

LA PREDICCIÓN DE LA RADIACIÓN COSMICA DE FONDO

LUIS J. BOYA

Departamento de Física Teórica y Seminario Interdisciplinar, S.I.U.Z.
Universidad de Zaragoza

RESUMEN

Se rastrea el origen de la predicción de la radiación cósmica de fondo atribuida a Gamow en los años cuarenta. Encontramos que la predicción no existe como tal, sino que como un subproducto del estudio del origen y abundancia de los elementos químicos por absorción sucesiva de neutrones, Gamow y sus colaboradores (Alpher y Herman principalmente) concluyen que habría una radiación en equilibrio térmico al tiempo de la nucleosíntesis, que dominaría entonces sobre la materia, y que aparecería hoy día como una radiación térmica a unos 10^9 K. Pero no hay ninguna alusión a que fuese medible, ni se pone en relación con el desacoplamiento materia-radiación (recombinación).

ABSTRACT

We search the origin of the prediction of the cosmic background radiation attributed to Gamow and collaborators in the forties. We find that there was no such a prediction, but that as a by-product of their study of the origin and abundance of the chemical elements by neutron absorption, Gamow and collaborators (mainly Alpher and Herman) conclude that there should be a radiation in thermal equilibrium at the time of nucleosynthesis, which dominated over matter, and that it would appear to-day as thermal radiation at about 10^9 K. But there was no indication of it being measurable, nor was it put in relation with the decoupling of matter and radiation (recombination).

Palabras clave: Gamow, Cosmología, Astrofísica, Siglo XX.

I. Introducción

Suele decirse que la radiación cósmica de fondo [WEINBERG 1984], encontrada en 1965 por PENZIAS y WILSON [1965], había sido ya predicha

por George Gamow a finales de los años cuarenta, pero que dicha predicción fue completamente olvidada. En el presente trabajo analizamos la situación con arreglo a los trabajos científicos de la época, y concluimos que no hubo realmente una predicción concreta de una radiación observable de espectro planckiano a unos pocos grados Kelvin, sino sólo unas vagas indicaciones de que la radiación que estaría en equilibrio con la materia en el momento de la nucleosíntesis, poco después de la gran explosión (*Big Bang*), a temperaturas del orden de 10^{10} K, se enfriaría por efecto de la expansión del Universo y nos aparecería hoy como una radiación a una temperatura de unos 10^3 K (que varían desde 25° K a 5° K según autores).

La radiación cósmica de fondo (CMBR, por *Cosmic Microwave Background Radiation*) juega un papel fundamental en la cosmología evolutiva actual. Es, junto con la ley de recesión de las galaxias, la proporción de helio cosmogénico a hidrógeno y la relación de fotones a bariones, una de las claves experimentales esenciales que confirman el paradigma del modelo del *Big Bang* caliente, que está aceptado por el común de los científicos desde mediados de los años sesenta.

Es éste un estudio histórico, y no de astrofísica, por lo que definiremos y utilizaremos los términos científicos como es habitual en estos trabajos, sin preocuparnos demasiado de su total rigor, y prescindiendo generalmente de ecuaciones; nuestra intención es señalar cómo en los trabajos de Gamow y colaboradores la predicción de la radiación de fondo aparece muy críptica, entremezclada en las consideraciones sobre la nucleosíntesis de los elementos; para ello examinaremos críticamente los artículos publicados en la época, sin pretender tampoco ser exhaustivos, comenzando por el trabajo original de Gamow [GAMOW 1946; citado como G-1].

El plan de este trabajo es el siguiente: en II presentamos la situación de la cosmología a mediados de los años cuarenta; surge ella de la coexistencia de la teoría de la expansión del universo [HUBBLE 1929; HUBBLE 1936] y de los avances en física nuclear, especialmente la explicación [BETHE 1939] de la fuente de energía de las estrellas como debida a la fusión del hidrógeno y conversión en helio. En III planteamos primero el problema del origen y abundancia de los elementos químicos, que es el incentivo que llevó a Gamow a estudiar la teoría de la expansión en los primeros minutos de vida del Universo. Destacamos en especial el fracaso de la teoría del equilibrio para explicar la curva universal de abundancia de los elementos. A continuación pasamos revista a los trabajos de Gamow, Alpher y Herman (citados como [G-1], [G-2], etc.), escrutinizando los párrafos donde se menciona la temperatura actual, 10^3 - 5° K, de la radiación que acompañaría la síntesis de núcleos en los primeros segundos del *Big Bang*, para que el lector juzgue de

lo adecuado de nuestra apreciación. Se confirma así que la radiación de fondo aparece considerada, pero juega un papel muy secundario en esos trabajos.

IV narra brevemente la recepción del descubrimiento de Penzias y Wilson [DICKE 1965], suceso para el que existen actualmente varios estudios históricos [WEINBERG 1984; BERNSTEIN 1984]. La radiación de fondo (CMBR), se ha convertido en la piedra angular del modelo cosmológico *standard*, y todas las medidas posteriores a 1965 han confirmado el aspecto térmico del espectro y su gran isotropía [SILK 1989; SMOOT 1991].

Un Epílogo (V) recuenta algo de la situación actual en cosmología en relación con el problema que nos ocupa, ofreciendo algunos resultados experimentales recientes sobre la radiación de fondo, como momento de la recombinación, temperatura, densidad, características de distribución, primeras indicaciones de anisotropía [SMOOT 1992], así como algún otro dato astrofísico de importancia cosmológica, la controversia sobre la constante de Hubble, el paradigma inflacionario, etc.

II. Cosmología en los años cuarenta

La cosmología como ciencia nace en 1917, cuando Einstein aplicó su teoría de la gravitación (teoría general de la relatividad) al Universo como un todo [EINSTEIN 1917]; aparece así un primer modelo teórico, en el que el Universo se presenta en una configuración estática y con volumen total finito, muy de acuerdo con las ideas de la época sobre el firmamento de las estrellas fijas y con el llamado principio de Mach, según el cual la inercia de los cuerpos está originada por la distribución de masas en el cosmos.

