La expansión acelerada del universo

Juan García-Bellido

Las recientes observaciones cosmológicas sugieren que habitamos un universo dominado por una materia y una energía cuya naturaleza desconocemos. Cuanto más avanzamos en el conocimiento cuantitativo del cosmos menos lo comprendemos. Las observaciones son ahora lo suficientemente precisas y consistentes entre sí como para poder definir un modelo estándar de la cosmología, basado en la teoría del Big Bang y el paradigma inflacionario, según el cual el universo primitivo sufrió una época de expansión acelerada, responsable de la geometría y la estructura a gran escala de nuestro universo observable.Dichas observaciones sugieren que el universo actual está también acelerándose, debido a una misteriosa energía oscura, cuya comprension probablemente requiera una nueva revolución en la Física.

"La grandeza del hombre radica en darse cuenta de su propia pequeñez"
B. Pascal

En 1543, en pleno Renacimiento, Nicolaus Copernicus publicó que la Tierra no sólo no se encontraba en el centro del universo, sino que sólamente era el tercer planeta de un sistema que giraba alrededor del Sol. Hoy en día sabemos que el Sol es tan sólo una estrella ordinaria, orbitando una galaxia ordinaria en un cúmulo también ordinario. A este ejercicio de modestia se le ha dado en llamar la *revolución copernicana*. Hoy en día estamos atravesando una nueva revolución copernicana, gracias a la precisión que se está alcanzando en las observaciones cosmológicas. Quizá lo más extraordinario de los recientes descubrimientos sea el constatar que la materia de la cual estamos hechos los seres vivos, la Tierra, el Sol y las galaxias, no constituye hoy en día más que una pequeña fracción de toda la materia y energía del universo. El resto es algo que podemos medir con bastante precisión pero cuya naturaleza desconocemos; es más, su propia existencia constituye un reto fundamental para la Física Teórica. Pero, ¿qué tiene ésto que ver con Albert Einstein y su *annus mirabilis* de 1905, cuyo centenario celebramos ahora?

En 1905, Einstein revoluciona la Física en tres frentes distintos: la termodinámica estadística, con la descripción del movimiento Browniano; los fenómenos cuánticos, con la hipótesis del fotón; y la naturaleza del estacio-tiempo, con la formulación de la relatividad especial. Pocos años después generalizaría la relatividad especial, para incluir el principio de equivalencia entre gravitación e inercia, en lo que es probablemente la teoría de campos más elegante, la teoría de la relatividad general. Si la especial nos dice, entre otras cosas, que la materia y la energía son intercambiables, la relatividad general nos asegura que gravitación y geometría son equivalentes; con ella es posible describir los campos gravitacionales generados por cualquier distribución de materia en términos de la geometría del espacio-tiempo curvo (no Euclídeo), así como las trayectorias de la materia en términos de geodésicas (el camino más corto entre dos puntos) de dicho espacio-tiempo.

En particular, con la relatividad general es posible, por primera vez, plantearse una descripción del universo a gran escala. Las ecuaciones de Einstein son demasiado complicadas para ser resueltas sin imponer alguna simetría en la distribución de materia y/o en la métrica. Todas las soluciones exactas que se conocen (y no son muchas) poseen un alto grado de simetría. Para el universo, Einstein supuso que debía ser esencialmente el mismo en todo punto, una generalización a nivel cosmológico del principio copernicano. Esto implica que la distribución de materia a gran escala debería ser isótropa en todo punto y, por tanto, homogénea. A primera vista, desde la Tierra, esta suposición está en absoluta contradicción con las observaciones: de noche, con un cielo despejado, lejos de cualquier ciudad, una de las visiones más extraordinarias es la de la Via Láctea atravesando la bóveda celeste. Hoy en día sabemos que esto se debe a nuestra posición en la periferia galáctica, que induce una clara anisotropía en el cielo. Pero incluso si ignoramos las estrellas de nuestra galaxia, la distribución de *nebulosas* (otras galaxias, como descubrió Hubble a principios de los años 1920) tampoco es homogénea: formamos parte de un cúmulo de galaxias que se dirige a enormes velocidades hacia el Gran Atractor, en la dirección del cúmulo de Virgo. Tan sólo recientemente, en la última década, hemos podido comprobar, estudiando la distribución de galaxias a miles de millones de años luz de la Tierra, que efectivamente la materia se distribuye a gran escala de forma homogénea.

