

# El principio y el fin del Universo

## Primera parte: el descubrimiento de la recesión de las galaxias

por Miguel Angel Herrera y Christine Allen

*Eleva, pues, lector conmigo,  
tus ojos hacia las altas esferas.  
Dante, Divina comedia*

*...pues el Cosmos es lo más  
bello de todo lo que se ha  
producido.  
Platón, Timeo*

Corría el año de 1875. Un joven alemán de 17 años había terminado sus estudios de preparatoria y estaba a punto de ingresar a la Universidad de Munich; al igual que muchos jóvenes, no tenía muy definida su vocación, y dudaba entre estudiar filología clásica, música o física. En busca de orientación, se acercó el célebre físico Philipp von Jolly, catedrático en esa Universidad, quien le recomendó que se dedicara a cualquier cosa, menos a la física, puesto que en esta ciencia "ya no quedaba nada por descubrir". Esta opinión no era únicamente de Jolly, sino que prevalecía entre los físicos de entonces... Nadie sabe cómo fue que, pese a semejante recomendación, el joven alemán decidió estudiar física. Su nombre era Max Planck, y ya a principios de nuestro siglo había asegurado su lugar en la historia al proponer que la naturaleza de la luz no era exclusivamente ondulatoria, sino que poseía también características corpusculares. De esta manera, quedaron sentadas las primeras bases de la mecánica cuántica, la rama de la física que describe correctamente los fenómenos del micromundo. En los casi 90 años transcurridos desde el descubrimiento de Planck, la mecánica cuántica nos ha permitido entender mejor que nunca la estructura más íntima de la materia. Hemos pasado primero de la molécula y el átomo a los electrones, protones y neutrones; después, a los positrones y neutrinos y, más recientemente, a los gravitinos, fotinos y axiones. En la actualidad, estas extrañas partículas se unen a términos no menos extraños,

tales como cuerdas, supercuerdas, rompimiento espontáneo de la simetría, supergravedad, etcétera, para integrar el léxico corriente de los físicos especializados en partículas elementales y en cosmología. Toda esta terminología hubiera resultado incomprensible para alguien como Jolly, quien pensaba, hacia fines del siglo pasado, que ya no quedaba nada importante por hacer en física.

En el mismo año de 1875, pero muy lejos de Munich, en Indiana, EE.UU., nacía Vesto Slipher, quien habría de obtener la primera evidencia observacional de la expansión del Universo. Y sólo cuatro años después, en 1879, veía la luz en Alemania el científico que proveería el esquema teórico más adecuado para el estudio del Universo en su conjunto: Albert Einstein. La teoría de la relatividad general propuesta por Einstein sigue proporcionándonos, en nuestros días, la mejor descripción matemática del mundo en que vivimos.

A principios de nuestro siglo nadie sospechaba que las tres ramas de investigación creadas por Planck, Slipher y Einstein —la física teórica del micromundo, la astronomía del macrocosmos y la física teórica de la fuerza de la gravedad— mostrarían en nuestros días una notable convergencia. En efecto, la cosmología moderna se ha convertido en un campo en donde la física de las partículas elementales, la relatividad general y la astronomía extragaláctica se unen, se mezclan unas con otras, en un grandioso intento de establecer una teoría global, congruente y comprobable, de nuestro Universo.

No obstante, la idea de la unidad de la ciencia es tan antigua como la ciencia misma. Cada científico la acepta, consciente o inconscientemente, llamándola quizás "armonía", "belleza", "simetría", "orden", "elegancia", "simplicidad" o algo equivalente. En efecto, si la Naturaleza careciera de estos atributos, poco sentido tendrían nuestros intentos por comprenderla. Desde las armonías numerológicas de los pitagóricos hasta las teorías modernas que relacionan la abundancia química actual de ciertos elementos