En 1924 descubre Edwin P. Hubble el carácter extragaláctico de las nebulosas [HUBBLE 1924], culminando el proceso copernicano de *descentralización* del hombre, en que nuestra situación (planetaria, estelar o galáctica) no juega ningún papel preponderante. Prosiguiendo con esos estudios, llevados a cabo con un instrumento único, el telescopio de 100 pulgadas de Mt. Wilson, encuentra Hubble [HUBBLE 1929] la famosa relación velocidad-distancia para la recesión de las galaxias, la ecuación $v = H R$, que consagra definitivamente, desde el punto de vista experimental, la idea de un Universo dinámico, en expansión uniforme.

No fue difícil encontrar soluciones dinámicas de las ecuaciones de la relatividad que den cabida a la expansión de Hubble, como hallaron Friedmann en 1922, Robertson y Walker en 1933 [TOLMAN 1934; MISNER, THORNE Y WHEELER 1973]; son incluso más sencillas, pues en el modelo

de 1917 Einstein había tenido que modificar artificialmente sus ecuaciones originales, introduciendo la llamada constante cosmológica, para dar lugar a un Universo estático: la constante nueva originaba una repulsión creciente con la distancia, que evitaba el colapso, inevitable en un Universo donde las fuerzas gravitatorias son, como es bien sabido, puramente atractivas; en el modelo einsteniano de 1917 se produce un equilibrio entre atracción y repulsión, y por tanto un Universo estático; sin embargo, el equilibrio era ciertamente inestable. El abate Lemaitre es el primero [LEMAITRE 1927] en estudiar seriamente las consecuencias de la existencia de la estupenda concentración inicial de masas en el momento de la explosión inicial (el *átomo primitivo*) y su posterior evolución expansiva.

La expansión del Universo se decelera o ralentiza por efecto de la atracción gravitatoria, pero si el enfrenamiento es pequeño, la extrapolación de la expansión lineal llevaría, mirando hacia atrás en el tiempo, al momento inicial del *Big Bang*: ocurriría eso aproximadamente hace $t = H^{-1}$ años, donde H es la constante de Hubble introducida antes; las primeras medidas de Hubble daban para la constante H el valor de 550 Km/sec/Megaparsec, a lo que corresponde una edad del Universo de $1,8 \cdot 10^9$ años, comparable, pero menor, a la edad de la tierra, que Rutherford había estimado a finales de los años veinte en unos tres mil millones de años [RUTHERFORD 1929], partiendo de las vidas medias de los minerales radiactivos. La discrepancia no se vió como muy acuciante hasta finales de los años cuarenta, cuando su persistencia fue una de las razones de la aparición de una teoría cosmológica alternativa al *Big Bang*, la llamada teoría de la creación continua o *Steady State Theory* de Hoyle, Bondi y Gold en 1948 [ver BONDI 1960].

Consolidada pues la primera teoría cosmológica con una base científica teórica y experimental, era natural estudiar sus consecuencias físicas. La más importante era sin duda que el Universo se tenía que enfriar al expandirse, como le pasaría a un gas, y por lo tanto, yendo hacia atrás en el tiempo, al aproximarnos al *Big Bang*, nos encontraríamos con que esa sopa primitiva estaría cada vez más caliente, comenzando por una especie de bola de fuego, la *primitive fireball* (Gamow).

Pero la materia sometida a un calentamiento arbitrariamente grande experimenta una serie de transformaciones. Evidentemente el primer umbral físico interesante, retrospectivamente hablando, sería la ionización de la materia y su conversión en plasma (separación de núcleo y electrones), lo que ocurriría al alcanzar la temperatura de unos pocos miles de grados; hoy día es éste, en efecto, un punto de inflexión crucial en la evolución del Universo, que separa en cosmología la *era astrofísica*, en la que la materia está disociada (primeramente en núcleos y electrones, etc.), de la *era astronómica*, en la que

la materia atómica neutra eventualmente condensa en estructura de morfología visible, que devienen galaxias, estrellas, etc.; volveremos sobre este punto más adelante. Curiosamente sin embargo, Gamow no se fijó en esa fase de ionización/recombinación, que seguramente le pareció poco interesante, sino que apuntó directamente a la etapa siguiente, a la nucleosíntesis, pues debió darse cuenta enseguida de que la gran explosión caliente proporcionaba un mecanismo que por primera vez prometía abordar la síntesis de los elementos químicos: cuando se alcanzasen los 10^{10} °K, sería posible, en efecto, disociar el deuterio en protones y neutrones, etc. En concreto, él se propuso reproducir teóricamente la ley de distribución de las abundancias de los elementos químicos, relativamente bien conocida para entonces por los estudios geológicos y astronómicos [GOLDSCHMIDT 1938; BROWN 1949]. Esto nos lleva a considerar brevemente el otro ingrediente importante de la teoría de Gamow, las reacciones nucleares, que estudiaba la para entonces reciente física nuclear.

El decenio 1930-40 ve aparecer, en efecto, el establecimiento de la Física Nuclear como disciplina propia, que se convierte pronto en el frente de vanguardia en el estudio del microcosmos (ver e.g. la *Biblia* de BETHE 1936). WEIZSÄCKER [1938] y BETHE [1939] son los primeros en aplicar la nueva herramienta al problema del origen de la energía de las estrellas, un problema punzante desde fines del siglo XIX; destaca Bethe que en el interior del sol, a millones de grados de temperatura, el hidrógeno se fusiona convirtiéndose en helio; establece en particular los dos ciclos, del carbono-nitrógeno y del protón-protón, para explicar las reacciones termonucleares más importantes; dada la masa del sol y la temperatura en el centro del mismo, se calcula que nuestro astro puede brillar unos diez mil millones de años, de los que aparentemente ya ha consumido la mitad.