Lo interesante es que las ecuaciones de Einstein predecían, prácticamente para cualquier distribución homogénea e isótropa de materia, que el universo debería expandirse de manera que objetos distantes tuvieran velocidades de recesión proporcionales a su distancia a nosotros, mientras que las observaciones hechas con los telescopios de entonces eran incapaces de medir tales velocidades. Es más, la creencia filosófica de que el universo *debía* ser invariable en el espacio y en el tiempo, llevó a Einstein a descartar tales soluciones y proponer una solución estática, pero pagando un precio muy alto al incluir un absoluto en la teoría, la constante cosmológica, generadora de una fuerza repulsiva que podía compensar la atracción gravitacional de la materia del universo.

Pocos años más tarde, Edwin Hubble, gracias a los telescopios de Mt. Wilson y Mt. Palomar en California, logró resolver las estrellas de las llamadas nebulosas y reconocer que se trataban de galaxias como la nuestra; midiendo los espectros emitidos por dichas galaxias dedujo que un gran número de ellas (todas salvo las del grupo local como Andrómeda y las nubes de Magallanes) se alejaban de nosotros con velocidades de recesión que eran proporcionales a la distancia, confirmando así que el universo estaba en expansión, tal como predecía la teoría de la relatividad general. Al

conocer esto, Einstein en una carta a Hermann Weyl reconocía que si ya no era necesario describir un universo estático, entonces quedaba obsoleta la necesidad de incluir la constante cosmológica en sus ecuaciones. Se ha dicho muchas veces que Einstein calificaba la introducción del término cosmológico como el mayor error de su vida, pero probablemente se refería a la ocasión perdida de hacer la predicción más espectacular de su teoría: la expansión del universo.

La confirmación de las velocidades de recesión de las galaxias llevó a los cosmólogos a cuestionarse la posibilidad de un origen del universo, dado que un universo en expansión ha de provenir necesariamente de un estado más denso y más caliente que el actual. Esta sencilla observación llevó a George Gamow, en los años 1940, a proponer el modelo del Big Bang, o de la gran explosión, por la que el universo actual podría haber surgido de un estado de enorme densidad y temperatura en el que las reacciones nucleares fueran lo suficientemente rápidas y energéticas como para que se formaran los elementos más ligeros en el universo primitivo, y así fué capaz de explicar la abundancia relativa de helio e hidrógeno. A partir de dichas observaciones dedujo que debía existir un remanente de dicho "horno termonuclear" en forma de radiación electromagnética de cuerpo negro, y estimó su temperatura como de unos pocos grados Kelvin. En 1964, Arno Penzias y Robert Wilson descubrieron por casualidad dicho fondo isotrópico de microondas a una temperatura de 3 K, confirmando espectacularmente las predicciones de la teoría del Big Bang. Recientemente, el satélite COBE midió la radiación de cuerpo negro remanente del origen caliente del universo con una precisión de unas partes por millón, sin duda el mejor espectro de cuerpo negro jamás medido.

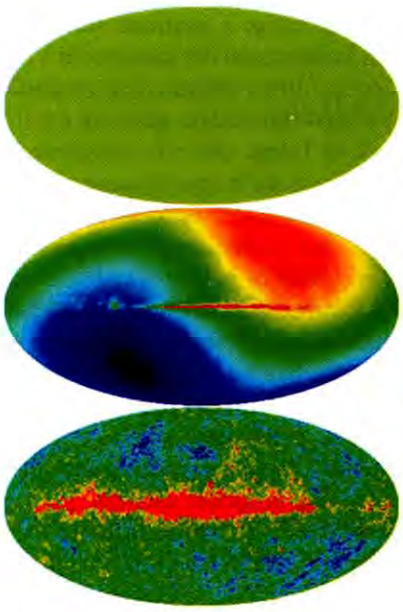


Figura 1. El fondo de microondas visto por el satélite WMAP, con una resolución angular de 10 minutos de arco. La imagen muestra la enorme isotropía del monopolo (panel superior), a una temperatura de T_0 = 2.725 K; el dipolo (panel intermedio), correspondiente a nuestro movimiento "peculiar" respecto del fondo de radiación, en dirección del gran atractor en el cúmulo de Virgo; y finalmente, las anisotropías intrínsecas, correspondientes al cuadrupolo y los multipolos superiores, al nivel de unas partes por 100,000. Esta imagen contiene tal cantidad de información, que permite determinar los parámetros cosmológicos con una precisión del orden de unos pocos por ciento.

