en una esfera y no en un plano si para ellos no existe la tercera dimensión? La geometría debe su nombre precisamente a la medida de la Tierra; por lo tanto la curvatura debe poderse determinar efectuando mediciones. En la figura 3 el centro O de la esfera no pertenece al Universo. Lo incluimos sólo porque es más fácil visualizar una superficie esférica bidimensional si se la considera "sumergida" en un espacio de tres dimensiones; pero debemos tener presente que la tercera dimensión en

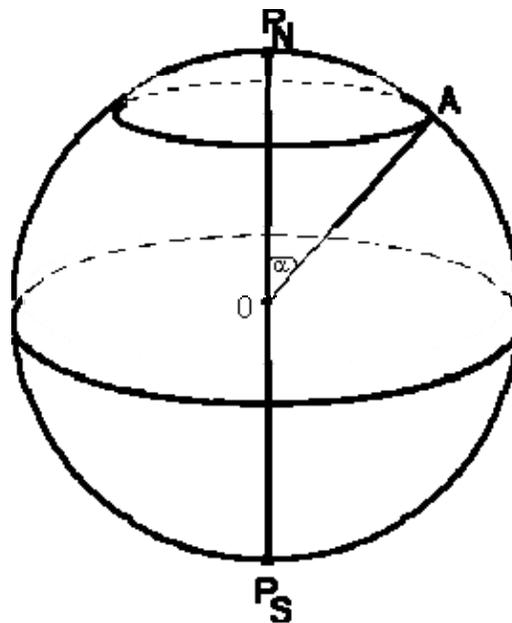


Fig. 3

Geometría de un Universo esférico bidimensional

este caso es una ficción matemática. Fijemos ahora un punto de referencia en la esfera, por ejemplo el "polo norte" P_N y consideremos otro punto A . La distancia de P_N hasta A es igual a $R\alpha$, siendo R el radio del Universo (radio de la esfera) y

a el ángulo polar (colatitud). Todos los puntos ubicados a la distancia Ra de P_N se encuentran en una circunferencia (paralelo). La longitud de esta circunferencia crece cuando a varía entre cero y 90 grados, luego disminuye hasta anularse en el punto P_S , antípoda de P_N . La tabla I registra para estos ángulos los valores de la distancia (d) a P_N , la longitud (l) de la circunferencia asociada y el área (A) del casquete esférico limitado por esta circunferencia. Para los habitantes de este Universo esférico, valores crecientes de a entre 0° y 180° definen círculos concéntricos de radios también crecientes. Las áreas de estos círculos (en realidad casquetes esféricos) crecen también aunque no son proporcionales a los cuadrados de los radios. Lo más sorprendente, para quienes se creían

TABLA I

a	$\frac{\pi}{2}$	p
d	$\frac{\pi}{2} R$	p R
l	2p R	0
A	2p R ²	4p R ²

viviendo en un plano, es que las longitudes de las circunferencias de estos círculos, a partir de la distancia $\frac{1}{2} p R$, empiezan a disminuir hasta anularse cuando la distancia vale $p R$. Existe un único punto cuya distancia a P_N es igual a $p R$, se trata del "polo sur" P_S , antípoda de P_N . El área total del Universo es finita e igual a $4 p R^2$. El Universo es finito pero ilimitado. Rápidamente los matemáticos con estos datos llegarían a la conclusión que están viviendo en un Universo esférico de radio R .