Hacía falta un físico curioso como Gamow, para poner en conexión dos dominios tan diferentes de la física: piénsese que los expertos de la época en relatividad o cosmología y los físicos nucleares eran especies de científicos aisladas: la relatividad general es una ciencia totalmente clásica, no hay aspectos cuánticos ni siquiera granulares, atómicos en ella, y en aquella época era cultivada principalmente por matemáticos, mientras que las fuerzas gravitatorias son totalmente despreciables en el dominio atómico y subatómico y por tanto los físicos del microcosmos se desentendían completamente de la relatividad general; de hecho, el actual esplendor de la astrofísica de partículas, que se originó a finales de los sesenta, es debido en buena parte al descubrimiento de la CMBR. Es un gran mérito de Gamow el que haya intentado audazmente establecer un puente entre ambas disciplinas, micro- y macrofísica. Y destapado el genio, ya no se puede volver a encerrar

en la botella: desde entonces la era astrofísica de la evolución del Universo es esencialmente física atómica y física nuclear aplicada.

Era natural aplicar estos conocimientos a dos problemas fundamentales, que se presentan en cuanto uno quiere entender un poco el origen de la materia y las estructuras cósmicas: cómo se formaron los elementos químicos, y cómo se formaron las galaxias y las estrellas; George Gamow es la primera persona que ataca bravamente ambos problemas, en el marco conceptual y teórico del *Big Bang* caliente.

III. Nucleosíntesis

Como el *Big Bang* predice una fase primitiva muy caliente del universo, es lógico pensar en reacciones parecidas a las del sol, que den lugar a la formación de helio y quizá elementos más pesados; WEIZSÄCKER [1937], CHANDRASEKHAR y HENRICH [1942], y otros, contemplan por tanto un escenario primordial (de universo o incluso estelar) muy caliente, en equilibrio estacionario, en el que los elementos se formarían dependiendo la abundancia de su energía de enlace y de la sección eficaz de captura de neutrones, desde el helio ($Z = 2$) al uranio ($Z = 92$).

Para aquella época había ya suficientes datos para establecer con cierta confianza la curva de abundancia de los elementos [GOLDSCHMIDT 1938]. Hidrógeno y helio son los más abundantes con mucho, y en la curva general destacan también carbono, oxígeno, silicio, calcio y hierro; los elementos más pesados que el hierro tienen abundancias parecidas; pero despreciables frente a hidrógeno y helio. Explicar esta curva de abundancias por procesos nucleares ocurridos al principio del *Big Bang*, cuando la temperatura era suficientemente elevada, de miles de millones de grados, es el programa de investigación que se trazó Gamow desde 1946.

George Gamow era ya para entonces un físico notable, aunque algo pintoresco; ruso de origen, había *escogido la libertad*, y tras trabajar un tiempo en Alemania y en el Instituto Niels Bohr de Copenhague se instaló en los Estados Unidos (George Washington University, en Washington capital); son famosos sus *cartoons* de físicos de la época, las popularizaciones de la relatividad o de la teoría de los cuantos [GAMOW 1965], etc. Él era un experto en física nuclear de primera talla, autor de uno de los primeros libros sobre la disciplina [GAMOW 1931], descubridor en 1928 del mecanismo de la emisión radiactiva alfa por el efecto túnel, lo que constituyó la primera aplicación de la mecánica cuántica al núcleo atómico; estableció asimismo las

reglas de selección en ciertos procesos de emisión beta (transiciones de Gamow-Teller, 1935), etc.

En 1946 aparece el primer trabajo de Gamow sobre nuestro tema, [G-1] *Expanding Universe and the Origin of the Elements*, sometido a la revista americana *Physical Review* en 13-IX-46, cuyo título no puede ser más significativo. Gamow establece en ese trabajo claramente que la nucleosíntesis tuvo que ocurrir en una situación de NO equilibrio, es decir, no estacionaria, al contrario del escenario contemplado por los autores anteriores, sino más bien en el proceso de expansión y enfriamiento rápido del Universo; la temperatura debería ser de unos 10^{10} °K, equivalentes a 1 Mev de energía, comparable, pero no muy inferior, a la energía de enlace del deuterón (núcleo compuesto más sencillo, posee un protón y un neutrón), que es 2,2 Mev. Las ecuaciones de la relatividad general (en realidad, el sencillo balance entre energía potencial y cinética), le permiten concluir que el proceso de enfriamiento es al principio muy rápido, y propone un mecanismo en que una enorme bola de neutrones (n) (*overheated neutral nuclear fluid*) produciría protones (p) por desintegración beta, y algunos de estos reaccionarían con otros neutrones dando deuterones (d); precisa ya que la abundancia actual de protones está determinada por la competencia entre la desintegración del neutrón, o sea el proceso $n \rightarrow p + e + \nu$ y la captura radiativa: $p + n \rightarrow d + \gamma$. Aquí ν indican neutrinos y γ fotones. No hay la menor alusión a la radiación.

El segundo trabajo pertinente de la nucleosíntesis cósmica es el famoso trabajo $\alpha \beta \gamma$, de Alpher, Bethe y Gamow [G-2], en que el humorista Gamow añadió el nombre de Hans Bethe por sinfonía (parece ser que a Bethe le gustó el chiste y no puso objeciones); el trabajo figura como Carta al Editor de *Physical Review (The Origin of Chemical Elements)* y fue sometido el 18-II-48. Insisten los autores en la teoría del no equilibrio, y apuntan a otras reacciones para ir más allá del deuterio: mediante absorción subsiguiente de neutrones, se pasaría así al helio, etc. Opinan incluso que la verdadera distribución de abundancias se establecería algo después de la nucleosíntesis, pues los núcleos con demasiados neutrones son inestables y decaen por radiación beta, lo que es un proceso lento. Se presentan unos primeros datos numéricos: ocurrió la nucleosíntesis esencialmente 20 sec después del *Big Bang*, a una densidad de $2,5 \cdot 10^{-4}$ g/cm³ (la damos corregida, hubo un error numérico inicial). En tiempos anteriores NO pudo haber nucleosíntesis, pues los núcleos que se formasen se disociarían inmediatamente, y mucho después tampoco, pues no habría energía suficiente (para vencer la repulsión protónica) ni neutrones libres (la vida media del neutrón se estimaba en unos 30 minutos; hoy sabemos que es un tercio de ese valor; la desintegración de neutrones libres no se observó hasta 1950).

