

COMENTARIO INVITADO

Premio Nobel de Física 2019

Descubrimientos teóricos de la física del cosmos

Emilio Elizalde

La mitad del Premio Nobel de Física 2019 ha sido concedido a James Peebles por su contribución a la cosmología teórica, más en particular, por sus contribuciones a nuestra comprensión de la evolución del universo.



Il. Niklas Elmehed. © Nobel Media

El Premio Nobel de Física 2019 ha sido concedido a "contribuciones a nuestra comprensión de la evolución del universo y del lugar de la Tierra en el cosmos."

La mitad del premio ha distinguido a James Peebles "por sus descubrimientos teóricos en cosmología física" y la otra mitad se la han repartido Michel Mayor y Didier Queloz "por su descubrimiento de un exoplaneta que orbita una estrella de tipo solar." Aquí me referiré únicamente a investigaciones correspondientes a la primera mitad del premio.

Phillip James Edwin Peebles nació el 25 de abril de 1935 en St. Boniface, en lo que hoy es Winnipeg, Manitoba, Canadá. Tras completar su licenciatura en ciencias en la Universidad de Manitoba, dejó esta ciudad en el otoño de 1958 para seguir sus estudios en la Universidad de Princeton, EE. UU., donde se doctoró en 1962, bajo la supervisión de otro gran cosmólogo, Robert Dicke. Su posterior carrera científica la ha desarrollado siempre en Princeton, en la Universidad y en el Instituto de Estudios Avanzados, como miembro en diversas ocasiones de la Escuela de Ciencias Naturales. Actualmente es el Profesor Emérito de Ciencias Albert Einstein de dicha Universidad.

Con Dicke y otros colaboradores Peebles hizo ya muy pronto su primera gran predicción teórica: la existencia de un fondo de radiación de microondas (CMB) procedente del Big Bang, del origen del universo [1]. Pero antes de proseguir cronológicamente, es preciso remontarse más atrás, para explicar de qué hablamos y encontrar la manera de enmarcar y a la vez poner en riguroso orden este ambicioso tema; cosa que, para mi asombro, he podido conseguir ¡hurgando en la página web del propio Peebles!

Un asunto en el que llevo inmerso algunos años es el de reivindicar el importante papel de Vesto Slipher como pionero en la gestación de la cosmología moderna. Cual no ha sido mi alegría al descubrir que Peebles comparte esa idea. Veamos que escribe en su sucinta página web:

Con respecto a las hipótesis de la materia oscura y la quintaesencia, llamo la atención sobre el verso¹

Así que ahora estamos en Boston,
Hogar de las alubias y el bacalao,
Donde los Lowell sólo hablan con los Cabot,
Y los Cabot sólo hablan con Dios.

*[So now we are in Boston,
The home of the bean and the cod,
Where the Lowells talk only to Cabots,
And the Cabots talk only to God.]*

Uno podría estar inclinado a comparar con la familia Cabot a las familias de materia que interactúan tan sólo con la gravedad. Pero Percival, de la familia Lowell, usó su fortuna para establecer el Observatorio Lowell y llevó allí a los hermanos Slipher; sus notables contribuciones incluyen el descubrimiento del desplazamiento al rojo cosmológico.

El observatorio Lowell estuvo, sin duda, en el origen de la revolución cosmológica, por mucho que Edwin Hubble se empeñase en afirmar toda su vida que había sido el de Mount Wilson, y que olvidarse reconocer —cosa que no cambió hasta el mismísimo año de su muerte— que Vesto Slipher le había abierto los ojos a la conclusión de que el universo no podía ser estático y, aún más, que el primer paso que había dado Slipher era de hecho el más importante, siendo el progreso posterior en esa línea ya abierta relativamente sencillo [2].

El año 1912 merece ser calificado como el del nacimiento de la cosmología moderna. Fue el año en que Henrietta Swan Leavitt publicó —tras haber analizado varios millares de datos, en particular de las estrellas de las nubes de Magallanes— una ley extraordinariamente importante: la relación período-luminosidad de las estrellas variables cefeidas [3]. Se trata de una dependencia lineal de la luminosidad de la estrella versus el logaritmo del período de variabilidad de la misma. Sería interesante describir los mecanismos físicos propuestos para explicar esta relación (como el de válvula de Eddington), pero lamentablemente aquí no tengo espacio para hacerlo [4]. Henrietta era un miembro distinguido del llamado "harén de Harvard de Edward Pickering", conocido también como "el equipo de computadoras de Harvard", un grupo de mujeres jóvenes que hicieron un excelente tra-

¹ Se trata de un poema popular, adaptado de un famoso brindis que alguien hizo en una reunión de la Cruz Roja en Boston, en 1910. Hace referencia a dos de las más influyentes familias bostonianas. Aunque hay que decir que su página web ha sido cambiada recientemente.

Observatorio Lowell,
Flagstaff, Arizona,
EE. UU.



jo en astronomía en aquella época, estudiando la posición y luminosidad de los puntos recogidos en placas fotográficas del cielo. El resultado de Leavitt fue una herramienta increíblemente poderosa para calcular distancias, de hecho, la principal que Hubble empleó en los años siguientes, y varias generaciones de astrónomos, más tarde, con un éxito enorme (las cefeidas siguen siendo hoy en día las mejores candelas estándar a bajo *redshift*), hasta que aparecerían otras técnicas mejoradas y, más recientemente, las supernovas estandarizables, o SNI, que han conducido al descubrimiento de la aceleración en la expansión del universo (PN de Física 2011). Pero este ya es otro tema, que recuperaré más adelante.

