

# EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XVII JORNADAS  
VOLUMEN 13 (2007)

Pío García  
Luis Salvatico  
Editores



ÁREA LOGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA  
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons atribución NoComercial-SinDerivadas 2.5 Argentina



## Fondo cósmico de microondas: el contexto histórico y la resistencia a adoptar un universo en evolución

*Alejandro Gangui\**

El descubrimiento y la caracterización del fondo cósmico de microondas generaron un cambio radical en la concepción y en el estudio del universo. En el presente trabajo, abordaremos la génesis de una idea, la del universo en evolución, mencionaremos los personajes clave en esta empresa y detallaremos los principales elementos que fueron presentados a favor (y en contra) de los modelos del Big Bang.

### Introducción

En su libro *The discarded image*, C.S.Lewis escribe: "Los grandes maestros no consideran ningún Modelo tan seriamente como lo hacemos el resto de nosotros. Ellos saben que, después de todo, es solo un modelo, posiblemente reemplazable". Y luego, varias páginas más adelante, continúa diciendo: "No es imposible que nuestro propio Modelo sufra una muerte violenta, despiadadamente aplastado por el ataque no provocado de nuevos hechos – no provocado como la nova de 1572. Pero pienso que es más probable que cambie cuando, y debido a que, cambios importantes en la forma de pensar de nuestros descendientes requieran que lo haga. El nuevo Modelo no se establecerá sin evidencia, pero la evidencia surgirá cuando la necesidad interna por ella sea suficientemente fuerte. Será una evidencia verdadera. Pero la naturaleza ofrece la mayor parte de su evidencia en respuesta a las preguntas que le hacemos" [Lewis, 1964].

La historia de la cosmología relativista ha sido el resultado de una constante interacción entre cambios importantes en la forma de pensar el universo y una creciente evidencia observacional. Desde sus inicios, con el primer modelo estático del universo, propuesto por Einstein en 1917, se han sucedido diferentes paradigmas, donde por paradigma entendemos un marco teórico de estudio dentro del cual se formulan modelos –en forma de teorías y de leyes– y se piensan y realizan experimentos que ponen a prueba dichos modelos. Estos paradigmas –o quizás deberíamos llamarlos "puntos de vista conceptuales"– han constituido –cada uno durante un tiempo más o menos prolongado– las ideas dominantes en la cosmología, y aunque el cambio de uno por otro haya sido rápido –cuando llegó el momento de adoptar una nueva visión–, no faltaron los precursores ni tampoco la resistencia natural a aceptar el cambio.

Ellis [1990] divide la historia de la cosmología en varios paradigmas principales y, entre ellos, ubica sendos cambios de paradigma, cada uno de estos últimos liderado por un personaje – un actor– principal. En esta nota desarrollaremos sucintamente ese cambio radical que se generó en los astrónomos y astrofísicos (ya que aun nadie se proclamaba "cosmólogo") cuando fue descubierto en forma sorpresiva el fondo cósmico de microondas. Veremos que, aunque hubo varios precursores de lo que luego se dio en llamar el modelo del Big Bang caliente, este nuevo modelo del universo no llegó a establecerse sin evidencia y, sobre todo, sin la necesidad de dicha evidencia –la evidencia verdadera, en las palabras de Lewis–. La relevancia de este cambio de

---

\* IAFE/Conicet y CEFIEC/FCEyN-UBA

paradigma, y los desarrollos posteriores durante la segunda mitad del siglo pasado, condujeron a lo que hoy conocemos como “cosmología de precisión” y llevaron a dos de sus máximos exponentes a compartir el premio Nobel en Física del año 2006.