Cúmulo de galaxias en Virgo a 500 años-luz de distancia. (Timothy Ferris, 1982)

con la temperatura de los neutrinos hace diez mil millones de años, pasando por la "Armonía del Mundo" de Kepler, las teorías científicas han sido, precisamente, la búsqueda de esa unidad subyacente en la Naturaleza. No deja de maravillarnos, sin embargo, que después de un intenso desarrollo de la física cuántica por un lado, y de la relatividad y la cosmología por el otro, tres ciencias aparentemente tan distanciadas en lo que se refiere a su campo de aplicación hayan estado íntimamente unidas en el principio, y hayan venido a unirse de nuevo en nuestros días. Quizás en este tipo de hechos resida la gran atracción que la ciencia, y en particular la cosmología, ejerce sobre todos los seres amantes de la simetría, la armonía y la belleza.

---

### El Universo en expansión

---

Los inicios de la mecánica cuántica coincidieron con los de la cosmología como ciencia moderna. En 1912, Vesto Slipher se encontraba en el Observatorio de Lowell y comenzaba a obtener lo que se denomina el *espectro* de unos extraños objetos difusos y brillantes que por entonces se conocían como "nebulosas". El espectro de una estrella (o de un objeto difuso) se obtiene al hacer pasar su luz por un prisma o una rejilla de difracción, lo cual la descompone en colores. Se dice que Slipher era tan conservador en el vestir que no se despojaba de su corbata ni siquiera a altas horas de la noche, cuando se encontraba solo en la cúpula del telescopio. ¡Poco sospechaba entonces la revolucionaria naturaleza que tendrían sus observaciones! Los espectros que obtenía servirían unos años después para demostrar que el universo estaba en expansión.

Ahora bien: los espectros suelen estar surcados por líneas, que son características de los elementos químicos presentes en el objeto emisor, y cuyas posiciones están perfectamente definidas para cada uno de estos elementos. Si el objeto emisor se mueve con respecto al observador, las líneas aparecen en posiciones distintas a las que les corresponden; se desplazan hacia el azul si el objeto se acerca a nosotros, y hacia el rojo si se aleja. Esto se debe al famoso efecto Doppler, que todos hemos advertido al escuchar el cambio en el tono de la sirena de las ambulancias cuando se acercan a nosotros y cuando se alejan.

Hacia el año de 1922, Slipher ya contaba con 40 espectros de nebulosas. La primera nebulosa que midió fue la que hoy conocemos como galaxia de Andrómeda, y mostró tener un corrimiento al azul que correspondía a una velocidad de acercamiento a nosotros de unos 300 km/s. El importante hallazgo de Slipher fue que 36 de sus nebulosas presentaban desplazamientos hacia el rojo, y que sólo cuatro de ellas tenían desplazamientos al azul. Las velocidades medidas estaban comprendidas entre -300 km/s y +1800 km/s. Aun sin conocer la naturaleza de las nebulosas, el hecho de que 36 de 40 presenten corrimientos al rojo es muy curioso, puesto que uno esperaría encontrar aproximadamente el mismo número de corrimientos hacia el azul que hacia el rojo. Pero el significado más profundo de las observaciones de Slipher, el hecho de que en ellas se pone de manifiesto la expansión del Universo, eludió a este astrónomo, quien no contaba con ninguna información sobre las distancias que nos separan de las nebulosas.

Para resolver el problema de la naturaleza de las nebulosas observadas por Slipher y para determinar las distancias a ellas fue necesario que apareciera en escena otro gran astrónomo, Edwin Hubble; a él le estaba reservado el ho-



Max Planck (1858-1947). (A. Vibert Douglas, 1957)



Vestso Melvin Slipher (1875-1969). (A. Vibert Douglas, 1957)