Fue el mismo año 1912 en que Leavitt había publicado sus resultados, cuando Vesto Slipher, un joven graduado en aquella época, inició un proyecto dirigido a obtener las velocidades radiales de las nebulosas espirales a partir de sus espectros, desplazados hacia el color azul o rojo (por efecto Doppler óptico), utilizando precisamente el telescopio de 24 pulgadas del Observatorio Lowell, en Flagstaff, Arizona, al que se refiere Peebles. Y fue allí donde, sin la menor duda, tuvo su origen la revolución cosmológica. El primer cálculo de Slipher, del 17 de septiembre de 1912, fue para la nebulosa de Andrómeda (la más cercana) y dio un corrimiento hacia el azul (*blueshift*), que indicaba que Andrómeda se dirige hacia nosotros a gran velocidad (de unos 300 km/s). En 1914, en una reunión de la Sociedad Astronómica Ameri-

cana, presentó resultados para un total de quince nebulosas. Excepto tres *blueshift*, todo lo demás eran *redshift*, indicando que la mayor parte de las nebulosas se alejaban de nosotros muy rápidamente. Su exposición resultó enormemente clara y convincente y sus resultados fueron recibidos por la audiencia (según las crónicas) con una enorme ovación y con los asistentes puestos en pie. Eso es muy inusual, en una conferencia científica, tanto entonces como ahora, y aquella fecha ha quedado, con razón, registrada en la Historia de la Astronomía. Slipher fue el primero en obtener los espectros de galaxias con una proporción de señal/ruido suficiente como para poder medir de forma fiable los cambios por efecto Doppler [5]. Y sus resultados hicieron tambalear el modelo aceptado hasta entonces de un universo estático.

Como el mismo Hubble reconocería más tarde, Slipher fue el primer astrónomo en señalar que algo muy notable, muy extraño, estaba pasando en el cosmos: ¿cómo podía ser estático con aquellas nebulosas lejanas que se escapaban a velocidades tan grandes? Por supuesto, también entraban en juego las velocidades peculiares, y había que tener en cuenta el efecto dipolar que llevó después a poder medir la velocidad de traslación de nuestra propia galaxia. Pero, ya en aquellos primeros resultados, la tendencia general de dispersión de los objetos distantes era evidente. Queda así claro por qué la gran importancia del descubrimiento de Slipher fue enseguida apreciada en su época.

La tabla de *redshifts* de Slipher fue uno de los dos ingredientes necesarios para la formulación, por Hubble, de la relación velocidad/distancia radial. El otro, la tabla de distancias, sí que fue el resultado del trabajo de Edwin Hubble, con una contribución posterior de Humason, que obtuvo algunos *redshifts* adicionales, utilizados por Hubble, en 1931, para mejorar sus primeros valores. Aunque Milton Humason extendió el cálculo de espectros a las galaxias más débiles, por encargo de Edwin Hubble, los astrónomos de Mount Wilson no habrían avanzado rápidamente sin los resultados pioneros de Slipher. Hubble fue plenamente consciente de la importancia y la prioridad de la espectroscopia temprana de Slipher, pero consistente con su estilo de reclamar el crédito exclusivo de la mayoría de los temas en los que trabajó, nunca quiso subrayar este punto, que sólo reconocería más tarde, casi al final de su vida, refiriéndose a "tus velocidades y mis distancias" [6], en una carta a Slipher del 6 de marzo de 1953. Hubble murió en septiembre de aquel mismo año. En su famoso libro *The realm of the nebulae* [7], sentenció, refiriéndose a Slipher:

[...] los primeros pasos en un nuevo campo son los más difíciles e importantes. Una vez superada la barrera, el avance posterior es relativamente sencillo.

Observatorio Mount Wilson, Angeles National Forest, California, EE. UU. Fotografía de Tom Masterson.



La ley de Hubble era una ley empírica (como el propio Hubble reconoció siempre), un resultado de las observaciones astronómicas. Hubo muchos intentos en paralelo de explicarla a través de una teoría. Y a (casi) nadie se le ocurrió la idea de que el universo estuviese en expansión. Eso era absurdo. No puedo detallar la cantidad de argumentos distintos que surgieron, por parte de la comunidad de astrónomos, para explicar la ley.

De hecho, los teóricos hacían la guerra por su cuenta y no estaban al tanto de todos estos avances de la astronomía. En 1917, Einstein hizo uso por primera vez de sus ecuaciones de campo de la Relatividad General [8] para describir el universo, pero resultó que el universo estático no era una solución de sus ecuaciones² por lo que se vio forzado a introducir la constante cosmológica. El mismo año 1917 Willem de Sitter fue capaz de encontrar una solución muy sencilla a las ecuaciones de Einstein con la constante cosmológica y de hecho la interpretó como correspondiente a un universo en expansión [9]. Pero se trataba sin duda de un universo de juguete: no podía tener nada que ver con el nuestro, ya que no contenía materia ni energía, tan sólo la constante cosmológica. Hoy día la solución de De Sitter es de excepcional importancia en la descripción de las etapas inicial y final de nuestro universo, en que la densidad de materia/energía es extraordinariamente pequeña. Pero fue Alexandre Friedmann quien, en 1922, dijo por primera vez que el universo pudiera ser que estuviese en expansión, ya que había encontrado soluciones de las ecuaciones de Einstein (las originales, sin la constante cosmológica) que así podían interpretarse [10]. El trabajo de Friedmann se recibió en *Zeitschrift für Physik* para su publicación el 29 de junio de 1922. Fue a parar evidentemente a las manos de Einstein, quien el 18 de septiembre envió a su vez una nota a la revista diciendo que el trabajo de Friedmann contenía un error. Tras varias peripecias muy interesantes, que no puedo describir aquí [4], el 31 de mayo de 1923 Einstein envió a *Zeitschrift für Physik* su retractación, reconociendo que quien se había equivocado era él. Pero en absoluto quiso entender que el universo pudiese estar en expansión. Tal idea no le cabía en la cabeza, era una estupidez, y tardó aún otros 10 años en llegar a comprender y aceptar este concepto.

En 1924, el astrónomo sueco Karl Lundmark, haciendo la suposición de que las galaxias eran objetos estándar³, usó su tamaño y brillo para inferir su distancia radial. Luego trató de encontrar una correlación entre los desplazamientos al rojo de Slipher y tales distancias radiales y concluyó que, si bien podría existir, no estaba lo suficientemente claro. En realidad, Hubble también hizo la misma su-



Henrietta Swan Leavitt.

posición, pero mejoró la tabla de distancias usando las estrellas variables cefeidas, cuando estaban disponibles (y de nuevo, como hemos dicho antes, los desplazamientos al rojo de Slipher). De esta manera encontró una correlación clara, conocida hasta hace muy poco como la "ley de Hubble". Ese nombre ha sido cambiado recientemente, por votación realizada entre todos los miembros de la Unión Astronómica Internacional (entre los que me cuento), que en un 78 % aprobaron que sea denominada oficialmente, a partir de ahora, "ley de Hubble-Lemaître" [11].