El tercer *paper* que nos interesa [G-3] es otra carta de Gamow (solo) a *Phys. Rev.*, recibida el 21-VI-48: *The Origin of the Elements and Separation of the Galaxies*, en que se aborda por primera vez el origen de las Galaxias: es éste otro problema fundamental de la cosmología, aun no resuelto totalmente en la actualidad; Gamow lo presenta como un proceso cosmológico inevitable, pero que aparece en un tiempo muy posterior a la nucleosíntesis. La idea es que la atracción universal se impone, produciendo agregados gigantescos de materia, una vez que la masa cósmica está suficientemente fría, y neutralizada por la recombinación de núcleos y electrones (y por tanto ya no está en estado de plasma); entonces opera la llamada inestabilidad de Jeans, que tiende a amplificar cualquier fluctuación en la densidad, debido al carácter siempre atractivo de las fuerzas gravitatorias. Aparece también en este trabajo una conclusión importante: a la temperatura de la nucleosíntesis, la densidad de radiación (primera vez que se menta) es del orden de la densidad actual del agua, esto es, mil a diez mil veces *mayor* que la densidad de la materia que se está fusionando. De modo que al tiempo de la síntesis primordial el Universo estaba en una fase dominada por la radiación. [Esta conclusión sigue firme hoy día]; y Gamow prosigue, audazmente: entonces no era posible la separación de pedazos (*chunks*) de materia para la morfogénesis astronómica (formación de estructuras diferenciadas), pues la radiación disgregaría todo inmediatamente... PERO como la densidad de radiación disminuye con el tiempo *más deprisa* que la densidad de materia, y de hecho se sabe que hoy hay mucha más materia que radiación, llegaría un momento, que Gamow calcula, en que se igualarían ambas densidades, y a partir de entonces nada impide que la omnipresente fuerza gravitatoria, sin presión apreciable de radiación, gane la partida y agrupe la materia gaseosa que se va enfriando, en lo que serían eventualmente protogalaxias... Gamow estima las dimensiones de los primeros *chunks* de agregados de materia: tendrían tamaños del orden de unos tres mil años luz, una temperatura de 100°K, y un masa de millones de masas solares [números muy alejados de los valores actuales]; opina que el primitivo material galáctico estaría formado de gas (hidrógeno esencialmente) y *polvo* (condensados materiales).

Gamow desea indudablemente propalar sus ideas entre la comunidad científica, pues en 30-X-48 envía otra carta [G-4], esta vez a la revista *Nature*, donde repite esencialmente los argumentos de [G-3]. Es curioso que ya hace cincuenta años se hacía lo mismo que hacemos también hoy día: físicos que quieren divulgar sus resultados más allá de su círculo estricto de especialistas, eligen *Nature* para publicar los resultados cuando una investigación ya está madura y se ha publicado esencialmente en revistas más especializadas; en el medio siglo anterior Bohr y otros siguieron el mismo camino. Comenta Gamow ahora también alguna cosa nueva, como que el BB podría venir después de un *Big Crunch* de colapso universal: un universo de evolución

cíclica (*el eterno retorno*) gozaba de cierto predicamento en la época; señala asimismo, correctamente, que los neutrones primitivos podrían tener una componente de protones, que las dimensiones de las protogalaxias serían de 13000 años luz, etc.

Alpher y Herman publican al poco [G-5] unas correcciones al trabajo último de Gamow, también en *Nature*; concluyen ahora que es preferible un Universo abierto, en el que la expansión no tiene límite, y en el que la curvatura (hiperbólica) no se puede despreciar: la densidad de materia se calculaba en unos 10^{-30} g/cm³, y se pensaba que un Universo cerrado debería ser cien veces más denso. [Hoy día el desajuste entre la materia observable y la necesaria para *cerrar* el Universo recibe el nombre de *problema de la materia oscura*, y es uno de los más acuciantes de la cosmología actual]. El equilibrio entre las densidades ocurriría a diez millones de grados, y la temperatura de la protogalaxia sube ya a 600°K.

En este trabajo aparece la primera predicción escrita de la temperatura actual de la radiación de fondo: unos 5°K. Veamos textualmente cómo lo señalan los dos autores: *The temperature of the gas at the time of condensation [formación de protogalaxias] was 600°K, and the temperature in the universe at the present time is found to be about 5°K*. Es la frase final del artículo.

Siguen ahora una serie de trabajos detallados de Alpher y Herman en 1948, sustanciando lo anterior y presentando cálculos con resultados numéricos concretos de abundancia de los elementos, que no nos interesan particularmente. Pero aun hay otro *paper* notable de estos autores [G-6]: *Remarks on the evolution of expanding Universe*, recibido en *Phys. Rev.* también, en 27-XII-48. Aquí aparecen varias cosas notables: i) Se cita una sugestión de Einstein, (en la edición de 1945 de su conocida obra *The meaning of Relativity*, EINSTEIN 1922), en el sentido de que NO se puede extrapolar demasiado hacia atrás en el tiempo, pues habrá problema con las fluctuaciones de la métrica; ii) se preocupan los autores *explícitamente* por averiguar la densidad de radiación *hoy*, es decir, se acercan a la predicción de la radiación de fondo; eventualmente repiten el valor de 5°K, añadiendo: *This mean temperature for the Universe is to be interpreted as the background temperature which would result from the universal expansion alone*. No es una predicción concreta, pero el lo que más se le aproxima... y además se presenta la idea de la radiación de temperatura *de fondo* (*background*).