Todo esto nos parece obvio debido a que nosotros vivimos en un espacio de tres dimensiones. Los seres bidimensionales, en cambio, no podrían visualizar la tercera dimensión. La situación cambia cuando consideramos el caso del Universo de Einstein. Carecemos de una cuarta dimensión que nos permita visualizar su geometría; pero podemos calcular sus propiedades por analogía con el caso anterior. Consideremos un sistema de esferas concéntricas de radios crecientes y efectuemos mediciones. Descubriremos que las áreas de estas esferas no crecen en proporción del cuadrado del radio y que a partir de un cierto radio empiezan a disminuir hasta llegar a cero. El volumen total del Universo es finito aunque no existen límites. Nos vemos obligados a concluir que vivimos en un espacio esférico. Es la frontera de una esfera de cuatro dimensiones, al igual

que la superficie de la Tierra es la frontera de una esfera de tres dimensiones. El Universo esférico de Einstein salvaba algunas de las dificultades de los modelos newtonianos. Se elimina la paradoja de Olbers por ser finito; satisface el principio cosmológico ya que todos los puntos del espacio son equivalentes debido a que la curvatura de una esfera es constante. Por último, en este Universo vale el principio de Mach por ser homogéneo e isótropo. Desgraciadamente estas características exigen que el Universo se encuentre en equilibrio estático, condición imposible de satisfacer tanto en la teoría de gravitación de Newton como en la relatividad general, debido a que en ambas la fuerza de gravedad es siempre atractiva.

En la época en que Einstein trabajaba en el problema cosmológico (1917), toda la evidencia astronómica señalaba que el Universo era estático a gran escala. Por este motivo se vio obligado, contra su voluntad, a modificar sus ecuaciones de la relatividad general. Agregó un término que no altera los resultados a escala del sistema solar, ni siquiera para dimensiones mayores como la galaxia y aún más lejos. La diferencia sólo se hace importante a escala cosmológica, es decir, a distancias comparables con el radio del Universo. Este término contiene una nueva constante de gravitación, proporcional a la densidad de materia; es la constante cosmológica Λ . La introducción del término cosmológico equivale a incluir una nueva fuerza gravitacional repulsiva que compensa a gran escala el efecto atractivo de la gravitación usual. Es así como el Universo de Einstein se mantiene en equilibrio estático. Por medio de este artificio consiguió Einstein resolver el problema cosmológico. Por cierto la solución es muy poco elegante, aunque correcta desde el punto de vista matemático. Se pierde el aspecto más valioso de la teoría de gravitación de Newton en donde las **mismas** leyes que rigen el movimiento de los proyectiles en la Tierra, determinan también el movimiento de los astros en el cielo. Por último, desde el punto de vista epistemológico, una teoría con dos constantes universales es más pobre que aquella que sólo contiene una. Esta solución de parche no era del agrado de Einstein; pero tuvo que adoptarla forzado por la evidencia astronómica.

Una de las motivaciones que tuvo Einstein para introducir la constante cosmológica fue la creencia de que las nuevas ecuaciones no admitían soluciones en contradicción con el principio de Mach. El Universo plano de Minkowski, por ejemplo, no satisface las ecuaciones cuando Λ es distinta de cero. Antes de un año, sin embargo, el astrónomo de Sitter encontró una solución correspondiente a un Universo vacío; pero con constante cosmológica. Este Universo obviamente no satisface el principio de Mach puesto que hay inercia sin que existan masas que la originen. La existencia de este contraejemplo no invalida la solución encontrada por Einstein, puesto que esta última sí satisface el principio de Mach.

El inconveniente más serio del Universo de Einstein, que lo descarta como solución del problema cosmológico, fue descubierto 10 años después (en 1927) por el abate belga Lemaître. Resulta que el equilibrio del Universo de Einstein no

es estable, lo que significa que la más mínima perturbación interna provocará la ruptura total del equilibrio, iniciando una expansión indefinida o un colapso catastrófico. Apenas dos años después el astrónomo Hubble estableció, con ayuda del telescopio del Monte Wilson en California, que las galaxias no están en equilibrio. Por el contrario, se alejan de la nuestra con velocidades proporcionales a sus distancias. Las velocidades se calculan espectroscópicamente midiendo el corrimiento hacia el rojo de las líneas espectrales que ellas emiten. Se trata del efecto Doppler, válido en primera aproximación en relatividad general. Las distancias se miden de varias maneras, por ejemplo basándose en la luminosidad aparente como en el caso de las estrellas. La relación entre la velocidad y la distancia es lineal como lo indica la figura 4.