No en vano el primero en comprender claramente que el universo se expande fue Georges Lemaître. Y no sucedió por casualidad, ni mucho menos, ya que Lemaître iba en busca de un modelo para el cosmos. Mientras estaba trabajando en su tesis doctoral en el MIT, Massachusetts, EE. UU., que defendió en 1925 y cuyo resultado más importante fue reencontrar (de modo independiente) una de las soluciones de Friedmann, Lemaître visitó a Vesto Slipher en Lowell y a Edwin Hubble en Mount Wilson, para conocer de primera mano los últimos resultados en astronomía. Ambos le cedieron graciosamente sus respectivas tablas de velocidades y distancias con las que, en un abrir y cerrar de ojos, obtuvo la ley de Hubble dos años antes que el propio Hubble. Con ello y los resultados de su tesis doctoral (¡que cuadraban!) publicó en 1927 un trabajo en "una oscura revista belga" [12] (así se refieren a ella la multitud de publicaciones sobre este hecho). Allí podemos ver con nuestros propios ojos: a) la ley de Hubble con un valor muy parecido de la constante de Hubble [13] al obtenido por el propio Hubble en 1929 [14] (¡los datos eran esencialmente los mismos!⁴), b) la interpretación

² Como tampoco de las de Newton, claro: tal universo colapsaba a largo plazo por acción de la gravedad.

³ La luminosidad intrínseca sería, en primera aproximación, proporcional a la masa del objeto.

⁴ Los valores obtenidos por Hubble y Lemaître para el valor de la constante H_0 fueron 500 y 625, respectivamente, lo que da un error respecto al valor actual de un 750 % y un 900 %, una barbaridad. Ello refleja el hecho de que el cálculo de distancias en astronomía es extraordinariamente complicado (esa era sin duda la mayor fuente de error). Recuérdese que, en el que se considera como el primer modelo de universo, el de Anaximandro (casi 600 a. C.), se afirmaba que el objeto celeste



Vesto Melvin Slipher



Edwin Hubble



Alexandr Friedmann

física de la ley empírica de Hubble como correspondiente a un universo en expansión, solución de la gravedad de Einstein⁵. Observación importante: la solución de Lemaître en este trabajo *no* es “la” solución de Friedmann sino “una de las” (contiene un término logarítmico y el universo correspondiente no tiene origen, el tiempo va de menos a más infinito). El propio Friedmann había obtenido varias soluciones, que clasificó convenientemente, ya que no imponía las restricciones de que el universo fuera homogéneo e isótropo (en cuyo caso Robertson y Walker demostraron posteriormente que sólo queda una familia de soluciones compatible con ello, con la única libertad remanente de cambiar la curvatura). En el congreso Solvay de 1927 que tuvo lugar en Bruselas (tal vez el más famoso celebrado jamás), Lemaître aprovechó un receso para acorralar a Einstein y mostrarle su

más lejano en el universo era el Sol, y el segundo la Luna (en consonancia con la teoría de los cuatro (cinco) elementos). Esto fue mejorando hasta el punto de considerarse, a principios del siglo xx, que el universo era tan grande como la Vía Láctea, la cual contenía dentro de ella todos los demás objetos celestes, incluidos los varios millares de nebulosas observadas hasta entonces (para más detalles véanse mis referencias [4] en la bibliografía al final del artículo). Si bien los cálculos de Slipher de espectros, para determinar las velocidades, eran mucho más precisos, ahí la dificultad residía (y reside aún hoy día) en separar la componente del *redshift* debida a la velocidad radial, de expansión del universo; puesto que toda galaxia se ve afectada por la atracción de las galaxias cercanas (cúmulo local), de los grandes cúmulos vecinos y de los supercúmulos galácticos, que le proporcionan un movimiento propio que nada tiene que ver con el de expansión del universo y que contribuyen, a veces de manera muy importante, a su *blue-* o *redshift* total.

⁵ Lemaître era considerado por muchos como un cosmólogo *amateur* (hasta el punto de que a veces tuvo que defenderse de estos ataques), pero él fue el primero en construir una teoría científica sólida para la expansión del universo. Es preciso recordar que toda teoría científica se asienta sobre dos pilares: los resultados experimentales y la ley física (teoría fundamental o efectiva) que los explica. En el caso que nos ocupa, la ley de Hubble es tan sólo la parte empírica, observational. La explicación física de la misma se obtiene a partir de la teoría fundamental de la Relatividad General de Einstein, a través de una de sus soluciones, la de Friedmann, que corresponde a un universo en expansión (y que Robertson y Walker demostraron que es la única compatible con un universo homogéneo e isótropo, como lo es el nuestro a gran escala).

brillante trabajo. Otro día, habiéndolo ya examinado, Einstein admitió no haber encontrado ningún error en los cálculos, pero le dijo a Lemaître que la consecuencia física que extraía de sus resultados, eso de que el universo estuviese en expansión, era una idea “abominable”.

No fue hasta 1932, tras su famoso viaje por los EE. UU. en el que visitó a Hubble en Mount Wilson, que Einstein fue finalmente convencido, por Eddington, Tolman y de Sitter, del hecho de que el universo se expandía, en completo acuerdo con los resultados astronómicos. Pese a lo que afirman tantas y tantas “fuentes”, sabemos hoy sin la menor duda, tras investigaciones rigurosas de historiadores de la ciencia [15], que en ningún caso fue convencido por Hubble, quien es notorio que jamás afirmó, ni creyó de hecho, que el universo se expandiera (en contra de lo que se dice en centenares o miles de artículos, libros y encyclopedias). En una carta de Hubble a De Sitter en 1931, expresó claramente sus reflexiones sobre las velocidades diciendo

[...] usamos el término “velocidades aparentes” para enfatizar el rasgo empírico de la correlación. La interpretación, debo dejársela a usted y a los pocos que son competentes para discutir sobre este asunto con autoridad [16].