Todos estos trabajos aparecen incorporados de alguna manera en la extensa puesta a punto que Alpher y Herman publican en *Review of Modern Physics* en 1950 [G-7].

Queremos todavía referirnos a un *paper* de Gamow, de 1953 [G-8], puesto que él mismo ha proclamado alguna vez que allí él predijo claramente la radiación de fondo; no parece que sea así. El trabajo se titula *Expanding Universe and The Origin of Galaxies*, está publicado en una revista danesa, *Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab*, (recibido el 21-X-52), y el párrafo pertinente dice: *...It is interesting to notice that (11) [fórmula que da la evolución de la densidad de radiación con el tiempo] leads to the radiation mass density 2.10^{-32} g/cm³, and the temperature 7°K, for the present epoch*. Como se ve, no más de lo que habían dicho Alpher y Herman cinco años antes...En las conclusiones del trabajo se apuntan algunas de las dificultades de la nucleosíntesis, pero no se alude para nada a la radiación de fondo.

Este período *clásico* de la nucleosíntesis cosmológica primitiva puede decirse que acaba con el trabajo de Alpher, Follin y Herman [G-9], también en *Physical Review* (recibido el 10-IX-53) y titulado *Physical Conditions in the Initial Stages of the Expanding Universe*. Como el título indica, se estudian las condiciones justo anteriores a la nucleosíntesis, y se destaca el papel de la densidad de radiación, que es preponderante; se persigue la evolución del Universo hasta pasados los diez minutos (desde el *Big Bang*), cuando la síntesis de deuterio y helio ya ha terminado; el trabajo es especialmente interesante por traer a colación procesos nuevos físicos importantes, como creación/aniquilación de mesones y piones, producción de neutrinos y su desacoplo de la materia, etc., pero no dedican ninguna atención especial a la radiación de fondo.

Los trabajos de nucleosíntesis *cósmica* no se reanudarán hasta los años sesenta, en parte por influjo de la teoría estacionaria del Universo [BONDI 1960], que no aceptaba una fase caliente en el Universo; cuando en 1958 Sandage establece la nueva escala [SANDAGE 1958] de la expansión, que supone un longevidad del cosmos comparable (de hecho, superior) a la edad de la tierra, HOYLE y TAYLER [1964] retoman el problema del helio cosmogénico en un trabajo fundamental, que precedió justo al descubrimiento de la CMBR.

Resumiendo lo que se implicaba en estos estudios, aunque insistimos en que ello no aparece tan explícito en los escritos de la época, la línea argumental general la podríamos expresar de la siguiente manera:

La fuga de las nebulosas sugiere claramente un Universo en expansión, que se enfriaba en el decurso del tiempo, y que se supone por tanto arrancó de una estupenda concentración de masa arbitrariamente caliente (*primitive fireball*); la radiación térmica en equilibrio con la materia a más de 10^{10} °K impidió la formación de núcleos complejos, hasta que la bola se enfrió algo, y

se abrió entonces el camino para la formación de deuterio, helio, y quizá otros núcleos ligeros, lo que tuvo que tener lugar brevísimamente, en tiempos de unos pocos minutos. La radiación ha sufrido un desplazamiento hacia el rojo o *redshift* muy grande, por efecto Doppler, pero mantiene su espectro tipo Planck (radiación térmica); y por disminuir la densidad de radiación más deprisa que la de materia, ésta iguala y posteriormente domina sobre la radiación, que es la situación que *observamos* ahora: la radiación remanente de la explosión inicial aparecería por tanto hoy desacoplada de la materia (que por ser neutra es esencialmente *transparente* a la radiación), y podría ser observada como una radiación térmica, isotrópica, a cerca de unos 10^3 K.

IV. Descubrimiento de la Radiación de Fondo

Esta historia ha sido narrada muchas veces [WEINBERG 1984, BERNSTEIN 1984, WEINBERG 1972], así que sólo le dedicamos atención en cuanto el hallazgo hizo mención específica de la teoría de Gamow y colaboradores.

La radiación de fondo fue descubierta accidentalmente por Penzias y Wilson [PENZIAs y WILSON 1965], cuando investigaban el funcionamiento de un satélite meteorológico artificial. La interpretación del fenómeno fue dada por Dicke y por Peebles inmediatamente [DICKE 1965], pues Peebles, por indicación de Dicke, también estaba buscando una radiación de fondo. Es curioso que este trabajo [DICKE 1965] cita a Gamow ($\alpha\beta\gamma$ [G-2] así como el trabajo [G-9]), pero no mencionan la *predicción*). Se propusieron a continuación otros experimentos para confirmación del fenómeno: los primeros autores habían medido sólo un punto del espectro a 7,35 cm., pero el espectro térmico es continuo, y en especial era interesante determinar el máximo de la curva de Planck, que para una temperatura de $T = 2,7^{\circ}\text{K}$, que ocurriría a 1,9 mm.

Antes del descubrimiento de Penzias y Wilson, el antecedente más claro que tenemos de la radiación de fondo, incluso con referencia a la teoría de Gamow, es el trabajo de dos científicos rusos: A.G.DOROSHKEVICH y I.I.NOVIKOV, los cuales publicaron (1963) en *Doklady* el artículo: *Mean Density of Radiation in the Metagalaxy and certain problems of Relativistic Cosmology*; allí dicen, entre otras cosas (cito de la Ref. dada por Bernstein-Feinberg, *Cosmological Constants*, [CC])...*According to the Gamow theory, at the present time it should be possible to observe equilibrium Planck radiation with a temperature of $1-10^3$...* . Es remarcable que los primeros trabajos en occidente sobre la radiación de fondo [PENZIAs-WILSON 1965, DICKE 1965, ROLL-WILKINSON 1966] no mencionen este trabajo ruso.