En el contexto de la teoría del Big Bang, las galaxias, cúmulos y supercúmulos se forman por colapso gravitacional de pequeñas inhomogeneidades que empiezan a crecer despúes del desacoplo de los fotones, cuando el universo tenía tan solo 400,000 años. En principio, todo lo que se necesita para formar galaxias es materia bariónica (protones y neutrones) que, gracias a la atracción gravitacional, entra en ignición termonuclear formando estrellas muy masivas, alrededor de las cuales se forman discos de acreción que luego darán lugar a las galaxias, que a su vez se agregan formando los cúmulos de galaxias, y más tarde los supercúmulos. Sin embargo, la cantidad de bariones deducida de la abundancia relativa de elementos ligeros no parece ser suficiente para explicar la distribución de galaxias que observamos. En 1933, Franz Zwicky se dió cuenta de que las velocidades de las galaxias que forman el cúmulo de Coma eran demasiado grandes; es decir, dichas galaxias no podrían estar ligadas, a no ser que existiera de diez a cien veces más materia (oscura, ya que no emite ni absorbe luz) que la asociada a las galaxias. Más tarde se confirmaría la existencia de materia oscura en las propias galaxias, a través de las curvas de rotación del gas situado a gran distancia del disco galáctico. Hoy en día sabemos que la materia oscura es responsable de la formación de galaxias, cúmulos y supercúmulos de galaxias, es decir de la estructura a gran escala del universo, y constituye unas 10 veces la materia bariónica. Sin embargo, todavía no sabemos de qué está hecha; se especula sobre su relación con ciertas componentes que aparecen en teorías de partículas de altas energías (que se espera sean exploradas con los futuros aceleradores de partículas, como el Large Hadron Collider del CERN), pero aún sigue siendo un misterio el origen y la abundancia relativa de dicha materia oscura.

Pero, ¿qué ha pasado con la constante cosmológica? Setenta años después de las primeras observaciones de la recesión de las galaxias se han alcanzado distancias de cientos, incluso miles, de millones de años luz hasta observar galaxias que emitieron su luz cuando el universo tenía tan sólo una pequeña fracción de su edad actual. Estas medidas han permitido determinar el ritmo de expansión del universo con una precisión mejor del 10%. Más aún, gracias a ciertas estrellas supernovas, que explotan siguiendo un patrón de luz característico, ha sido posible medir no sólo el ritmo de expansión sino la aceleración del universo. Las observaciones, hechas por dos grupos independientes en 1998 y ampliamente confirmadas por otras observaciones desde entonces, sugieren que el universo se está acelerando, en contra de lo que se esperaba. Un universo dominado por materia, que forma estructura por colapso gravitacional alrededor de pequeñas inhomogeneidades hasta formar las galaxias, los cúmulos y supercúmulos, debería expandirse de forma decelerada, ya que la atracción gravitacional de la materia frenaría la expansión. Más aún, observando la luz de dichas supernovas, que nos llega de distancias cosmológicas muy distintas, es posible concluir que en el pasado el universo se expandía de forma decelerada, como corresponde a un universo dominado por materia, y que sólo recientemente, desde

hace tan sólo 6 mil millones de años, está expandiéndose de forma acelerada.