Eddington había sido el primero en comprender el enorme valor del trabajo de Lemaître⁶ y le ayudó a traducirlo al inglés y a publicar dicha traducción (sólo de la primera parte del trabajo original) en la importante revista *Monthly Notices of the RAS*. El siguiente paso fue que Lemaître se dio cuenta de que, usando una solución distinta de las ecuaciones de Einstein (ésta sí que era “la” de Friedmann, sin el término logarítmico), el universo, además de expandirse, mirando hacia atrás en el tiempo se iría haciendo cada vez más pequeño y ¡tenía un origen! Propuso un modelo en el que, en un remoto pasado, toda la materia y energía actual del universo habría estado concentrada en lo que llamó un átomo primordial o huevo cósmico (en una cáscara de nuez, se diría ahora). Su prestigio había subido mucho en pocos años y este trabajo fue publicado en la revista *Nature* [17]. Pero ahí se pasó de listo y muy pronto iba a colisionar con los físicos nucleares, como W. S. Adams, T. Dunham, G. Gamov, R. A. Alpher, R. C. Herman y, sobre todo, con Fred Hoyle, quienes comprendieron muy pronto que aquel modelo hacía aguas.

Contradicidiendo lo que aparece en tantos lugares, no fue Fred Hoyle el primero que pronunció las

⁶ Desde los resultados de Slipher sobre la huida de las nebulosas lejanas, Eddington había estado tratando de encontrar una explicación a este hecho. También había demostrado que la solución de estado estacionario de Einstein para sus ecuaciones con la constante cosmológica era inestable. Cuando vio el trabajo de Lemaître no tardó demasiado en comprender que éste había dado en el clavo.

palabras "Big Bang", en su famosa lección radiada por la BBC, en 1949. Desde el importante descubrimiento de Slipher, los cosmólogos estaban convencidos de que en un tiempo pasado tenía que haber existido un impulso inicial responsable de haber puesto en expansión todas las masas celestes. Entre los de Cambridge, donde destacaba en particular Arthur Eddington, los términos Bang y Big Bang habían sido empleados a menudo en los años treinta para designar esa fuerza original⁷. Tenían, pues, el sentido de un impulso o gran impulso inicial, producido por alguna especie de explosión cósmica, una fuerza instantánea necesaria para explicar la expansión de las galaxias, confirmada por primera vez, como hemos dicho, en 1914.

En su famosa alocución en la BBC del 28 de marzo de 1949, Hoyle no inventó pues el término Big Bang, pero sí que le dio un significado completamente nuevo, con una base científica arraigada en los principios más profundos de la Teoría de la Relatividad General de Einstein y que muy pocos, fuera de los verdaderos especialistas, son incluso hoy en día, tras setenta años, capaces de comprender adecuadamente. Dijo Hoyle, palabra por palabra:

[Lemaître's model implies that] all matter in the universe was created in one Big Bang at a particular time...

Esto es (según traducción mía):

[El modelo de Lemaître implica que] toda la materia del universo fue creada en un solo Big Bang en un instante particular de tiempo...

Y lo dijo (según los cronistas) con una entonación que daba claramente a entender que este hecho era absurdo, del todo imposible. En el programa de la BBC, Hoyle quería defender su teoría del estado estacionario⁸ contraponiéndola a la de Lemaître y, para hacerse entender por los oyentes (y en parte también intentando ridiculizar la versión de Lemaître), dijo que en esta última toda la



Albert Einstein y Georges Lemaître.

energía/materia del universo debía generarse en el origen, en un instante, y para ello se necesitaba una expansión del tejido del espacio tremenda, un imposible gran petardo a escala cósmica (Big Bang). Nunca habría podido imaginar hasta qué punto aquella denominación se haría tan popular para definir la teoría ahora aceptada sobre el origen del universo (¡justo lo contrario de lo que Hoyle pretendía!).

Fred Hoyle fue la primera persona que descubrió que todos nosotros estamos hechos de polvo de estrellas; esto es, que gran parte de los elementos, de los átomos que forman nuestro cuerpo no se habían podido producir en ese instante inicial del cosmos, sino mucho más tarde (cuando las galaxias se pudieron ya formar y evolucionar) en explosiones de estrellas novas y supernovas. Es lo que ahora se conoce como nucleosíntesis estelar, teoría de la que Hoyle fue pionero. En su obituario "Stardust memories", escrito por John Gribbin y publicado en el diario *The Independent* en 2005, se hace una preciosa descripción de todo esto.

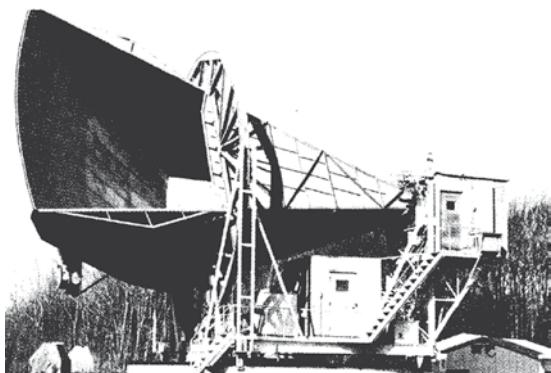
Quede pues claro que Hoyle dio al término Big Bang un significado completamente diferente del que había tenido en Cambridge hasta entonces. De ser un impulso ordinario que, sencillamente, ponía las masas ya previamente existentes en movimiento, pasó a ser un impulso creador, una expansión descomunal del propio tejido del espacio, una enorme presión negativa que haría posible la generación de la formidable masa y energía positiva de todo el universo, a partir de la nada, en un único soploido creador. Esto (y muchas cosas más) es lo que en principio permite hacer la teoría de Einstein de la Relatividad General⁹.

⁷ Debo esta interesante explicación a John Barrow (comunicación personal).

⁸ Es obligado recordar aquí la teoría del estado estacionario (Steady State Theory), que Hoyle, Thomas Gold y Hermann Bondi acababan de elaborar, en 1948. Como el resto de la comunidad científica, no ponían en duda en absoluto la ley empírica de Hubble pero intentaban recomponer el bello modelo de universo, eterno y estático, que había reinado sin rivales hasta el descubrimiento de Slipher. Para mantener constante la densidad de materia/energía del cosmos, pese a la huida de las nebulosas lejanas, postulaban un campo de creación de materia y energía (*C-field*), proceso que tendría lugar constantemente en algunas regiones del universo y a 'coste cero' (*free lunch*, se dice ahora), de manera suave y en la proporción adecuada. El principio de la Relatividad General que permite hacer eso y el involucrado en los modelos inflacionarios es exactamente el mismo, como Hoyle enfatizó insistenteamente durante toda su vida.