Albert Einstein (1879-1955). (A. Vibert Douglas, 1957)

nor de hacer uno de los descubrimientos más sensacionales de nuestra época. En 1919 Hubble acababa de regresar de la guerra y ansiaba participar en las observaciones de las nebulosas, objetos a los cuales había dedicado su tesis doctoral. Logró incorporarse al Observatorio de Mount Wilson, el cual en 1917 había puesto en operación un telescopio con una óptica de 2.5 metros de diámetro, por entonces la mayor del mundo. Ya en 1924, Hubble había logrado identificar en la nebulosa de Andrómeda algunas estrellas variables periódicas, del tipo de las llamadas "cefeidas". Las cefeidas de nuestra galaxia habían adquirido fama gracias a un

estudio realizado poco antes por Henrietta Leavitt. Esta astrónoma había encontrado una relación entre los periodos de variación de las cefeidas y sus brillos intrínsecos, y había logrado calibrarla. Mediante ella, era posible medir las distancias a las que se encuentran las cefeidas, puesto que midiendo su periodo conocemos inmediatamente su brillo intrínseco; y comparando este último con el brillo aparente de estas estrellas, podemos inferir sus distancias. Al identificar Hubble cefeidas en la nebulosa de Andrómeda pudo calcular la distancia que nos separa de ésta: aproximadamente un millón de años-luz. Esta es una distancia enorme, mucho mayor que las dimensiones de nuestra galaxia. La conclusión fundamental de Hubble fue que la nebulosa de Andrómeda en realidad no era una nebulosa, sino toda una galaxia, plenamente comparable a nuestra Vía Láctea.

A continuación, Hubble se dedicó a medir los periodos de las cefeidas de otras muchas nebulosas, lo cual le permitió determinar las distancias a ellas. En este trabajo, que requería muchas horas de observación, contó con la eficaz colaboración de Milton Humason, pintoresco personaje cuyas inquietudes astronómicas, insaciable curiosidad y tenacidad a toda prueba lo llevaron de ser mulero en el desierto a conserje del Observatorio de Mount Wilson, y de ahí a excelente observador en el mismo. Hacia el año de 1929 se tenían ya las distancias a unas 200 galaxias, cuyos espectros y desplazamientos Doppler también se habían obtenido. Los datos indicaban, sin lugar a dudas, que prácticamente todas las galaxias se alejaban de nosotros, y que su velocidad de recesión era proporcional a la distancia que nos separa de ellas. Así, una galaxia que esté al doble de distancia que otra se alejará con el doble de velocidad. Esta relación se conoce hoy como la *ley de Hubble*, y la constante de proporcionalidad en ella se denomina la *constante de Hubble*. El valor numérico de esta constante de Hubble es muy difícil de determinar. Con sus datos, Hubble la estimó en 528 kilómetros/segundo·megaparsec (o, lo que es lo mismo, 162 kilómetros/segundo·millón de años-luz). En la actualidad, el valor más aceptado para esta constante fundamental es de 15 a 20 kilómetros por segundo por millón de años luz. En otras palabras, la velocidad de alejamiento de las galaxias aumenta unos 15 kiló-