Aunque la radiación de fondo fue un descubrimiento espectacular (sus autores recibirían el Premio Nobel en 1978), las primeras referencias no *resucitan* la predicción de Gamow: por ejemplo, *Physics To-Day*, la revista de información general de la Sociedad Física Americana, da dos noticias en 1966 sobre la CMBR, sin citar la teoría de Gamow. Asimismo el extenso artículo de Rindler en la misma revista [RINDLER 1967], dedicado a cosmología relativista, parte como motivación de la CMBR, sin citar a Gamow; y los ejemplos podrían multiplicarse.

Como ya hemos señalado, tanto WEINBERG [1984] como FEINBERG [1984], dedican estudios a este fenómeno de la *ignorancia* de la predicción de Gamow; véase también las consideraciones *sociológicas* (que no compartimos) de [CC], sobre que Gamow era algo frívolo y poco creíble.

A la luz de las consideraciones que hemos expuesto, parece claro que el *olvido* respecto a Gamow estaba justificado: la atención que la teoría de éste prestaba a la CMBR es oblicua, muy indirecta, y sin hacer predicción alguna de observabilidad. Las dos grandes obras de cosmología al principio de los setenta, a saber, el libro de WEINBERG [1972] y el citado *libro negro* [MISNER, THORNE y WHEELER 1973] ya dan referencia a Gamow: pero así como el *libro negro* cita la temperatura de 25°K sin dar referencias concretas, Weinberg advierte correctamente que la primera predicción es de Alpher y Herman, nuestra referencia [G-5]; Weinberg explica claramente la importancia del momento de la recombinación: es cierto que los fotones individuales presentes al tiempo de la nucleosíntesis (minutos después del BB) han sido todos absorbidos, pero es la radiación térmica que sufre un *scattering* final al tiempo de la recombinación, cientos de miles de años después, propagándose a continuación libremente debido a la transparencia de la materia neutra, la que conocemos hoy como CMBR y la que observaron por primera vez PENZIAS y WILSON [1965].

La aceptación de la CMBR como reliquia de una etapa muy caliente del Universo, y la resolución del problema de la constante de Hubble con las nuevas medidas de Sandage [SANDAGE 1958], que estimaban la edad del Universo en cerca de $20 \cdot 10^9$ años, hizo que la teoría del *Hot Big Bang* pasase de ser una teoría científica más a convertirse en el *paradigma* aceptado; en particular, la teoría del Universo estacionario [BONDI 1960], con su atractiva creación continua de materia (primera vez que se abordaba científicamente el problema de la creación), fue rechazada por la mayoría de los astrofísicos (quedaron algunos reticentes, como Hoyle y Narlikar). Además, hacia esas mismas fechas la teoría de Gamow es instrumental en resucitar el problema de la nucleosíntesis, más agudo que antes por haber aparecido ya en los años cincuenta la seria dificultad de sobrepasar la síntesis del helio, para pasar a

elementos más pesados, debido al *cuello de botella* que representa la ausencia de núcleos estables de número másico 5 y 8 [FERMI y TURKEVICH 1949]. En un trabajo fundamental, probaron poco después los Burbidge, Fowler y Hoyle [BURBIDGE *et al.*, 1957; este trabajo se conoce como *BBFH paper*] que los elementos se forman fundamentalmente, a partir del helio, en el corazón de las estrellas: solo hidrógeno, helio y pequeñas cantidades de deuterio, helio-tres y litio son *cosmogénicos* [HOYLE y TAYLER 1964]. Los estudios llevados a cabo a mediados de los sesenta por Wagoner, Tayler y Hoyle, Cameron y tantos otros, que no pertenecen propiamente a nuestra historia, establecieron una detallada teoría de la nucleosíntesis, que en sus rasgos generales seguimos aceptando hoy día. Predicción interesante de la misma es que la proporción helio/hidrógeno debe ser de un 25% en peso, y las medidas experimentales dan una variación de 22-28% como mucho; como ya hemos dicho, es éste uno de los pilares del paradigma cosmológico evolutivo actual.

Se entra así en la brillante época actual de la astrofísica, que aparece indisolublemente unida al mundo de las partículas elementales.

V. Epílogo

La CMBR es un ingrediente fundamental en nuestra concepción de la cosmología actual; los experimentos recientes con el satélite COBE (*Cosmic Background Microwave Explorer*) han determinado un espectro planckiano muy isótropo, con precisión mayor de una parte en cien mil, centrado en una temperatura de 2,726 °K [SMOOT 1991; SMOOT 1993]. Pero en la interpretación actual del fenómeno juega un papel importante el desacoplamiento de materia y radiación (o recombinación; este segundo término tiende a ser repudiado, pues nunca hubo una primera *combinación* de formación de materia neutra), el cual permite que la luz se propague independientemente de la materia, que es el componente preponderante del Universo, al enfriarse suficientemente (véase lo dicho más arriba): la materia *neutra* es esencialmente transparente frente a la radiación: el *scattering* Rayleigh (causante del color azul del cielo) es despreciable frente al *scattering* Thomson (originado por partículas cargadas). El momento de la neutralización queda fijado aproximadamente en el tiempo en que las densidades de materia y radiación se equilibran. No existe una comprensión razonable de esta coincidencia, que por ahora debe tomarse como tal. ¿Cuándo ocurrió la neutralización (recombinación)? Los cálculos actuales dicen que más o menos a los 300 000 años del BB, cuando la temperatura del Universo era de unos 4000 °K, y la densidad muy pequeña.