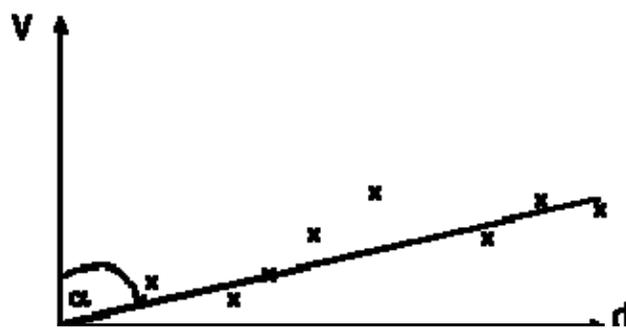


Fig. 4
Diagrama de Hubble

Es importante aclarar el significado del efecto Hubble. No debe interpretarse la fuga de las galaxias pensando que nos encontramos en el centro de la expansión. Observaríamos exactamente lo mismo si estuviéramos viviendo en cualquier otra galaxia debido a que el conjunto de las galaxias es el que se expande; el Universo está en expansión. En la analogía bidimensional que habíamos considerado antes, si imaginamos las galaxias como puntos incrustados en un globo que se infla, se observará precisamente que estos puntos se alejan unos de los otros con velocidades proporcionales a sus distancias relativas (véase la figura 5). Las dimensiones de cada galaxia, sin embargo, y

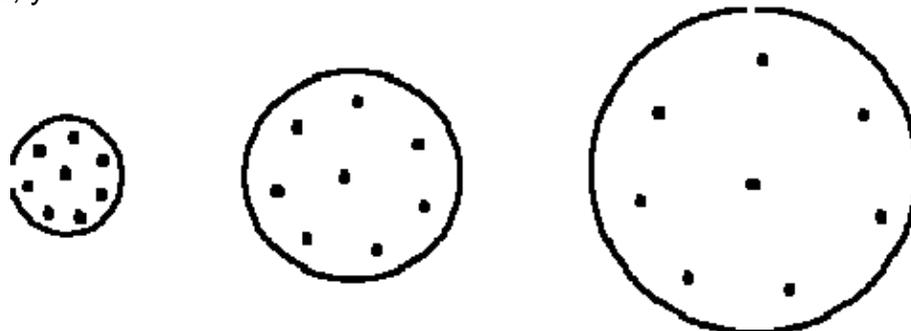


Fig. 5
Universo bidimensional en expansión

hasta la de los cúmulos de galaxias, se mantienen constantes debido a que constituyen sistemas de estrellas o galaxias fuertemente ligadas por fuerzas gravitacionales locales que superan con creces el efecto global que produce la expansión. Si todas las dimensiones aumentaran en la misma proporción, incluyendo los átomos y partículas elementales, la expansión no podría ser observada; no habría corrimiento hacia el rojo; el concepto de expansión carecería entonces de significado físico. Este ejemplo del globo nos muestra también que ningún punto del Universo es el centro de la expansión. Si se piensa en el centro de la esfera, debemos recordar que existe sólo en la tercera dimensión y no pertenece al Universo considerado. En nuestro espacio la situación es análoga; pero ahora el "globo" es la superficie tridimensional de una esfera de cuatro dimensiones. Es notable que el modelo estudiado por de Sitter en 1918 correspondía a un Universo en expansión, aunque vacío, y de extensión infinita.

La ley de Hubble nos muestra que el Universo no está en equilibrio estático ni tampoco dinámico; simplemente no hay equilibrio. Algo parecido a una gigantesca explosión inició la expansión del Universo y posteriormente el proceso se ha mantenido por inercia superando la fuerza atractiva de la gravitación. Es como una piedra lanzada al aire que se mueve cierto tiempo en sentido contrario a la atracción de la Tierra, debido a su energía cinética inicial. Si el Universo no está en equilibrio, desaparece automáticamente el problema cosmológico. Ya no es necesario introducir la constante cosmológica, cuyo objeto básico era conseguir el equilibrio por medio de una fuerza repulsiva. Su presencia tampoco garantiza la validez del principio de Mach como lo prueba el contraejemplo encontrado por de Sitter.