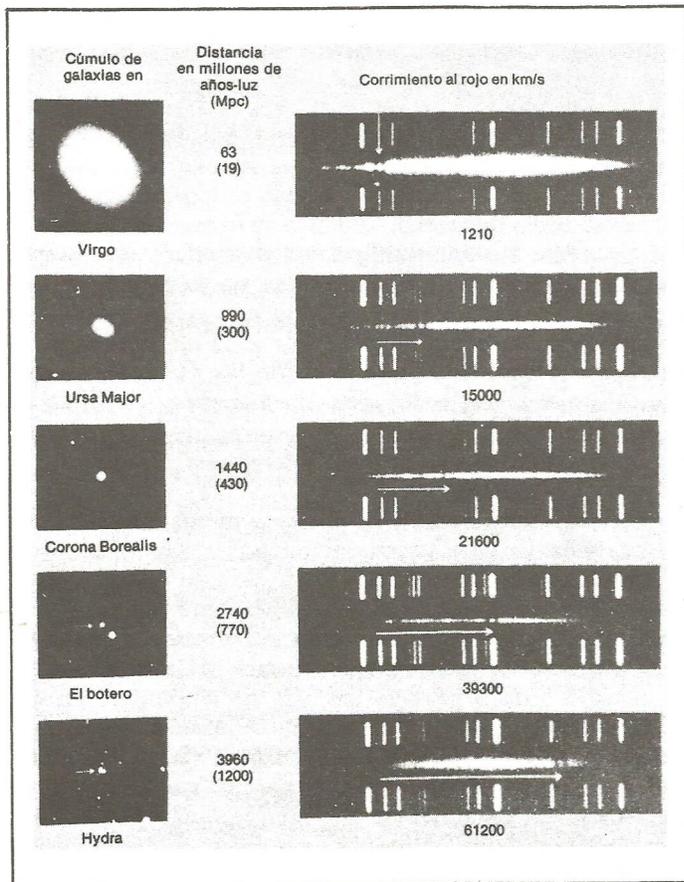


Edwin Powell Hubble (1889-1953). (A. Vibert Douglas, 1957)

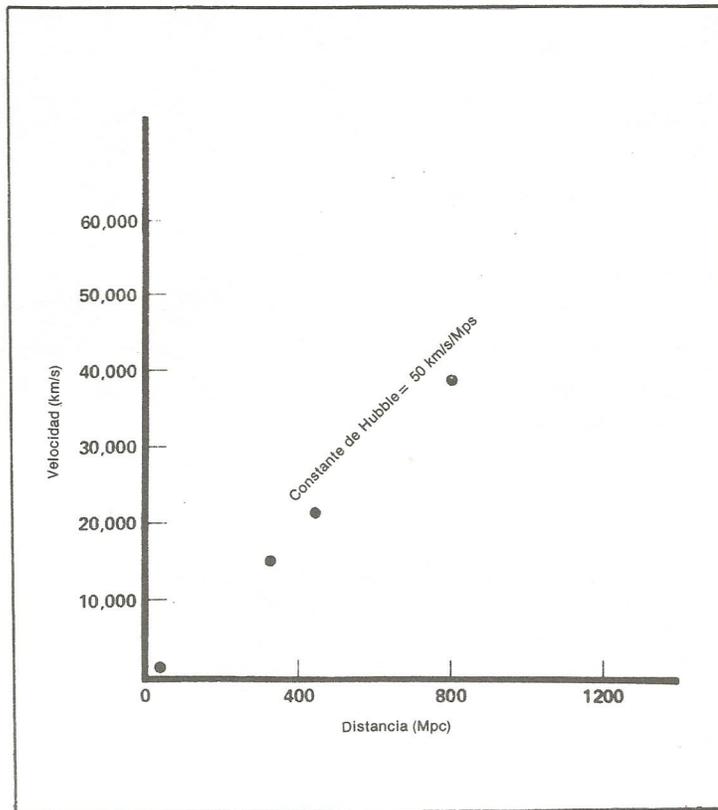
metros por segundo cada millón de años-luz. Claro está que, además de su velocidad de recesión, las galaxias tienen pequeñas velocidades propias, al azar; por esta razón, las más cercanas a nosotros muestran a veces corrimientos al azul. Al fijarnos en galaxias cada vez más lejanas, el corrimiento al rojo tiende a dominar, y más allá de cierta distancia, es el único que se observa.

## Hacia nuevos modelos teóricos del Universo

Mientras tanto, la parte teórica del estudio del Universo también se desarrollaba a grandes pasos. Los primeros indicios teóricos de que el Universo podría estar en expansión surgieron en 1917, gracias a los trabajos de Albert Einstein y Willem de Sitter. Entre 1912 y 1916 Einstein había traba-



Las distancias y los desplazamientos al rojo de algunas galaxias. La figura muestra a las galaxias (a la izquierda), y sus espectros (a la derecha). Se indican las distancias en millones de años-luz y, entre paréntesis, en megaparsecs. La longitud de las flechas indica la magnitud de los desplazamientos al rojo de las líneas espectrales. La velocidad de alejamiento a la que corresponden estos desplazamientos está dada (en kilómetros por segundo) al pie de cada espectro. Nótese que las imágenes de las galaxias son más pequeñas mientras más alejadas están; ésta era la base del método propuesto por Wirtz para determinar sus distancias. (Foto de los Observatorios Hale)