⁹ Richard C. Tolman, en su famoso libro de 1934, *Relatividad, termodinámica y cosmología*, explicó ya de manera muy clara cómo un universo cerrado podría tener una energía total cero: cómo toda la materia/energía positiva se contrapone a la energía del campo gravitacional, que es negativa y cómo pueden cancelarse entre sí, lo que lleva a un universo de

La antena reflectora de Arno Penzias y Robert Wilson.



Y por fin estamos en condiciones de retomar el párrafo introductorio. En 1963, Arno Penzias y Robert Wilson trabajaban en los Bell Labs de New Jersey, en la recalibración de una antena reflectora, que ya había sido usada durante varios años y que ellos querían transformar para emplearla en radioastronomía. A pesar de que en aquella época ya existían en algunos lugares radiotelescopios mucho más potentes, aquel modesto reflector de siete metros, con forma de cuerno, tenía unas características únicas para las medidas de alta precisión que querían hacer en la banda de 21 cm, longitud de onda a la que el halo galáctico sería lo suficientemente brillante como para poderlo detectar y a la que se observaría la línea correspondiente a los átomos de hidrógeno neutro. Querían, en particular, observar la presencia de hidrógeno en cúmulos de galaxias (de todo esto hay una descripción muy precisa en la Lección Nobel de Wilson [18]). Tras una serie de medidas realizadas durante varios meses, no conseguían eliminar un ruido muy débil pero persistente, que traducido a temperatura equivalía a unos 3 K, y que era exactamente el mismo en todas las direcciones, noche y día. Consideraron la posibilidad de alguna fuente terrestre y enfocaron la antena en varias direcciones, apuntando en particular hacia Nueva York, pero la variación era siempre insignificante.

Tuvieron en cuenta también la posible radiación de la galaxia, así como todos los tipos de emisiones de radio, pero nada explicaba el ruido de fondo. Estaban ya desesperados y es famosa la anécdota que, un buen día, se dieron cuenta de que la antena estaba parcialmente cubierta por una capa de detritus de palomas y se alegraron mucho de haber encontrado por fin la solución. Pero la alegría les duró poco: tras limpiar la antena la señal ¡todavía estaba allí! E incluso cuando, tiempo más tarde, recubrieron la superficie de la antena con una capa nueva de aluminio.

energía total nula. El concepto que subyace en las palabras “*free lunch*” tan del gusto de los expertos en inflación no lo inventaron ellos en los ochenta, sino que estaba ya claro más de medio siglo antes. Tolman es famoso también por la ecuación de Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV), que con algunas variaciones sigue siendo muy utilizada hoy en día.

Así pasó todo un año. En la misma época y a sólo 60 km, en Princeton, R. H. Dicke, P. J. E. Peebles y D. T. Wilkinson estaban preparando un artículo donde desarrollaban una teoría sobre qué características debía tener la radiación de microondas que nos debería llegar de un universo muy denso en su origen (posiblemente pulsante), en unas condiciones similares, de hecho, a las del Big Bang. Fue Bernard Burke, profesor del MIT, quien habló a Penzias del trabajo de Peebles y colaboradores. Entre todos fueron atando cabos y durante 1964 escribieron dos artículos, los de Princeton con el modelo teórico y Penzias y Wilson con las observaciones de la antena, que aparecieron publicados en 1965 en el mismo número del *Astrophysical Journal*. Se habían ya dado cuenta de que había grandes posibilidades de que Penzias y Wilson ¡hubieran detectado de hecho la onda expansiva del propio Big Bang! De todos modos, la confirmación definitiva de este gran descubrimiento cosmológico, de importancia colosal, se demoró aún unos años. Y hay que decir ahora que la primera evidencia adicional vino de rescatar del olvido unas medidas indirectas que W. S. Adams y T. Dunhan Jr. habían hecho treinta años atrás y que, reanalizadas en 1966, llevaron a concluir que éstos ya habían detectado de hecho (aunque sin darle importancia) una radiación de fondo de unos 2,5 K. Este valor fue aún mejorado en un artículo de *Nature* en 1966: 2,8 K, ya muy cercano al valor de 2,725 K que ahora se conoce con alta precisión. Y respecto a la teoría, hay que notar también que, repasando la literatura, se descubrió que el primer modelo teórico de la radiación del Big Bang no fue el que hemos dicho, sino otro dieciséis años anterior, propuesto por primera vez por George Gamow (discípulo de Friedmann) en 1948 y terminado de perfeccionar por R. A. Alpher y R. C. Herman en 1949 [19]. Esos autores son ahora reconocidos como los primeros que predijeron la radiación de fondo de microondas del Big Bang, para la que calcularon un valor de 5 K, aproximadamente (valor que luego estroppearon, en un cálculo posterior, llevándolo a 28 K). Su descubrimiento mereció a Penzias y Wilson el Premio Nobel de 1978 y, por otra parte, la radiación proveniente del Big Bang descartó de manera concluyente la teoría del estado estacionario. El trabajo de Peebles y colaboradores ha sido también ahora fundamental en la concesión del Premio Nobel de Física de 2019.