### **Paradigmas en cosmología**

El primer paradigma de la cosmología relativista corresponde a un universo siempre igual a sí mismo, estático o estacionario. Estos modelos requieren incluir un término adicional en las ecuaciones originales de Einstein, conocido como el término de la constante cosmológica (notado con la letra Griega *Lambda*). Los principales exponentes fueron: 1) Einstein mismo, en cuyo modelo, *Lambda*, vista como una forma de gravitación “repulsiva”, contrarrestaba la tendencia newtoniana de la materia al colapso; 2) Willem de Sitter, quien propuso otro modelo estático, pero que años más tarde (en 1927), y con un cambio adecuado de coordenadas, Georges Lemaître reescribió en forma de un universo que se expande en forma acelerada; y 3) Hermann Bondi, Thomas Gold y Fred Hoyle, los principales impulsores del modelo del estado estacionario (de 1948), un modelo que aceptaba la expansión global, observada con la recesión de las galaxias lejanas, pero que se oponía férreamente a la idea de evolución.

El segundo paradigma corresponde a un universo en evolución, con características físicas netamente diferentes en distintas épocas cosmológicas, y caracterizado por las propiedades geométricas del espacio-tiempo. Los principales exponentes fueron Aleksandr Friedmann y el ya mencionado Lemaître quienes, en 1922 y 1924, el primero, y en 1927 Lemaître, hallaron soluciones dinámicas –con y sin constante cosmológica– a las ecuaciones de Einstein. Si bien Einstein supo de las publicaciones de Friedmann (y hasta tuvo oportunidad de discrepar con él, y luego de retractarse), los trabajos pioneros del científico ruso no recibieron la debida atención.

Visto con la perspectiva que dan los años, no existía aun una “necesidad interna” de cambio (Thomas Kuhn diría que los modelos existentes “no entraron en contacto con ningún punto en conflicto en la práctica de la ciencia normal”). Si bien las primeras observaciones de los astrónomos Vesto Slipher y Edwin Hubble comenzaban a salir a la luz, éstas no constituían aun una “evidencia verdadera”. Lo mismo sucedió con el trabajo posterior de Lemaître, quien, a diferencia de Friedmann, había hecho énfasis en relacionar los corrimientos espectrales con el universo en expansión.

El tercer paradigma establece nuevamente la necesidad de un universo en evolución, pero esta vez dotado de una fase inicial densa y energética, característica de los actualmente llamados modelos del Big Bang caliente. En estos modelos se hace aplicación de la física nuclear y de plasmas para la estimación de varios observables, tales como las abundancias relativas de los núcleos más ligeros, como el del Helio (etapa de la nucleosíntesis primordial) y la época de emisión, temperatura y características espectrales del fondo cósmico de microondas. Entre los principales exponentes de este paradigma contamos nuevamente a Lemaître, y luego a Richard Tolman, George Gamow y sus colaboradores. En ellos nos concentraremos unas líneas más abajo, cuando discutamos la identidad del actor principal de la transición entre el segundo y el tercer paradigmas, interés principal de nuestro trabajo.

### Las figuras de transición: Eddington

Como lo señalamos, Friedmann y Lemaître habían concebido universos dinámicos a partir de las ecuaciones de Einstein. En particular, Lemaître había incluso enviado su trabajo a uno de los astrofísicos más influyentes del momento, Arthur Eddington, quien años antes (durante el año académico 1923-1924) había sido su maestro en Cambridge, Inglaterra. Pero la comunidad de científicos—Eddington incluido—no los había tenido en cuenta.

Con el correr del tiempo, los investigadores habían intentado usar los modelos estáticos para dar cuenta de los corrimientos espectrales —que se acumulaban luego de varios años de estimar la velocidad de fuga de las galaxias— pero sin éxito. El momento culminante sucedió durante la reunión de Royal Astronomical Society, del 10 de enero de 1930, donde tanto Eddington como de Sitter vislumbraron la posibilidad de universos no estáticos. En un comentario posterior sobre esta reunión publicado en la revista *Observatory*, y refiriéndose a la limitación impuesta por las soluciones estáticas (de Einstein y de De Sitter), Eddington decía: “Una pregunta intrigante es por qué habrían de existir solo dos soluciones. Creo que todo el problema radica en que la gente se concentra en soluciones estáticas”. Coherente con sus afirmaciones, Eddington y un estudiante, George McVittie, comenzaron a trabajar en el problema; Eddington se había dado cuenta de la necesidad de investigar soluciones dinámicas a las ecuaciones de Einstein.