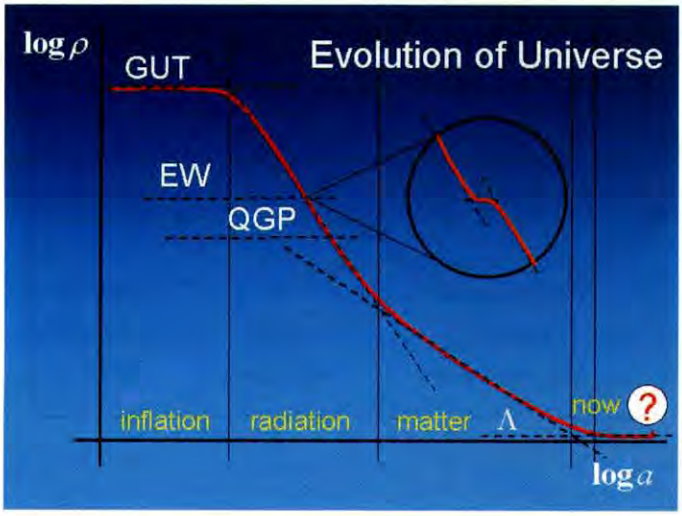


Figura 2. La evolución de la densidad de energía del universo puede haber transcurrido con una serie de transiciones de fase (responsables de sucesivos periodos inflacionarios más o menos extensos) separados por periodos dominados por la energía de la radiación o de la materia. Posiblemente estamos viviendo un nuevo periodo inflacionario que caracterizamos por una constante cosmológica efectiva, y que quizá finalice en un futuro lejano en el verdadero vacío de la Teoría Cuántica.

Toda la materia que conocemos, relativista o no, visible o no, se comporta de manera similar, frenando la expansión del universo, luego la observación de la aceleración actual del universo sugiere que hay algo más en el universo que materia ordinaria. Esta componente extra debía ser menor en el pasado, para que se pudieran formar las estructuras de materia como galaxias y cúmulos que observamos en el universo, mientras que actualmente parece que domina la densidad de materia y energía del universo. Observaciones recientes sugieren además que esta densidad de energía es muy aproximadamente constante, o al menos que su posible variación espacio-temporal está significativamente acotada. Todo este conjunto de observaciones es consistente, por el momento, con la existencia de una auténtica constante cosmológica.

Mientras que la constante cosmológica invocada por Einstein para obtener un universo estático resultó ser un elemento *ad hoc* superfluo, la actual constante cosmológica es cada día confirmada por nuevas observaciones, que permiten calcular su valor con precisión creciente en el contexto de un modelo cosmológico estándar consistente. Y esto es lo que más desconcierta a los cosmólogos y, en general, a los físicos teóricos, ya que el valor obtenido resulta ser muchos órdenes de magnitud menor que lo que la mecánica cuántica predice. Pero, ¿qué tiene que ver la mecánica cuántica con la cosmología? A primera vista nada, ya que la primera describe fundamentalmente el mundo microscópico, a escalas atómicas, mientras que la segunda describe el universo, a escalas ciertamente macroscópicas. Sin embargo, la constante cosmológica puede ser interpretada tanto como geometría –ya que determina la curvatura del espacio-tiempo– como una componente de materia muy especial, la densidad de energía del *vacío* de la teoría cuántica.[1] Por otra parte, sabemos que toda distribución de energía debe satisfacer los principios de la mecánica cuántica y, en concreto, el principio de indeterminación de Heisenberg, que asegura que ningún sistema físico puede tener en el estado fundamental una energía idénticamente igual a cero. Pues bien, si nos calculamos la densidad de energía del estado de vacío de la teoría cuántica obtenemos un número que es 120 órdenes de magnitud mayor que el correspondiente a la constante cosmológica. Claramente estamos haciendo algo mal.

Esta densidad de energía es constante, independiente del observador, y corresponde a un fluido perfecto con una ecuación de estado muy peculiar: una presión igual en magnitud a la densidad de energía, pero de signo *opuesto*; es decir, una presión negativa. No estamos acostumbrados a distribuciones de energía o materia con estas características. ¿Cómo es posible que no hayamos notado hasta ahora la existencia de la energía de vacio de la teoría cuántica, si los experimentos de partículas, que son sensibles a las otras tres interacciones fundamentales, alcanzan precisiones de hasta 12 cifras significativas correctas? La razón es que las fuerzas asociadas a dichas interacciones surgen de *gradientes* o diferencias de energías potenciales, luego son *insensibles* a la energía de punto cero de la teoría cuántica. Tan sólo la gravedad es sensible a dicha energía y ésto es debido a que, gracias al principio de equivalencia entre gravitación e inercia, toda energía gravita y en concreto la densidad de energía de vacío lo hace de forma especialmente notoria. Si dicha densidad tuviera el valor predicho por la teoría cuántica, el radio de curvatura del universo sería 20 órdenes de magnitud menor que el núcleo atómico, y no 40 órdenes de magnitud mayor, como parece ser nuestro universo observable. Este fenomenal desajuste entre teoría y observación constituye lo que se conoce como el *problema de la constante cosmológica* y resulta ser uno de los más graves de toda la Física. En él se dan cita dos de las teorías físicas más extraordinarias que ha desarrollado el ser humano, la mecánica cuántica y la relatividad general. Quizá el problema de la constante cosmológica nos esté indicando el camino hacia otra revolución en nuestra descripción del mundo físico, una revolución que incluya como elemento integrador la gravedad cuántica. En ausencia de dicha teoría, tan sólo nos queda especular sobre cuál podría ser la solución del problema de la constante cosmológica.