La ley de Hubble, obtenida con los datos de la figura que aparece a la izquierda. Para cada galaxia se ha graficado su distancia en megaparsecs (en el eje horizontal) y su velocidad en kilómetros por segundo (en el eje vertical). La recta corresponde a un valor numérico para la constante de Hubble de 50 km/s. Mpc, o sea, unos 15 kilómetros por segundo por millón de años-luz (M. Zeilik, 1982)

jado intensamente en su teoría de la relatividad general, y en 1917 encontró una solución a sus ecuaciones de campo, según la cual el Universo debería encontrarse en expansión global. Como en esas fechas aún no se tenía ninguna evidencia observacional de que el Universo se encontrara en expansión, la idea parecía inconcebible, y Einstein la rechazó. Para eliminarla como solución a las ecuaciones de campo, se vio obligado a introducir en ellas un término adicional, al que llamó "repulsión cósmica"; con ayuda de este término, se encontraban soluciones estáticas de las ecuaciones de campo, que correspondían a un universo sin expansión, y que Einstein consideró preferibles. El Universo propuesto por Einstein es homogéneo, es decir, contiene materia uniformemente distribuida; en él, el espacio es curvo, y su curvatura es uniforme en todos sitios; y desde luego, es estático, esto es, no se contrae ni se expande. Años después, Einstein tuvo que reconocer que la introducción del término de repulsión cósmica en sus ecuaciones —necesario para lograr un universo estático— fue el mayor error de su vida. En un momento tuvo a su alcance la predicción quizá más importante de nuestro siglo, y la dejó escapar, pues ni él mismo estaba preparado para aceptar sus consecuencias.

Otros científicos siguieron sus pasos, e intentaron encontrar soluciones distintas a las mismas ecuaciones de

Einstein. También en el año de 1917, De Sitter resolvió las ecuaciones que corresponden a un universo isotrópico, pero sin materia, absolutamente vacío: encontró que ese universo estaba en expansión. La expansión encontrada por De Sitter es un tanto curiosa, pues al no contener materia su universo, es el espacio "puro" el que se expande. Se tenía así, por una parte, el universo de Einstein, con materia pero sin movimiento, y por otra, el universo de De Sitter, con movimiento pero sin materia. En todo caso, se empezó a sospechar que la expansión encontrada por De Sitter quizá tuviera algo que ver con el alejamiento de las galaxias encontrado por Slipher, y durante muchos años se habló del "efecto De Sitter".

En 1922, el astrónomo alemán Carl Wirtz, inspirado por los resultados de Slipher y el efecto De Sitter, había propuesto una relación entre velocidad y distancia, equivalente de hecho a la ley de Hubble. Como un indicador de las distancias a las nebulosas empleó el diámetro aparente de ellas: mientras más pequeñas aparecían en las placas fotográficas, más alejadas de nosotros debían estar. El trabajo de Wirtz no tuvo mucho efecto, pues sus datos no eran muy buenos y se desconocía la naturaleza de las nebulosas. Como recordaremos, la opinión que prevalecía por entonces era que éstas pertenecían a nuestra propia galaxia.

Pocos años después, las investigaciones realizadas por el matemático ruso Alexander Friedmann y el cosmólogo y abate belga Georges Lemaître habían mostrado la posibilidad de la existencia de una gran variedad de universos teóricos; todos ellos soluciones a las ecuaciones de Einstein; todos uniformes e isotrópicos; todos con materia, pero en diversos estados de contracción o expansión. Como las observaciones del alejamiento de las galaxias favorecían claramente la expansión, ésta fue ganando aceptación, y pasó de ser