En el interin, los comentarios de dicha reunión llegaron a oídos de Lemaître, quien —como vimos— había publicado sus soluciones dinámicas en 1927, e incluso enviado sus trabajos a Eddington. Lemaître vuelve entonces a escribir a su antiguo profesor y le adjunta copias de su *paper*. Ante la evidencia del importante trabajo de Lemaître —y quizás un poco avergonzado por no haberlo considerado más seriamente tiempo antes— Eddington escribe con premura una carta a la revista *Nature* (publicada el 7 de Junio de 1930) comentando dicho trabajo [Kragh, 1996]. También envía copia a de Sitter y hace traducir el trabajo en inglés para su publicación en la revista *Monthly Notices* [Lemaître, 1931].

Probablemente Eddington había leído el trabajo de Lemaître en su momento, pero no había comprendido cabalmente su importancia. En 1930, luego de las dificultades de los modelos de Einstein y de De Sitter, luego de la evidencia observacional de Slipher y Hubble (recordemos que en un libro, Eddington [1924] resumía las observaciones del primero) y luego de que se acumularan trabajos —como el de Tolman [1929]— que mostraban que dichos modelos no explicaban adecuadamente las observaciones, el momento era el adecuado para un cambio de paradigma. A esto sumemos el trabajo publicado por Eddington [1930] donde demuestra la inestabilidad del modelo estático de Einstein.

Todo esto indica que la expansión del universo había estado allí, a la vista de todos, ya desde 1917, escondida detrás de las ecuaciones de Einstein. Se puede argumentar que los trabajos y la influencia de Eddington fueron los motores del cambio [Ellis, 1990]. Se instaló rápidamente una nueva ortodoxia, a tal punto que aquellos trabajos que no podían incorporar la expansión del universo no eran ya más considerados seriamente por los investigadores.

### Un universo en expansión

Luego de este cambio de paradigma, la mayoría de los investigadores activos en cosmología relativista sabía que el universo era dinámico. Quedaban por supuesto unos pocos que se resistían, como por ejemplo los astrónomos Heber Curtis y Fritz Zwicky; incluso Hubble nunca

congenió bien con la interpretación de un universo en expansión que se hacía a partir de los datos de sus observaciones, y sus trabajos fundacionales ofrecen claros indicios de que su postura era la del primer paradigma, el de un universo estático. (Nótese que esto no es singular ni exclusivo de la astronomía; estudios hechos por Alexandre Koyré mostraron que existe una serie de elementos medievales incluso en el pensamiento de Galileo, fundador del estudio moderno del movimiento.)

A pesar de que Einstein se había resistido por años a la idea de un universo en evolución, en 1932 colaboró con quien antes fuera su rival científico, de Sitter, en el análisis del caso más simple de un universo con curvatura espacial, presión de la materia y constante cosmológica nulas [Einstein, de Sitter, 1932]. Este modelo pasaría a ser, con los años, uno de los más simples y útiles para los cosmólogos. En él se relacionan en forma directa dos de los observables que en la época tenían más sentido para los autores: la tasa de expansión (dada por  $H$ , que luego bautizarían como la constante de Hubble) y la densidad media del universo.

Con el cambio de paradigma, numerosos investigadores se volcaron a trabajar con universos en expansión. De 1934 es el importante trabajo en el que Tolman introduce la idea de la "historia termodinámica" del universo y muestra que, si bien la expansión hace disminuir la temperatura efectiva de un fondo de radiación con distribución de cuerpo negro, no modifica sin embargo su espectro térmico [Tolman, 1934]. Este resultado será de suma importancia para identificar, años más tarde, el origen del fondo cósmico de microondas.