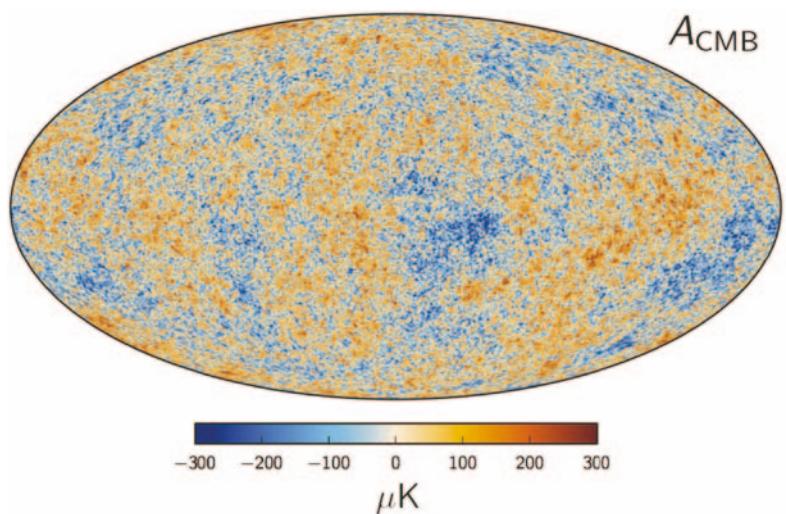
La teoría original de Big Bang tuvo que ser modificada a principios de los años 80 con el fin de resolver algunas discrepancias serias que tenía en relación con las observaciones más precisas del Universo, sobre todo en cuanto a la descripción del primer segundo que siguió a su origen. Se incorporó una etapa de inflación, en la que la expansión fue increíble (el Universo pasó de tener el volumen de un guisante al de la actual Vía Láctea) durante un instante de tiempo brevísimo. Y es durante ese instante cuando, partiendo de un universo prácticamente vacío (casi-de Sitter) se produce la

generación del *quark-gluon* plasma, una vez la inflación cesa. No tengo espacio para describir aquí las teorías de inflación (de nuevo remito a mis artículos de divulgación⁴), que encarnan hoy, dándole naturaleza física, lo que Hoyle había considerado del todo imposible: su Big Bang creador de la materia y energía del universo¹⁰. Pero, ¿cómo concibe la física actual el instante mismo de la creación del Universo? Para Roger Penrose y el hace poco fallecido Stephen Hawking, ese instante es (o fue) una singularidad matemática, quedando fuera del alcance de cualquier interpretación física. Pero las correcciones cuánticas pueden cambiar eso. Y hay nuevos modelos (Alex Vilenkin, Andrei Linde y otros llevan trabajando en ellos desde hace más de veinte años) en que combinando la inflación y las fluctuaciones cuánticas del estado vacío de un sistema primigenio, en el seno del cual una chispa (campo escalar, instantón de Hawking y Turok) sería capaz —a coste energético cero— de iniciar un proceso de inflación que amplificaría extraordinariamente las pequeñas fluctuaciones (de escala de Planck) del vacío cuántico —que están presentes, hay que recordarlo, debido al principio de incertidumbre de Heisenberg (uno de los pilares de la Física Cuántica). Para dar así origen a las fluctuaciones que observamos claramente en el fondo de radiación cósmica (CMB). Este es el mapa del Universo más antiguo que poseemos hasta ahora; data de cuando tenía tan sólo 370.000 años. Antes de eso el cosmos, muy caliente, era una sopa oscura de quarks, gluones y partículas elementales, impenetrable a los fotones, hasta que la temperatura fue bajando y se situó por debajo del umbral de ionización del átomo más pequeño, el de hidrógeno. Este precipitó, de repente, a gran escala y así, por primera vez, la luz del primer amanecer cósmico invadió todo el Universo¹¹. Y ahora nos llega y la hemos podido observar con toda nitidez con los ojos curiosos de satélites como COBE, WMAP y PLANCK, que la han transformado en imágenes, cada vez mejor definidas, del mapa más antiguo de nuestro cosmos.

A fin de adentrarnos más allá —eventualmente hasta el instante cero— necesitaremos mejores ‘ojos’, detectores capaces de captar la información de las ondas gravitatorias primordiales, que esperamos poder procesar dentro de una o dos décadas con proyectos como LIGO, LISA, BBO, DECIGO y otros. Con ello se obtendrán fotos de un Universo más joven y, previsiblemente, se confirmará la inflación.

¹⁰ En mi página web se halla una descripción poética del Big Bang, ver http://www.ice.csic.es/personal/elizalde/eli/inflacionariBB_esp_r.pdf

¹¹ En mi página web se halla también una descripción poética del CMB, la primera luz del cosmos, ver http://www.ice.csic.es/personal/elizalde/eli/La%20primera%20luz%20del%20Cosmos_1.pdf

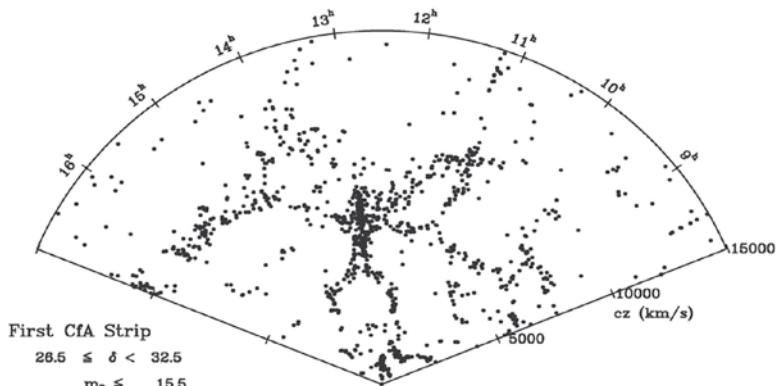


Centrándonos de nuevo en la trayectoria de Peebles, tras su predicción teórica del CMB otra gran aportación fueron sus trabajos con Bharat Ratra de 1988, pioneros y precursores de una gran línea de investigación de la cosmología teórica actual que eclosionó diez años más tarde con el descubrimiento tan extraordinario, antes mencionado, de que la expansión del universo se acelera. El primero en publicar sus resultados fue el Equipo de Investigación de Supernovas de Alto-z, encabezado por Brian Schmidt y Adam Riess, en 1998, mientras que el otro, el denominado Proyecto Cosmológico de Supernovas, con Saul Perlmutter como investigador principal, lo hizo, de manera independiente, el año siguiente 1999 [20]. Dicha aceleración resulta muy difícil de explicar en términos físicos y su contribución al balance total de energías del universo actual es enorme, de más del 70 %. Sobre este otro gran descubrimiento, también revolucionario, el lector habrá recibido ya mucha información, y no me cabe duda de que conoce su nombre: energía oscura. Lo que sí es del todo remarcable es el hecho de que Peebles y Ratra se avanzasen en diez años al publicar sus trabajos premonitorios en los que analizaban las consecuencias de introducir un campo escalar a nivel cosmológico para reconciliar las bajas estimaciones dinámicas de la densidad de masa media con la curvatura espacial, insignificantemente pequeña, preferida por la in-

Fluctuaciones de la radiación cósmica del fondo de microondas (CMB).