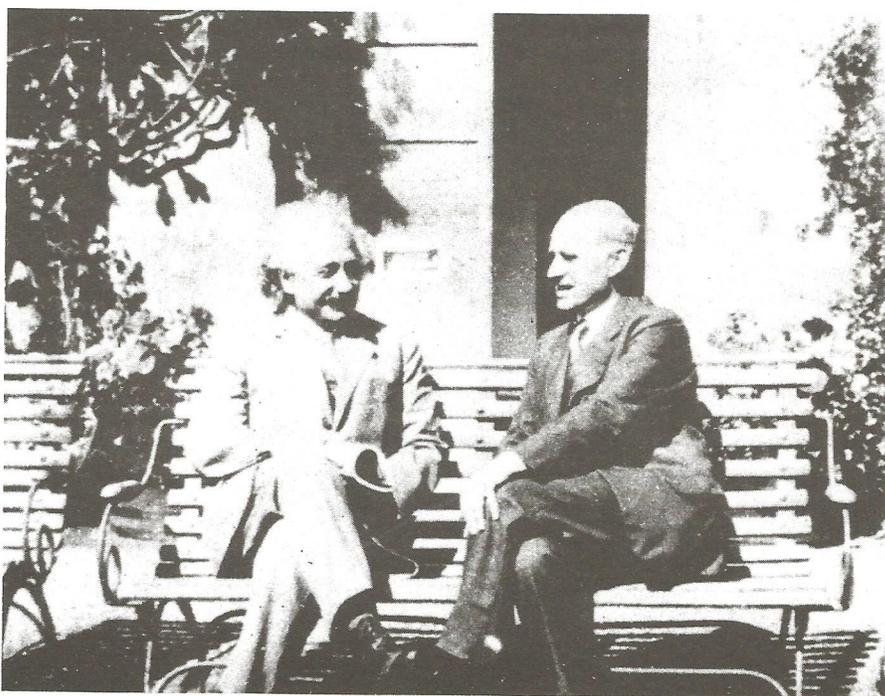
una especie de sinsentido a una teoría científica congruente, apoyada y verificada por datos observacionales.

El Universo en expansión presentaba, sin embargo, un grave problema: en el pasado tenía que haber sido más pequeño, y si nos remontáramos a tiempos cada vez más lejanos, encontraríamos un momento en el cual todo el Universo habría estado concentrado en un punto de densidad infinita. Para muchos científicos, ésta era una situación inaceptable. Así, por ejemplo, el célebre cosmólogo inglés Sir Arthur S. Eddington, quien fue uno de los campeones de la expansión del Universo, rechazaba tajantemente el inicio "demasiado, antiestéticamente, abrupto" que parecían postular los universos en expansión. Propuso un modelo para el Universo que tenía expansión, pero que partía de un estado inicial de densidad finita; estático, pero inestable. El universo de Eddington se asemeja a la bella durmiente del bosque: permanece en estado quiescente durante un tiempo larguísimo, para luego "despertar" con alguna perturbación y comenzar a expandirse.

Eddington, por cierto, fue entre los cosmólogos modernos, el primero en proponer una "teoría del todo", que intentaba unir el micro y el macromundo. En ella, la masa y la carga del electrón estaban estrechamente relacionadas con las características globales del Universo, tales como su radio inicial, su radio actual, y la constante de Hubble. Con el valor numérico que se había obtenido entonces para esta última, la teoría de Eddington funcionaba correctamente, de modo que midiendo la constante de Hubble era posible determinar la masa del electrón, o viceversa. Por desgracia, pronto se cayó en la cuenta que el valor de la constante de Hubble era erróneo. Con los datos modernos, la teoría de Eddington es insostenible. Sin embargo, su concepción totalizadora tiene un atractivo estético innegable.



Willem de Sitter (1872-1934) y señora. (Sky and Telescope, 1978)



Einstein y Eddington, en casa de éste último, 1930. (A. Vibert Douglas, 1957)



Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944). (A. Vibert Douglas, 1957)



Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984). (A. Vibert Douglas, 1957)



George Gamow (1904-1968). (A. Vibert Douglas, 1957)

¡La idea de Eddington era hermosa, y su esfuerzo, admirable! Años después, otros científicos, como Paul Dirac, habrían de recoger y elaborar las ideas de Eddington.