### **Cosmología nuclear y el fondo cósmico de microondas**

Hacia fines de los años 1940 aparecen los primeros cálculos de Gamow y de sus colaboradores. La física nuclear había progresado mucho en años anteriores y se trataba entonces de trasladar los conocimientos adquiridos al universo primordial e intentar hacer fusionar neutrones y protones para formar elementos más pesados. Luego, a partir de estos núcleos básicos, y al combinarse éstos con los electrones libres, se formaría la materia neutra, y el universo entonces resultaría transparente a los fotones de la radiación, quedando éstos libres en su viaje por el cosmos. Los cálculos preliminares predecían la existencia y características aproximadas de esta radiación residual. Estimaciones más refinadas hechas en 1948 por dos de los colaboradores de Gamow, Ralph Alpher y Robert Herman, indicaban que la temperatura efectiva debía ser de unos 5 kelvin [Alpher, Herman, 1948]. Esta fue la primera vez se publicó una estimación cuantitativa para la temperatura del fondo cósmico de microondas.

Las estimaciones de Gamow y de sus colaboradores fueron repetidas en varias ocasiones, aunque con un lenguaje más propio de la física nuclear que el adecuado como para que los astrónomos de la época pudieran comprenderlo, y eventualmente interesarse en su posible detección observacional. (Por ejemplo, la idea de que se trataba de un fondo de radiación en el rango de las ondas de radio no fue jamás aclarado en sus trabajos, donde se hablaba más bien de "la temperatura del espacio interestelar" o de "la temperatura del universo"). El hecho es que la predicción quedó olvidada por varios años.

Sin embargo, en 1964, los físicos rusos Andrei Doroshkevich e Igor Novikov, publicaron unos cálculos teóricos sobre espectros de radiación electromagnética en el universo en evolución [Doroshkevich, Novikov, 1964]. Hicieron notar, además, que el fondo cósmico de microondas del grupo de Gamow, con su espectro térmico de cuerpo negro, dominaría en amplitud sobre

fuentes discretas de radiación en una cierta banda de frecuencias. Su trabajo (en ruso) fue el primero en poner en relieve la importancia de buscar experimentalmente esta radiación residual. Sin embargo, y como sucedió otras veces en cosmología, este importante paper quedó olvidado en las bibliotecas. Un nuevo toque de ironía, pues los rusos habían incluso identificado el radiotelescopio que, a su juicio, sería el más adecuado para llevar a cabo la tarea observacional: un radiotelescopio de la empresa norteamericana Bell, y donde el fondo cósmico de microondas fue en efecto descubierto –sorpresivamente– poco tiempo más tarde.

El resto de la historia sobre el descubrimiento del fondo cósmico de microondas es ya más conocido [Gangui, 2005]. En el año 1964, los radioastrónomos norteamericanos Arno Penzias y Robert Wilson no lograban desembarazarse de un persistente ruido de fondo de una antena de los laboratorios Bell, en Holmdel, New Jersey, que había sido planeada para medir ondas de radio procedentes de un satélite de comunicaciones. Luego de meses de un trabajo minucioso y luego de descartar todas las fuentes de ruido posibles e imaginables, Penzias y Wilson se vieron forzados a concluir que el ruido era debido a la existencia de un fondo de radiación de unos 3,5 kelvin. Este fondo de ondas radio era además idéntico en todas las direcciones del cielo (era isótropo), no presentaba nivel detectable de polarización y estaba libre de variaciones estacionales; era, sin embargo, de "origen desconocido" [Penzias, Wilson, 1965].

En el interim, quien había comenzado a interesarse por el fondo de radiación residual era el físico norteamericano Robert Dicke, un pionero en la fabricación de radiómetros, pero asimismo alguien que se movía con total soltura en "la teoría", y era nada menos que el padre de la llamada teoría de Brans-Dicke, una de las principales alternativas a la relatividad general de Einstein. Dicke suponía que este fondo debía producirse por la destrucción de elementos pesados al alcanzarse las inmensas temperaturas de la fase de contracción de un universo "oscilante", modelo que estaba de moda por la época. Así, Dicke sugiere entonces a Peter Roll y a David Wilkinson la construcción de un radiómetro para buscar dicha radiación residual y asigna al joven James Peebles los cálculos teóricos. Tiempo más tarde, en un coloquio llevado a cabo en Baltimore, Peebles habla sobre el proyecto de su grupo y esta información no tarda en llegar a oídos de Penzias y de Wilson...