Jim Peebles. Foto: Princeton University, Office of Communications, Mark Czajkowski (2016).



Rebanada del universo de Lapparent, Geller y Huchra (1986). La dimensión radial es la distancia a cada punto (galaxia).

flación. Esto les permitió tener ya de antemano un modelo a punto para desarrollar la idea de que el espacio contiene energía cuyo efecto gravitacional se aproxima al de la constante cosmológica de Einstein, Λ , anticipándose así al concepto de energía oscura dinámica, en particular en su forma conocida como quintaesencia [21]. Sus trabajos fueron fundamentales para el establecimiento de una base teórica sólida en la que enmarcar estas revolucionarias observaciones astronómicas [21].

Además de realizar importantes contribuciones a la nucleosíntesis del Big Bang, la materia oscura (de la que no ha habido aquí ocasión de hablar¹²) y la energía oscura, Peebles fue el pionero principal de la teoría de la formación de estructuras cósmicas en la década de 1970. Mucho antes de que se la considerara una rama seria y cuantitativa de la física, Peebles estaba ya sentando las bases de la cosmología física actual e hizo mucho para establecer su respetabilidad [22]. En sus propias palabras: "No fue un solo paso, un descubrimiento crítico lo que repentinamente hizo relevante la cosmología; el campo surgió gradualmente a través de una serie de observaciones experimentales. Claramente, uno de los más importantes durante mi carrera fue la detección del fondo cósmico de microondas (CMB) radiación que inmediatamente llamó la atención, tanto a los experimentales interesados en medir las propiedades de esta radiación como a los teóricos, que se unieron para analizar las implicaciones del descubrimiento" [23]. Peebles ha recibido una quincena de premios de primera magnitud¹². Su cita del Premio Shaw reza: "ha sentado las bases para casi todas las investigaciones modernas en cosmología, tanto teórica como observational, transformando un campo altamente especulativo en una ciencia de precisión" [24].

Termino con una anécdota personal. Cuando a mediados de los años 80 del pasado siglo apareció el primer mapa del universo en tres dimensiones (bien, tan sólo de una rebanada del mismo) [25], lo que tuvo una repercusión espectacular y fue el

origen de mi dedicación parcial a la cosmología teórica¹³, nada habría sido lo mismo sin los dos libros de Peebles [26], que constituyeron el santo grial de los estudiantes de mi grupo¹⁴. Y recuerdo aún con qué algarabía fue recibido el tercero [27], cuando apareció en 1993. Peebles tiene un largo historial en la innovación de las ideas básicas de la cosmología, que luego han sido ampliamente estudiadas y extendidas por otros científicos. Es un verdadero maestro de la cosmología moderna, disciplina cuyos orígenes he intentado describir en esta necesariamente breve reseña¹⁵.

Referencias

- [1] R. H. DICKE, P. J. E. PEEBLES, P. G. ROLL y D. T. WILKINSON, "Cosmic Black-Body Radiation", *Astrophys. J.* **142**, 414 (1965).
- [2] MARCIA BARTUSIAK, *The day we found the Universe* (Random House Digital, 2010).
- [3] H. S. LEAVITT y E. C. PICKERING, "Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud", *Harv. Coll. Observatory Circ.* **173**, 1–3 (1912).
- [4] E. ELIZALDE, "Reasons in favor of a Hubble-Lemaître-Slipher's (HLS) law", *Symmetry* **11**, 35 (2019).

¹³ Si bien la rebanada de la famosa exploración CfA de Harvard, hecha por Valérie de Lapparent, Margaret Geller y John Huchra²⁶, contenía sólo 1.100 galaxias, lo más importante era que para 584 de éstas se había podido determinar la distancia a que se encontraban de nosotros (a partir de su redshift cosmológico) lo que permitió, por primera vez en la Historia, ver una parte del Universo en tres dimensiones. La repercusión del trabajo fue espectacular; debido también a las estructuras que aparecían en esa distribución de puntos: se podía ver una forma humana (el hombre), otra parecía ser un dedo dirigido hacia nosotros (el dedo de Dios) pero lo más intrigante eran las enormes zonas vacías, sin ninguna galaxia, rodeadas por puntos que dibujaban las estructuras mencionadas. Muchos físicos teóricos de todo el mundo y astrónomos que no se habían dedicado antes a la cosmología a gran escala, se pusieron a trabajar, tratando los primeros de crear modelos que explicaran la formación de estas estructuras a partir de teorías fundamentales de la física e intentando encontrar, los segundos, nuevas confirmaciones observacionales de esos comportamientos de las galaxias a gran escala. A veces colaboraron unos con otros, como fue el caso de Edward Witten y Jeremiah Ostriker. En nuestro país, el autor de esta reseña fue de los primeros en sentirse cautivado por aquel mapa y comenzó de inmediato a trabajar en el tema con su entonces estudiante de doctorado en busca de una tesis (y ahora figura internacional) Enrique Gaztañaga. Ese fue el germe que ha dado origen, con el transcurso de los años, a varios grupos de altísimo impacto en estudios teóricos y observacionales del Universo a gran escala, orgullo hoy de la ciencia española.

¹⁴ Enrique Gaztañaga le conoció más tarde personalmente, a instancias del propio Peebles, que le invitó a comer para discutir sobre su modelo, y estuvieron a punto de colaborar.

¹⁵ He de disculparme por no haber podido abordar aquí algunas cuestiones fundamentales, como la materia oscura, las perturbaciones cosmológicas, o las teorías de gravedad modificada, y apenas si he podido mencionar las correcciones cuánticas y los conceptos de inflación y de energía oscura, entre otras omisiones remarcables.