No conocemos por ahora ningún principio de simetría que imponga que el vacío no debe gravitar, es decir que la constante cosmológica sea exactamente cero. Sin embargo, es posible que la futura teoría de la gravitación cuántica incluya un principio de estas características. En ese caso, ¿en qué consiste la constante cosmológica que han detectado recientemente los cosmólogos? Los físicos teóricos creemos que en su evolución el universo ha pasado por una serie de fases en las que las propiedades microscópicas de la materia han cambiado, conforme su temperatura disminuía debido a la expansión del universo. Por ejemplo, además de la recombinación de los átomos y el desacoplo de los fotones responsable del fondo de microondas, sabemos que en el universo primitivo se formaron los núcleos más ligeros a partir de pro-

[1] El estado de mínima energía de un sistema cuántico se denomina el vacío de la teoría, y corresponde a un estado sin partículas, de ahí el nombre de vacío.

tones y neutrones, muy poco después del desacoplo de los neutrinos. Más aún, creemos que una pequeña fracción de segundo despúes del Big Bang, el universo sufrió una transición de fase por la cual el plasma de quarks y gluones se condensó en bariones (estados ligados de quarks y gluones, como protones y neutrones). De esta transición no tenemos por ahora ninguna evidencia observacional. A energías más altas, se cree que el universo sufrió la transición electrodébil, por la que las partículas que conocemos adquirieron masa a través del mecanismo de Higgs. Los aceleradores de partículas actuales están explorando esta escala de energías, correspondiente a miles de veces la masa del protón. Es posible que en un futuro obtengamos información sobre esta transición que nos permita asociarla a la asimetría materia-antimateria observada en el universo actual. A energías aún mayores (15 órdenes de magnitud mayor que la energía asociada a la masa de un protón), se especula sobre la posibilidad de que las interacciones no gravitacionales, electrodébil y fuerte, se unificaran en una sola, descrita por lo que se conoce como la teoría de gran unificación. Finalmente, a la escala de Planck se supone que los fenómenos cuánticos de la gravedad se hacen patentes y es posiblemente el escenario en el que tuvo su origen nuestro propio universo.

Todas estas transiciones de fase microscópicas llevan asociadas un cambio de vacío, en el que los grados de libertad físicos cambian de naturaleza (por ejemplo en la transición del plasma quark-gluón a bariones) o bien lo que cambia es la realización de una simetría (por ejemplo en la transición electrodébil). La descripción de dicha transición se suele hacer en términos de un parámetro de órden con un potencial efectivo, de manera que en el estado de mayor simetría (el falso vacío) existe una densidad de energía de vacío, o calor latente de la transición, no nula. Cuando la simetría se rompe, el parámetro de órden toma un valor de expectación, y la energía latente se disipa en forma de calor (algo análogo ocurre por ejemplo en la transición de hielo a agua). Se cree que a lo largo de la evolución del universo, éste ha ido descendiendo una sucesión de falsos vacíos, asociados a cada una de las transiciones de fase arriba enumeradas, hasta llegar al estado actual. Es perfectamente posible que la actual constante cosmológica sea en realidad la densidad de energía de un falso vacío asociado a una transición de fase desconocida. Quizá en un futuro el universo atraviese una última transición de fase y acabe en el verdadero vacío, allí donde la constante cosmológica sea realmente cero, si así lo dicta la teoría cuántica de la gravedad. Esta plausible especulación nos sugiere que debemos ser cautos a la hora de augurar un futuro en el que las galaxias, debido a la expansión acelerada, se alejen tanto unas de otras que no quede más que una por horizonte, en un universo extraordinariamente frío, como ocurriría en presencia de una verdadera constante cosmológica. Es posible que dentro de miles de millones de años el universo entre otra vez en una fase de deceleración, e incluso que colapse en un futuro aún más lejano, pero esto no son más que razonables especulaciones.