Mientras que el grupo de Dicke se aprestaba a realizar las primeras mediciones en el techo de su laboratorio, en Princeton, él y sus colaboradores descubren con gran sorpresa que una dupla de radioastrónomos –de los que jamás habían oído hablar– se les había adelantado en el gran descubrimiento. En los días que siguen, ambos grupos se reúnen en el sitio de la antena de Holmdel para escuchar este "débil susurro" del Big Bang, reconociendo la importancia que esto comportaba para la cosmología. Así es cómo, aconsejados por el grupo de Princeton, la interpretación de este "ruido molesto" terminó por hacer a Penzias y Wilson acreedores del premio Nobel de física en 1978 y, a la antena de Holmdel, del título de monumento histórico el 20 de diciembre de 1989.

### **La segunda transición: Peebles y los procesos nucleares fuera del equilibrio**

Vimos que los modelos de universo en expansión con un pasado denso y caliente ya habían sido tenidos en cuenta por varios investigadores, entre ellos por los integrantes del grupo de Gamow y, a través de sus trabajos, también por los miembros del grupo de Yakov Zel'dovich. En 1963, este último consideraba el modelo de Gamow suficientemente interesante como para realizar

cálculos [Zel'dovich, 1964] aunque sus conclusiones fuesen pesimistas respecto de la realidad de dicho modelo. (Al estimar una temperatura resultante de 20 kelvin para la radiación residual, Zel'dovich concluía que "la teoría de Gamow debe ser descartada".) Pero los modelos de Gamow no eran los únicos; también los modelos del estado estacionario, de Hoyle, Bondi y Gold, estaban en carrera. Aunque en estos últimos no existía el concepto de evolución global, característico de los modelos de Gamow (y de Lemaître).

Pero es posible argumentar que no fue el grupo de Gamow, ni siquiera el de Zel'dovich, quien dio mayor impulso a la idea de un universo como el de los modelos del Big Bang, sino James Peebles. Pues en 1966 Peebles realizó los cálculos de la abundancia del Helio primordial, teniendo en cuenta la existencia del fondo cósmico de 3 kelvin. Y en estos cálculos se basó la primera (y correcta) interpretación del fondo cósmico descubierto sorpresivamente por Penzias y Wilson. Si bien no fue él el primero en dar la interpretación correcta del fondo cósmico, sí sucedió que a partir de sus trabajos la comunidad de físicos y astrónomos—convertidos sin darse cuenta en los primeros cosmólogos—aceptó el cambio de paradigma: no bastaba ya con describir un universo en expansión; se precisaba ahora dotarlo además de la física necesaria, la física que modelaba procesos nucleares fuera del equilibrio.

En efecto, en el trabajo de su grupo teórico de Princeton [Dicke *et al.*, 1965] se explica que a muy altas temperaturas, el fluido primordial estaría compuesto por igual número de protones y neutrones y que, a medida que el universo se expandía y enfriaba, estos nucleones se combinaban para dar deuterones, los que a su vez luego serían la materia prima para formar los núcleos del Helio. Bien, con palabras diferentes esta explicación estaba ya contenida en los trabajos de Alpher y Herman, los pupilos de Gamow, trabajos que, como vimos, no tuvieron el impacto que se merecían.