Las ecuaciones de la relatividad general sin constante cosmológica poseen soluciones que describen universos en expansión o en contracción (colapso). Estas soluciones ya habían sido encontradas en 1922 por el matemático ruso Friedmann para Universos esféricos como el de Einstein y posteriormente en 1924 para Universos hiperbólicos cuya extensión espacial es siempre infinita. Cuando Einstein se enteró de la expansión del Universo, manifestó que ya no tenía ningún sentido conservar la constante cosmológica. Su introducción se justificaba cuando se creía que el Universo estaba en equilibrio estático; pero ahora que sabemos que no está en equilibrio es innecesario complicar en forma tan poco elegante la teoría.

La expansión del Universo no sólo resuelve el problema del equilibrio sino también la paradoja de Olbers. Aunque el Universo sea infinito, el corrimiento hacia el rojo de la luz de las galaxias involucra una pérdida de energía que crece con la distancia. Quedaba sólo una dificultad de tipo cuantitativo relacionada con la edad del Universo. Debido a la atracción gravitacional la velocidad de expansión va disminuyendo con el tiempo. Si suponemos que esta velocidad es constante, obtenemos una cota superior para el intervalo de tiempo transcurrido

desde el instante en que todas las galaxias estaban juntas, es decir, de la edad del Universo. De la figura 4 se deduce la relación.

$$t_H = \frac{d}{v} = \frac{1}{H} = \text{tg } a$$

siendo $H = v/d$, la "constante" de Hubble. Introduciendo el valor observado de $\text{tg } a$ (recíproco de H) se obtenía para el "tiempo de Hubble" (t_H) un valor de dos mil millones de años (2×10^9 años). Debido al efecto retardador de la atracción, la edad del Universo debía ser menor aún que t_H .

El valor obtenido para la edad del Universo no podía conciliarse con otros datos independientes sobre la edad de objetos astronómicos. El método basado en la desintegración del uranio fija la edad de la Tierra en unos cinco mil millones de años (5×10^9 años). Sorprendentemente, la edad del Sol, calculada según la teoría de evolución estelar, coincide con este valor. El análisis de las piedras lunares nos ha informado que la Luna tiene una edad similar, lo que concuerda también con la edad de los meteoritos. Podemos afirmar que el sistema solar completo se formó poco más de cinco mil millones de años atrás. La edad de la vía Láctea es del orden de unos 10^{10} años y como se trata de una galaxia típica, esto significa que la edad del Universo, como hoy lo conocemos, no debe ser mucho mayor que ese valor. El orden de magnitud dado por el tiempo de Hubble no es tan absurdo como se pensaba en esos años. No podemos confiar ciegamente en la exactitud de los datos de observación. La medida de la distancia de las galaxias depende de varios factores usados en el proceso de calibración, de modo que una discrepancia en un orden de magnitud no debe considerarse demasiado significativa.

Los teóricos, acostumbrados a aceptar sin crítica los datos de los astrónomos observacionales, interpretaron esta discrepancia como una falla de los modelos y se dedicaron a la búsqueda de nuevos modelos que fuesen compatibles con el valor observado de la edad del Universo. Algunos, como Lemaître y Eddington, volvieron a introducir la constante cosmológica obteniendo Universos en expansión acelerada; el valor del podía ajustarse hasta obtener la edad correcta. Un grupo de ingleses tan destacados como Bondi, Gold y Hoyle imaginaron algo completamente distinto. Abandonando la relatividad general postularon un principio cosmológico perfecto, es decir, que el Universo presenta el mismo aspecto a gran escala no sólo en cualquier punto del espacio, sino también en cualquier instante del tiempo. Se trata de un Universo infinito en el espacio y en el tiempo que está en equilibrio; pero este equilibrio no es estático sino estacionario. Para evitar que la densidad de materia disminuya debido a la expansión, postularon la creación continua de nueva materia en forma de átomos de hidrógeno. Esta materia da luego origen a nuevas galaxias que vienen a ocupar el espacio vacío producido por el alejamiento de las galaxias más viejas. Así, una fotografía que uno le tome al Universo ahora será igual a otra que se hubiera tomado diez mil millones de años antes. La creación de materia es un