Si bien Gamow merece un enorme crédito por su audacia, sus estudios pioneros de nucleosíntesis, y hasta indirectamente por la indicación de la CMBR, muchas otras expectativas de Gamow no se han cumplido, lo que no es sorprendente dado lo atrevido de muchas de sus hipótesis, sus constantes equivocaciones numéricas, y sus muchas extrapolaciones injustificadas. Así por ejemplo, como ya hemos señalado, la síntesis de los elementos trans-helio es fundamentalmente estelar [BBFH, 1957] y no cosmológica. La bola de fuego o *fireball* primitiva se estudia hoy día comenzando a 10^{-43} s desde el BB, y la nucleosíntesis es *solo* una etapa tardía, precedida por numerosas otras transiciones de fase, que está fuera de lugar estudiar aquí: fase leptónica, fase electrodébil, hadronización, desacoplamiento de los neutrinos [véase WEINBERG 1984; PADMANABHAN 1993, etc.]. La formación de galaxias es muy posterior, no sólo a la nucleosíntesis, sino a la recombinación, fenómeno que como hemos dicho Gamow y sus contemporáneos no estudian, lo que es sin duda una razón más de que sus predicciones quedasen olvidadas. La formación de galaxias se concibe hoy como un proceso tardío, cuando el Universo tenía *sólo* 1/10 de la edad actual: decimos que $z = 10$ en esa época, donde z mide el *redshift*; como comparación, el desacoplamiento materia-radiación ocurrió para el valor $z = 1500$. Mientras que la observación directa de los *quasars* (QSOs) más lejanos, que huyen de nosotros a 92% de la velocidad de la luz, y que son los objetos que nos permiten directamente asomarnos más al principio del Universo, permite actualmente llegar hasta un *redshift* de $z = 5$. La formación de galaxias es un proceso todavía no comprendido del todo [PADMANABHAN 1993]; aunque hoy día se prefiere la teoría *top-bottom*, en la que el universo se diversifica por arriba, es decir, se forman metagalaxias, galaxias y luego estrellas [USON 1991]; pero todo el proceso está aún sumido en el misterio.

Por lo demás, el paradigma evolutivo actual es muy satisfactorio, especialmente desde la incorporación del fenómeno de la *inflación* [GUTH 1981]. Corresponde ésta a una expansión *exponencial* que ocurrió antes de la hadronización (es decir, antes que en el plasma primitivo condensaran los *quarks* primitivos). Se pueden encarar ahora problemas tales como el origen *real* de nuestro Universo como una fluctuación cuántica, mientras que en otros mundos, causalmente desconectados del nuestro, viven en otros momentos. Según el modelo inflacionario, el Universo actual está en el límite entre un espacio cerrado (en el que la expansión llega a un máximo, y sigue una reconstracción), y el abierto, que se extiende indefinidamente; en el límite se tiene una curvatura espacial nula; y la aparente carencia de materia para cerrarlo, un factor entre 10-100, puede suponerse como ser debido a la materia oscura; para una puesta a punto reciente del paradigma inflacionario el lector puede consultar [GUTH 1992]. Para una visión actual de la cosmología, con

énfasis en la formación de estructura, véase el ya citado [PADMANABHAN 1993].

Por último, las últimas medidas de anisotropía de la radiación de fondo [SMOOT 1992; SMOOT 1993], que fueron objeto de gran publicidad el año pasado, pueden también dar una pista para la formación de las galaxias, pues favorecen el espectro de fluctuaciones invariantes de escala, que habían supuesto Zeldovich y Harrison hace bastantes años (compare e.g. ZELDOVICH 1972).

BIBLIOGRAFIA

Libros de Referencia,
que contienen *Reprints* de artículos importantes:

[CC].- BERNSTEIN, J. y FEINBERG, G. (eds.) (1986) *Cosmological Constants. Papers in Modern Cosmology*. New York, Columbia University Press.

[KT].- KOLB, E.W., y TURNER, M.S. (eds.) (1988) *The Early Universe: Reprints*. Menlo Park, California, Addison-Wesley.

[Z].- ZEE, A. (ed.) (1982) *Unity of Forces in the Universe*. Singapore, World Scientific. Vol. II

[P].- PARKER, B. (1988) *Creation. The Story of the Origin and Evolution of the Universe*. New York, Plenum Press. Este libro contiene información histórica muy útil.

Trabajos de Gamow
y colaboradores examinados en el texto:

[G-1].- GAMOW, G. (1946) "Expanding Universe and the Origin of Elements". *Phys. Rev.* 70, 572-573. Reimpreso en [Z].

[G-2].- ALPHER, R.A., BETHE, H.A. and GAMOW, G. (1948) "The Origin of Chemical Elements". *Phys. Rev.* 73, 803-804. Reimpreso en [Z]; este es el *paper* $\alpha\beta\gamma$.

[G-3].- GAMOW, G. (1948) "The Origin of Elements and Separation of Galaxies". *Phys. Rev.* 74, 505-506. Reimpreso en [CC] y en [Z].

[G-4].- GAMOW, G. (1948) "The Evolution of the Universe". *Nature* 162, 680-682. Reimpreso en [Z].

[G-5].- ALPHER, R.A. and HERMAN, R. (1948) "Evolution of the Universe". *Nature* 162, 774-775.

[G-6].- ALPHER, R.A., and HERMAN, R. (1949) "Remarks on the Evolution of Expanding Universe". *Phys. Rev.* 75, 1089-1095. Reimpreso en [CC].

[G-7].- ALPHER, R. and HERMAN, R. (1950) "Theory of the Origin and Relative Abundance Distribution of the Elements". *Rev. Mod. Phys.* 22, 153-212.

[G-8].- GAMOW, G. (1953) "Expanding Universe and the Origin of Galaxies". *Det Kong. Dans. Videns. Selsk.* 27 n°10, 1-15.

[G-9].- ALPHER, R.A., FOLLIN, J.W., and HERMAN, R. (1953) "Physical Conditions in the Initial Stages of the Expanding Universe". *Phys. Rev.* 92, 1347-1361. Reimpreso en [CC] y en [Z].

Literatura general:
libros y artículos citados.

BERNSTEIN, J. (1984) *Three degrees above zero*. New York, Scribner.