Si bien las afirmaciones se basaban en cálculos preliminares, los cálculos más precisos de Peebles sobre la producción de elementos livianos en el marco del Big Bang caliente no tardaron en llegar [Peebles, 1966] y con ellos se resolvieron las pequeñas discrepancias que quedaban. Por el lado de Dicke, aunque lideró el trabajo que realizó la interpretación correcta del descubrimiento de Penzias y Wilson, quedó—incluso por varios años después de esta publicación—atrapado por su modelo cosmológico inicial (el de Brans-Dicke) al que volvió en un paper de 1968. Por su parte, los miembros experimentales del grupo de Princeton, Roll y Wilkinson, publicaron su detección de la radiación de fondo en una frecuencia diferente—el doble de aquella observada por Penzias y Wilson—apenas meses después de la publicación inicial del gran descubrimiento. El valor detectado se ubicaba con comodidad en el lugar esperado para un espectro de cuerpo negro a unos 3 kelvin. Esta observación dio un espaldarazo importante a la interpretación del fondo de radiación como residuo del Big Bang caliente, además de un fuerte dolor de cabeza a los proponentes del modelo del estado estacionario [Peebles, 1993].

Sin embargo, no fueron estos estudios los que produjeron el punto de inflexión, si no los trabajos teóricos de Peebles, que lograron que la comunidad de cosmólogos decidiera que la observación del fondo cósmico de microondas representaba realmente un descubrimiento. Se había producido un cambio abrupto en la forma de pensar la evolución del universo. La evidencia—tanto teórica, en los trabajos de Gamow y colaboradores, como experimental, en las observaciones de Penzias y Wilson—estaba allí. Pero no era aún una "evidencia verdadera", en la

terminología de C.S.Lewis. Aún al precio de adherir –momentáneamente– a una historia *whig* de la cosmología [Butterfield, 1951; Ellis, 1990] y hasta dar argumentos para que se nos etiquete de anacronistas [de Asúa, 2007], podemos afirmar que fueron los trabajos de Peebles los que convencieron a sus pares de que un nuevo cambio de paradigma venía de llevarse a cabo.

## Referencias

- Alpher, R.A., Herman, R.C. 1948, *Nature* 162, 774-775.
- Butterfield, H. 1951, *The Whig Interpretation of History*, Bell, London.
- de Asúa, M. 2007, *Ciencia Hoy* 97, 10-20.
- Dicke, R.H., Peebles, P.J.E., Roll, P.G. and Wilkinson, D.T. 1965, *Astrophysical Journal* 142, 414-419.
- Doroshkevich, A.G., Novikov, I.D. 1964, *Soviet Physics - Doklady* 9, 111-113.
- Eddington, A.S. 1924, *The mathematical theory of relativity*, CUP.
- Eddington, A.S. 1930, *Monthly Notices of the RAS* 90, 668-672.
- Einstein, A., de Sitter, W. 1932, *Proceedings of the Natural Academy of Sciences* 18, 213-214.
- Ellis, G.F.R. 1990, in *Modern cosmology in retrospect*, Bertotti, B, et al. (ed.), CUP.
- Gangui, A. 2005, *El Big Bang: la génesis de nuestra cosmología actual*, Eudeba.
- Kragh, H. 1996, *Cosmology and controversy: The historical development of two theories of the universe*, Princeton U. Press.
- Lemaître, G. 1931, *Monthly Notices of the RAS* 91, 483-490.
- Lewis, C.S. 1964, *The Discarded Image, an introduction to medieval and renaissance literature*, CUP 1964, reprint edition 2000, págs. 14 y 222.
- Peebles, P.J.E. 1993, *Principles of physical cosmology*, Princeton U. Press.
- Peebles, P.J.E. 1966, *Astrophysical Journal* 146, 542-552.
- Penzias, A.A., Wilson, R.W. 1965, *Astrophysical Journal* 142, 419-421.
- Tolman, R.C. 1929, *Astrophysical Journal* 69, 245-274.
- Tolman, R.C. 1934, *Relativity, thermodynamics and cosmology*, Clarendon Press, Oxford.
- Zel'dovich, Ya.B. 1964 [1963], *Soviet Physics - Uspekhi* 6: 475-94.