proceso que viola las leyes de conservación no sólo de la relatividad general sino de la física clásica, las cuales han sido establecidas por precisos experimentos. Los partidarios de la teoría del estado estacionario argumentan que la tasa de creación es tan pequeña (un átomo de hidrógeno por año en mil millones de litros de espacio) que cae fácil dentro del margen de error con que se han establecido las leyes de conservación. La teoría del estado estacionario era muy atractiva desde el punto de vista filosófico debido a que en ella no se plantea ninguno de los problemas que afectan a las otras teorías. Por ejemplo, al ser el Universo eterno no existe el problema del principio ni el problema del final. Un Universo de este tipo es siempre igual a sí mismo; ha existido desde el infinito pasado y seguirá existiendo hasta el infinito futuro. Nacen y mueren las estrellas y galaxias, pero el Universo permanece siempre igual.

Desde que se formuló en 1948 la teoría del estado estacionario, dominó sin rivales a todas las demás hasta mediados de la década del 60. Su principal justificación, sin embargo, desapareció en el año 1952 cuando Baade encontró un error sistemático en la calibración de las distancias de las galaxias. Las distancias corregidas resultaron ser cinco veces mayor que las hasta entonces aceptadas, con lo cual la edad del Universo llegó a valer 15 mil millones de años, en perfecto acuerdo con los datos astrofísicos. A principio de los años 60, observaciones realizadas con radiotelescopios empezaron a mostrar señales inequívocas de evolución del Universo. Se descubrieron objetos muy alejados, los cuásares, con propiedades diferentes a las galaxias. Como grandes distancias en el espacio equivalen a épocas muy alejadas hacia el pasado (debido al tiempo que demora la luz en recorrerlas) una distribución no homogénea revela que el Universo está cambiando, en contradicción con la teoría del estado estacionario. Tampoco es homogénea la distribución estadística de las radiofuentes de cualquier origen. Pero el golpe de gracia lo recibió el modelo del estado estacionario en el año 1965 cuando dos astrofísicos norteamericanos descubrieron una señal de radio, en el rango de las microondas, que viene del espacio exterior y tiene una distribución espectral equivalente a un cuerpo negro a la temperatura de $2,7^{\circ}$ Kelvin. Es éste el descubrimiento más importante en Cosmología desde que Hubble estableció que el Universo está en expansión. Como la mayoría de los grandes descubrimientos fue hecho en forma accidental por Penzias y Wilson utilizando una antena que habían perfeccionado para observar ondas de radio reflejadas en los satélites Eco. Al intentar eliminar las interferencias estáticas, encontraron que persistía un cierto ruido de fondo originado en una radiación que llenaba todo el espacio en forma absolutamente isótropa. Esta radiación no viene del Sol, puesto que no se observa ninguna variación durante la noche, tampoco viene de la galaxia, ya que no ocurren fluctuaciones a lo largo del año. Mediciones posteriores con diferentes longitudes de onda permitieron dibujar la curva espectral (figura 6) y comprobar que corresponde exactamente a la de un cuerpo negro a la temperatura de $2,7$ grados absolutos.

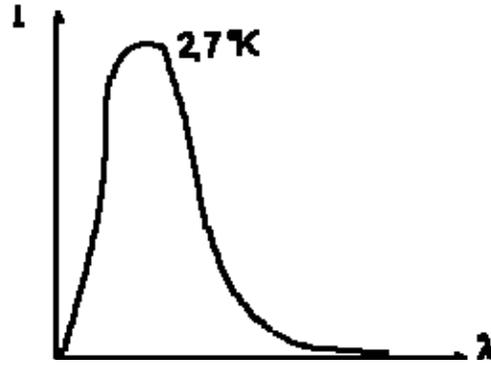


Fig. 6

Distribución espectral de la radiación de microondas.