¹² https://en.wikipedia.org/wiki/Jim_Peebles

- E. ELIZALDE, "All that matter ... in one Big Bang ...," & other cosmological singularities, *Galaxies* **6**, 25 (2018).
- E. ELIZALDE, "Cosmological Constant and Dark Energy: Historical Insights", *Open Questions in Cosmology*, G. J. Olmo (ed.) (InTech Publishers, Geneva, 2012, cap. 1), ISBN 978-953-51-0880-1; DOI:10.5772/51697.
- E. ELIZALDE, "L'Origen i el Futur de l'Univers", en La Terra a l'Univers: Astronomia, *Enciclopedia Catalana, Barcelona* 2012; pp. 186-194.
- E. ELIZALDE, blog (en catalán) <https://www.encyclopedia.cat/divulcat/Emili-Elizalde>
- [5] V. SLIPHER, "Spectrographic Observations of Nebulae", *Popular Astron.* **23**, 21-24 (1915).
- [6] *Memorias biográficas*, vol. 52, Academia Nacional de Ciencias (EE. UU.).
- [7] E. P. HUBBLE, "The realm of the nebulae", *The Scientific Monthly* **39**, 193-202, 1936 (También en: Dover Pub. Inc., Nueva York, EE. UU., 1958); <https://archive.org/details/TheRealmOfTheNebulae>.
- [8] ALBERT EINSTEIN, "Die Feldgleichungen der Gravitation", *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin* (25-11-1915), 844-847; <http://nausikaa2.mpiwg-berlin.mpg.de/cgi-bin/toc/toc.x.cgi?dir=6E3MAXK4&step=thumb>.
- [9] W. DE SITTER, "On the curvature of space", *Proc. Kon. Ned. Akad. Wet.* **20**, 229 (1917).
- [10] A. FRIEDMANN, "Über die Krümmung des Raumes", *Zeitschrift für Physik* **10**, 377 (1922).
- [11] General Assembly, International Astronomical Union. 2018. <https://www.iau.org/news/announcements/detail/ann18029/>
- [12] G. LEMAÎTRE, "Homogeneous Universe of Constant Mass and Growing Radius Accounting for the Radial Velocity of Extragalactic Nebulae", *Annales Société Scientifique Bruxelles* **47**, 49 (1927).
- [13] A este respecto hay que mencionar la importante tensión aparecida recientemente entre los valores de H_0 , 74 y 67.4, obtenidos a partir de supernovas y cefeadas a muy bajo y a mediano z , respectivamente, que a primera vista parecen ser del todo incompatibles. Algunas referencias al respecto:
- ADAM G. RIESS, *et al.*, "Large Magellanic Cloud Cepheid Standards Provide a 1% Foundation for the Determination of the Hubble Constant and Stronger Evidence for Physics Beyond LambdaCDM", arXiv:1903.07603 [astro-ph.CO].
- PLANCK COLLABORATION, "Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters", arXiv:1807.06209 [astro-ph.CO].
- WENDY L. FREEDMAN, *et al.*, "The Carnegie-Chicago Hubble Program. VIII. An Independent Determination of the Hubble Constant Based on the Tip of the Red Giant Branch", arXiv:1907.05922 [astro-ph.CO].
- [14] E. HUBBLE, "A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae", *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **15**, 168-173 (1929).
- [15] HARRY NUSSBAUMER, "Einstein's conversion from his static to an expanding universe", *Eur. Phys. J.* **H39**, 37-62 (2014).
- [16] STEN ODENWALD y RICK FIENBERG, "Redshifts Reconsidered", Sky Pub Co (1993).
- [17] G. LEMAÎTRE, "The beginning of the world from the point of view of quantum theory", *Nature* **127**, 706 (1931).
- [18] ROBERT W. WILSON, "The Cosmic Microwave Background Radiation", Nobel Lecture, 8-12-1978; http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/lau-reates/1978/wilson-lecture.pdf
- [19] G. GAMOW, "The Origin of Elements and the Separation of Galaxies", *Physical Review* **74**, 505 (1948).
G. GAMOW, "The evolution of the universe", *Nature* **162**, 680 (1948).
- R. A. ALPHER y R. HERMAN, "On the Relative Abundance of the Elements", *Physical Review* **74**, 1577 (1948).
- G. GAMOW, *One, Two, Three...Infinity* (Viking Press, 1947, rev. 1961), (Dover P., 1974).
- [20] ADAM G. RIESS, *et al.*, "Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant". *The Astronomical Journal* **116**, 1009-1038 (1998). arXiv:astro-ph/9805201
- S. PERLMUTTER, *et al.*, "The Supernova Cosmology Project, Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae", *The Astrophysical Journal* **517**, 565-586 (1999). Entre los coautores cabe destacar a Pilar Ruiz-Lapuente, de la UB, a la que tuve de alumna en mis cursos de la Facultad de Física.
- [21] B. RATRA y P. J. E. PEEBLES, "Cosmology with a time-variable cosmological 'constant'", *Astrophys. J.* **325**, L17 (1988).
- RATRA y P. J. E. PEEBLES, "Cosmological consequences of a rolling homogeneous scalar field", *Phys. Rev. D* **37**, 3406 (1988).
- RATRA y P. J. E. PEEBLES, "The cosmological constant and dark energy", *Rev. Mod. Phys.* **75**, 559-606 (2003).
- [22] J. PEEBLES, "General Relativity's Influence and Mysteries", Institute for Advanced Study. <https://www.ias.edu/ideas/2015/thomas-general-relativity>
- [23] "Interview with James Peebles", CERN EP newsletter. <https://ep-news.web.cern.ch/content/interview-james-peebles>
- [24] "Announcement-The Shaw Laureate in Astronomy 2004", Shaw Foundation. <http://www.shawprize.org/en/shaw.php?tmp=3&twoid=53&threeid=67&fourid=123>
- [25] V. de LAPPARENT, M. J. GELLER y J. P. HUCHRA, "A slice of the universe", *Astrophysical Journal, Letters to the Editor* **302**, L1-L5 (March 1, 1986).
- [26] P. J. E. PEEBLES, *Physical Cosmology* (Princeton University Press, Princeton, 1971).
- P.J.E. PEEBLES, *The large-scale structure of the universe* (Princeton University Press, Princeton, 1980).
- [27] P. J. E. PEEBLES, *Principles of Physical Cosmology* (Princeton University Press, Princeton, 1993).



Emilio Elizalde
Profesor de Investigación del CSIC
Instituto de Ciencias del Espacio (ICE)
Institut d'Estudis Espacials de
Catalunya (IEEC)
Campus UAB, Bellaterra (Barcelona)