Paralelamente a las ideas cosmológicas, se había desarrollado la física de las partículas elementales. A partir del descubrimiento de Niels Bohr de que el espectro del hidrógeno podía explicarse suponiendo que el electrón sólo puede tener niveles discretos de energía en el átomo en cuestión, físicos como Luis de Broglie, Wolfgang Pauli, Erwin Schroedinger, Paul Dirac y Enrico Fermi, entre otros, habían enriquecido la nueva teoría cuántica y la habían llevado a niveles de refinamiento insospechados. Ya en el año de 1927 los diferentes enfoques de la "nueva física", así como sus consecuencias y los métodos matemáticos empleados para su tratamiento, habían alcanzado la madurez. La famosa Conferencia de Solvay, efectuada ese mismo año y a la que asistieron físicos de la talla de Einstein, Dirac, Heisenberg, Pauli, Bohr, madame Curie, Born, Planck, Schroedinger y De Broglie, fue una especie de reconocimiento oficial de la nueva mecánica cuántica. Los desarrollos posteriores no fueron menos espectaculares. Al descubrimiento del neutrón por Chadwick, en 1932, siguió el del positrón (partícula predicha teóricamente por Dirac en 1928) y el del muón, ambos por Anderson en 1937. La *fuerza débil* entra en escena en 1933, gracias al trabajo teórico de Fermi, y el mesón de Yukawa, en 1935. La avalancha de descubrimientos de nuevas partículas subatómicas se incrementa a partir de 1946, con el advenimiento de aceleradores cada vez más potentes. Por desgracia, no podemos detenernos más en la historia de los importantes descubrimientos de esta prolífica época, pues es preciso volver a la cosmología.

---

### El origen del Universo

---

Al contrario de lo que le sucedió a Eddington, un ex estudiante de Friedmann no tuvo empacho alguno en aceptar la idea de un universo que tuviera un origen en el tiempo.

En efecto, George Gamow llevó su irreverencia al grado de darle un nombre a este instante: lo llamó en inglés el *big bang*, y esta descriptiva designación alcanzó gran popularidad. El equivalente en castellano del *big bang* sería "el gran pum" o "el gran cuas", pero nosotros emplearemos la expresión más usual: *la Gran Explosión*. Utilizando los conocimientos sobre reacciones nucleares que se tenían entonces —en el año de 1949— Gamow publicó un artículo en el cual se intentaba reproducir las abundancias observadas de los elementos químicos del Universo a partir de una mezcla muy caliente de partículas elementales (llamada por Gamow el *Ylem*), que es la situación que debe prevalecer en los primeros instantes de vida del Universo. El artículo iba firmado por Hermann Alpher, Hans Bethe y George Gamow. En realidad, Bethe en nada contribuyó a él, pero Gamow, que tenía una marcada vena bromista, lo incluyó, pues le parecía gracioso que un trabajo sobre el origen de los elementos químicos llevara como autores a Alpher, Bethe y Gamow, cuyos nombres suenan como las primeras tres letras del alfabeto griego. El trabajo fue un fracaso, lo cual llevó a Gamow a comentar —siempre en broma— que Bethe quería cambiar su apellido a Zacharias. La concordancia de las abundancias químicas predichas por Alpher, Bethe y Gamow con las observadas era muy mala, pero el artículo tuvo la virtud de plantear varias ideas que resultarían fundamentales. Una de ellas es que las condiciones físicas del Universo temprano determinan las abundancias químicas actuales. Otra es la predicción teórica de que el universo actual debe estar permeado por una "radiación de fondo" correspondiente a una temperatura de alrededor de cinco grados Kelvin. El descubrimiento de la llamada *radiación de fondo de tres grados Kelvin*, efectuado por A. Penzias y R. Wilson en 1965 (el cual les valió a estos investigadores el Premio Nóbel) es quizá la prueba más concluyente de que el Universo tuvo, en efecto, un principio en el tiempo, y de que se ha expandido desde ese estado inicial, muy caliente, hasta sus dimensiones y su frialdad actuales. Hoy día, son muy pocos los científicos que no aceptan el modelo de la Gran Explosión; a él dedicaremos el siguiente artículo de esta serie. ☉