La teoría del estado estacionario es incapaz de explicar el origen de esta radiación. Si bien es cierto que existen fuentes de radio en el Universo: pulsares, cuásares, etc., es imposible que la radiación que ellas emiten tenga la distribución espectral de un cuerpo negro. Para que esto ocurra es necesario que exista equilibrio termodinámico entre la materia y la radiación, situación que sólo puede presentarse para valores de la densidad y temperatura enormes. Con los valores actuales, la materia y la radiación se encuentran completamente desacopladas. La termalización de la radiación electromagnética se explica perfectamente bien en los modelos de Universo de Friedmann, los cuales ciertamente pasaron por un estado hiperdenso, con temperaturas muy elevadas, al iniciarse la expansión. El cálculo muestra que en los primeros minutos de vida del Universo la temperatura era tan elevada que los fotones podían crear pares electrón – positrón, los cuales a su vez al aniquilarse se convierten de nuevo en fotones y, en este absorber y emitir, se establece equilibrio entre la temperatura de la materia y la temperatura de la radiación. Este equilibrio es el mismo que existe en el interior de un horno (cuerpo negro) a temperatura constante y por lo tanto la distribución espectral debe estar dada por la fórmula de Planck (figura 6). La temperatura a la que se produjo el equilibrio era de varios miles de millones de grados Kelvin. Al continuar la expansión del universo dejaron de producirse pares electrón-positrón, desacoplándose la materia de la radiación. A partir de ese momento, la expansión sólo ha enfriado adiabáticamente a la radiación, conservando su distribución espectral de cuerpo negro. Pasados unos 15 a 20 mil millones de años nos encontramos ahora con una temperatura que ha descendido de miles de millones de grados a tan sólo 2,7°K. La radiación de microondas es entonces una especie de fósil que nos da informaciones sobre el estado del Universo en sus primeros minutos de vida.

El descubrimiento de la radiación de microondas en 1965 terminó con la teoría del estado estacionario. Volvieron a hacerse populares los modelos evolutivos surgidos de la relatividad general sin constante cosmológica. Por primera vez se tenía evidencia directa de un estado primordial del Universo con temperaturas y presiones muy altas. Cálculos detallados han permitido reproducir diversas características del estado actual del Universo a partir del estado primigenio. Se

ha dado cuenta, por ejemplo, del origen del helio y deuterio que actualmente se observan.

Los modelos de Universo de Friedmann sin constante cosmológica poseen una relación muy interesante entre su extensión espacial y su evolución temporal. Si el Universo es finito (esférico) no posee la "velocidad de escape", de modo que la expansión deberá detenerse algún día iniciándose luego una etapa de contracción que terminará en un colapso catastrófico. Si en cambio el Universo es infinito espacialmente, tiene la "velocidad de escape" y la expansión no se detendrá jamás. Al hablar de velocidad de escape nos referimos a una analogía con el lanzamiento de proyectiles desde la Tierra. En este caso si la velocidad inicial (cuando se apagan los cohetes) es igual o mayor que 10 km por segundo, el proyectil se pierde en el espacio; pero si la velocidad es menor llegará un momento en que se detenga y vuelva a caer sobre la Tierra.

Lo que determina en realidad que un Universo tenga o no la velocidad de escape es el signo de la curvatura. El Universo esférico de Einstein tiene curvatura positiva, es decir, es cóncavo y no posee la velocidad de escape.

Los Universos con curvatura nula (planos) o negativa (convexos) poseen la velocidad de escape. Para imaginarse una curvatura negativa es necesario descender al caso bidimensional (figura 7). La superficie tiene localmente el aspecto de una montura; pero es perfectamente homogénea como la esfera, sin puntos privilegiados.



Fig. 7
Universo bidimensional con curvatura negativa.