BETHE, H.A. (1936) "Nuclear Physics I" (with R. BACHER). *Rev. Mod. Phys.* 7, 82-230; llamado, junto con las Partes II y III (1937) "la Biblia de Bethe".

BETHE, H.A. (1939) "Energy Production in Stars". *Phys. Rev.* 55, 103-110 y 434-441.

BONDI, H. (1960) *Cosmology*. Cambridge, Cambridge U.P. Hay trad. esp.: Barcelona, Blume, 1962.

BROWN, H. (1949) "A Table of Relative Abundance of Nuclear Species". *Rev. Mod. Phys.* 21, 625-634.

BURBIDGE *et al.*, (1957) "Synthesis of the Elements in Stars". *Rev. Mod. Phys.* 29, 547-650; este es el *paper* BBFH = BURBIDGE, E.M., BURBIDGE, G., FOWLER, W. y HOYLE, F.

CHANDRASEKHAR, S. and HENRICH, L.R. (1942) *Astrop. J.* 95, 288.

DICKE, R.H. *et al.*, (1965) "Cosmic Black-Body Radiation". *Astrop. J.* 142, 414-419. Reimpreso en [CC] y en [KT]. Ver también PENZIAS-WILSON, 1965.

DOROSHKEVICH, A.G. y NOVIKOV, I.I. (1964) *Sov. Phys. Doklady* 9, 111

EINSTEIN, A. (1917) "Kosmologischen Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie". *Sitz. Ber. Preuss. Akad. Wissen.*, 142-152. Reimpreso (traducido al inglés) en [CC] y en EINSTEIN, A. *et al.* (1952): *The principle of Relativity*. New York, Dover.

EINSTEIN, A. (1922) *The meaning of Relativity*. London, Methuen, muchas ediciones sucesivas.

FERMI, E. y TURKEVICH, A. (1949) Esta importante contribución nunca fue publicada; aparece citada muchas veces, e.g. [G-8], [P].

GAMOW, G. (1931) *Atomic Nucleus*. Oxford, Oxford U.P.

GAMOW, G. (1965) Véase por ejemplo su libro: *Thirty years that shook physics*. New York, Double Day.

GOLDSCHMIDT, V.M. (1938) *Verteilung der Elemente*. Oslo.

GUTH, A. (1981) "Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problem". *Phys. Rev. D* 23, 347-356. Reimpreso en [CC].

GUTH, A. (1992) P.N.A.S. *Colloquium on Physical Cosmology*. MIT Preprint, Nov. 1992.

HOYLE, F. and TAYLER, R.J. (1964) "The Mystery of Cosmic Helium Abundance". *Nature* 203, 1108-1112.

HUBBLE, E.P. (1924) "Annual Report of the Mount Wilson Observatory, 1923-1924".

- HUBBLE, E.P. (1929) "A Relation Between Distance and Radial Velocity among Extragalactic Nebulae". *Proc. Nat. Acad. Sci.* 15, 168-173. Reimpreso en [CC] y en [KT].
- HUBBLE, E.P. (1936) *The Realm of Nebulae*. New York, Dover.
- LEMAITRE, G. (1927) *Ann. Soc. Sci. Brux.* 47A, 49. Traducido al inglés en "A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius Accounting for the Radial Velocity of Extra-galactic Nebulae". *Mon. Not. R. Astr. Soc.* 91, 483-490. Reimpreso en [CC].
- MISNER, C.W., THORNE, K.S., and WHEELER, J.A. (1973) *Gravitation*. San Francisco, Freeman; este es el "libro negro".
- PADMANABHAN, T. (1993) Ver su reciente libro: "Structure formation in the Universe". Cambridge, Cambridge U.P.
- PENZIAS, A.A., and WILSON, R.W. (1965) "A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s.". *Astrop. J.* 142, 419-421. Reimpreso en [CC] y en [KT].
- RINDLER, W. (1967) "Relativistic Cosmology". *Phys. Today*, February.
- ROLL, P.G. and WILKINSON, D.J. (1966) *Phys. Rev. Lett.* 16, 405-407.
- RUTHERFORD, E. (1929) "Origin of Actinium and Age of the Earth". *Nature* 123, 313. Reimpreso en [KT].
- SANDAGE, A. (1958) "Current problems in the extragalactic distance scale". *Astrophys. J.* 127, 513-526.
- SILK, J. (1989) *The Big Bang*. 2ª ed., San Francisco, Freeman.
- SMOOT, G.F. et al. (1991) "The Cosmic Background Explorer". *Astrop. J.* 371, L1-L5.
- SMOOT, G.F. et al. (1992) "Interpretation of the Anisotropy Detected by the COBE DMR". *Ap. J.* 396, L1-L-10.
- SMOOT, G.F. (1993) "COBE DMR observations of the early Universe". *Class. Quan. Grav.* 10, S3-S17.
- TOLMAN, R.C. (1934) *Relativity, Thermodynamics and Cosmology*. New York, Oxford University Press.
- USON, J.M. et al. (1991) "Radio Detections of Neutral Hydrogen at Redshift $z = 3.4$ ". *Phys. Rev. Lett.* 67, 3328-3331.
- WEINBERG, S. (1972) *Gravitation and Cosmology*. New York, Wiley.
- WEINBERG, S. (1984) *The firsts three minutes*. 2ª ed., New York, Bantam Books, Trad. esp.: *Los tres primeros minutos del Universo* (1978). Madrid, Alianza Editorial. Ver especialmente el Chap. III.
- WEIZSÄCKER, C.F. von, (1937) *Zeit.f.Phys.* 38, 176, 1937
- WEIZSÄCKER, C.F. von, (1938) *Zeit.f.Phys.* 39, 633, 1938
- ZELDOVICH, Ya. B. (1972) "A Hypothesis Unifying the Structure and the Entropy of the Universe". *Mon. Not. R. Astr. Soc.* 160, 1P-3P. Reimpreso en [KT].