¿Cómo podríamos averiguar el signo de la curvatura de nuestro Universo? Las ecuaciones de la relatividad general nos dan una expresión que depende de la densidad promedio de la materia (ρ) presente actualmente en el espacio. Conocida la constante de Hubble (H) el valor crítico de ρ que separa los universos con curvatura positiva y negativa es de alrededor de 10^{-28} gramos por centímetro cúbico. Para valores superiores la curvatura es positiva y para valores inferiores es negativa. El valor observado es aproximadamente de 10^{-30} gr/cm^3 , es decir, un centésimo del valor crítico, correspondiente a un Universo infinito con curvatura negativa. Este valor resulta de considerar la masa de las galaxias

y en cada galaxia la masa de las estrellas y polvo cósmico. Se trata por lo tanto de una cota inferior del valor efectivo de la densidad de materia. Bien podría ocurrir que la mayor parte de la masa del Universo esté en forma de materia intergaláctica o de agujeros negros, es decir, materia invisible de muy difícil detección.

Es posible que galaxias enteras se hayan convertido en tenebrosos abismos negros. Por esta razón el valor de la densidad no da un resultado categórico, puesto que la cota inferior conocida no está tan lejos de la masa crítica. Se puede determinar también el signo de la curvatura por métodos cinemáticos, midiendo el grado en que se está frenando el Universo. Para eso es necesario observar la velocidad de alejamiento de objetos muy alejados para los cuales la ley de Hubble deja de ser lineal. Los cuerpos astronómicos más alejados que se han observado son ciertos cuásares cuyo corrimiento hacia el rojo corresponde a distancias de varios miles de millones de años luz, lo que los ubica en los confines del espacio si el Universo es finito (cerca del punto antípoda). Desgraciadamente no se ha podido encontrar un método para medir las distancias de los cuásares con exactitud. Muy recientemente se ha hecho un anuncio de un intento exitoso de calibración de las distancias sobre la base de cierta característica fácil de identificar; pero todavía es muy prematuro para saber si es correcto o no. Los astrónomos que hicieron este anuncio afirman que el Universo no tiene la velocidad de escape y por lo tanto llegará un momento en el futuro en que se detenga la expansión y se inicie una etapa de contracción. Esto ocurriría en unos 20 mil millones de años más y, como la fase de contracción es simétrica a la de expansión, la vida total del Universo desde su nacimiento hasta su muerte sería de unos 60 mil millones de años. Parece una cifra muy grande; pero no resulta tanto si se la compara con la edad de la Tierra que es de cinco mil millones de años (5×10^9 años). La edad actual del Universo ($1,5 \times 10^{10}$ años) es apenas el triple de la edad de la Tierra, la cual tiene la misma edad que el Sol y el resto de los planetas. Existen estrellas en nuestras galaxias más viejas que el Sol; pero no mucho más viejas. En los cúmulos globulares por ejemplo se encuentran estrellas de edades comparables a la del Universo. Es probable que las galaxias se formaron en una época muy temprana, casi junto con el Universo y tendrían entonces la misma edad ($1,5 \times 10^{10}$ años). En cuanto al desarrollo de la vida sobre la Tierra, se sabe que los primeros vestigios se remontan a 500 millones de años atrás y posiblemente la vida apareció antes aún (sin dejar rastro) tal vez hace mil millones de años. Comparado con la "edad" de la vida, el Universo es joven y la duración total de su vida no será muy grande.

¿Qué va a ocurrir cuando el Universo colapse? Para ello es muy ilustrativo compararlo con el colapso de una estrella que termina convertida en un agujero negro. La diferencia en el caso del Universo es que no existe nada fuera de él, de manera que ahora no tiene sentido hablar de agujero negro. Es como si sólo existiera el espacio interior de la estrella que se desmorona, convirtiéndose finalmente en una singularidad puntual. Las galaxias se acercarán en forma

simétrica hasta que todas se encuentren simultáneamente; luego se empiezan a acercar las estrellas hasta quedar pegadas unas con otras. A continuación se juntarán los átomos y después los núcleos, llegando a formar una gigantesca estrella de neutrones. Pero el colapso no puede detenerse y la compresión continúa, apareciendo ahora toda clase de partículas elementales (las que se han observado y las que están por observarse con aceleradores cada vez mayores). Por último, también estas partículas desaparecerán aplastadas por la infinita fuerza gravitacional hasta que todo el Universo quede convertido en un punto. En realidad si bien esta descripción es correcta desde el punto de vista físico, existe una cota teórica que impide que el Universo se reduzca **exactamente** a un punto. La razón es la siguiente: cuando se afirma que el radio del Universo tiene un cierto valor, se entiende que existe en principio una manera de medirlo por comparación por ejemplo con el tamaño de un átomo. Pero si todos los átomos han sido destruidos debemos cambiar la unidad de medida y elegir ahora el tamaño de una partícula elemental. Por último cuando todas las partículas hayan desaparecido queda una última unidad de medida, la longitud más pequeña que se puede definir. Se trata de la longitud de Planck L^* , combinación de constantes universales cuya expresión es

$$L^* = \left(\frac{hG}{c^3} \right)^{1/2},$$

Donde (h) es la constante de Planck de la física cuántica, (G) es la constante de gravitación de Newton y (c) la velocidad de la luz en el vacío. Introduciendo los valores numéricos de estas constantes L^* resulta ser igual a $1,6 \times 10^{-33}$ cm. Asociada a esta longitud elemental se define el tiempo T^* que demora la luz con velocidad c en recorrer la distancia L^* . Este tiempo vale $5,3 \times 10^{-44}$ seg. No tiene sentido hablar de longitudes inferiores a L^* o de intervalos de tiempo menores que T^* . Naturalmente que tratándose del Universo estas cantidades son ridículamente pequeñas. El valor de L^* es veinte órdenes de magnitud más pequeño que el tamaño del protón. Cuando el Universo alcance este tamaño, dejarán de valer las ecuaciones de la relatividad general debido a que los efectos cuánticos de la gravitación se harán importantes. Todavía no se conocen las leyes de la cosmología cuántica que deben regir la suerte final del Universo. Podría ocurrir que existiera un estado cuántico fundamental como ocurre con los átomos, que detenga el colapso. Luego se tendría un caos cuántico con fluctuaciones de la geometría, las cuales bien podrían iniciar un nuevo ciclo de expansión. Desde el punto de vista físico, sin embargo, se trataría de un nuevo Universo nacido de las cenizas del anterior sin que se conserve ningún vestigio de la historia previa al colapso. Se evitaría la singularidad matemática; pero sigue siendo una singularidad física.

Este es el destino final de un Universo con curvatura positiva. Debemos todavía esperar algunos años hasta que se sepa con seguridad el signo de la curvatura de nuestro Universo. Si resulta ser negativa o nula el Universo se expandirá indefinidamente aunque con velocidades decrecientes debido a la atracción

gravitacional. Las galaxias se alejarán unas de otras aumentando cada vez más el vacío que existe entre ellas. Las estrellas en cada galaxia se irán apagando una a una y no será posible la formación de nuevas estrellas cuando se agoten los elementos combustibles. Así el Universo simplemente muere porque envejecen y mueren todas las estrellas.

Ignoramos cuál será el destino final del Universo: expansión indefinida o colapso catastrófico; pero sabemos con certeza lo que ocurrió en el pasado; que hubo un principio caracterizado por una violenta explosión (big-bang en inglés) ocurrido hace unos 15 mil millones de años. Los primeros instantes de vida del Universo (con curvatura positiva o negativa) son muy parecidos a las etapas finales del colapso. En el principio había un caos cuántico en el que el espacio y el tiempo no estaban bien definidos con dimensiones del orden de L^* y T^* . Posiblemente una fluctuación estadística dio origen a la expansión, la cual pasó a ser gobernada por leyes conocidas hasta llegar a la situación actual. Queda en suspenso la suerte posterior del Universo.