Independientemente de lo especulativo que sea como explicación de la actual constante cosmológica, la idea de un falso vacío con una densidad de energía finita no es totalmente descabellada. De hecho, si las observaciones recientes de anisotropías del fondo de radiación lo confirman, es posible que tengamos en estos momentos indicios de al menos

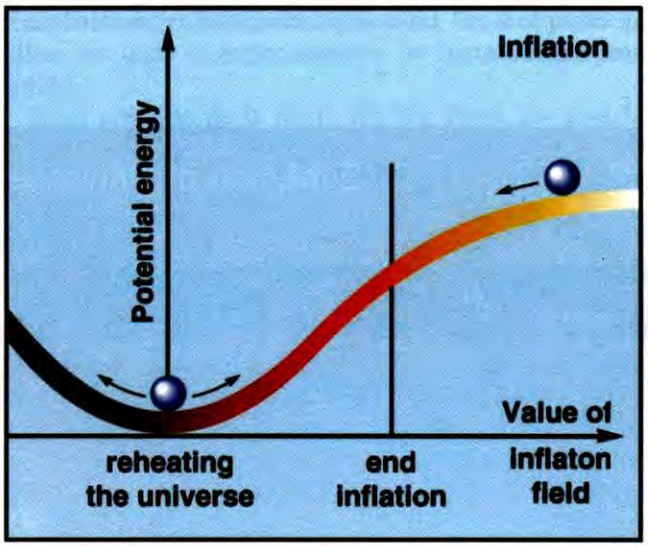


Figura 3. El campo del inflatón puede ser descrito como una bola que rueda en un cuenco. Durante inflación, la densidad de energía es aproximadamente constante, promoviendo la fenomenal expansión del universo. Cuando la bola empieza a oscilar alrededor del fondo del cuenco, la inflación acaba y su densidad de energía se convierte en partículas relativistas. En algunos casos, las oscilaciones coherentes del inflatón pueden generar una producción resonante de partículas que acaban termalizando. Al proceso de conversión de la energía potencial del inflatón en energía cinética de las partículas se conoce como el recalentamiento del universo.

una de estas transiciones de fase, asociada a la llamada inflación cosmológica, un periodo del universo primitivo dominado por una densidad de energía aproximadamente constante, anterior al menos a la bariogénesis y a la nucleosíntesis primordial. La inflación cosmológica podría ser responsable de la expansión acelerada del universo que dió lugar a secciones espaciales que son esencialmente planas (esto es, Euclídeas), así como a la enorme homogeneidad del universo observable. Aún desconocemos la naturaleza física del campo responsable de dicho periodo inflacionario. Por ahora lo único de que disponemos es de una descripción efectiva en términos de un campo escalar, el inflatón, que dió lugar a un crecimiento cuasi-exponencial de nuestra región del universo. Esta idea en apariencia tan sencilla fué propuesta en 1980 por Alan Guth, y más tarde desarrollada por Andrei Linde y otros, para explicar la extraordinaria homogeneidad y planitud de las secciones espaciales del universo actual. En el contexto de la teoría del Big Bang, tanto la homogeneidad como la planitud observada estaban a muchos órdenes de magnitud de los valores predichos por la teoría. En concreto, la curvatura de las secciones espaciales está relacionada, a través de las ecuaciones de Einstein, con el ritmo de expansión y la distribución de materia. En presencia de materia ordinaria (relativista o no), una pequeña desviación respecto a secciones exactamente planas crece rápidamente con la expansión del universo. Poniendo números, para que hoy en día observemos un universo esencialmente plano, sería necesario que en la época de la nucleosíntesis primordial (la era más antigua de la que tenemos evidencia observacional indirecta) la desviación respecto a secciones exactamente planas debería ser menor que una parte en 10^{17}. Este ajuste fino está relacionado con un problema de condiciones iniciales: para

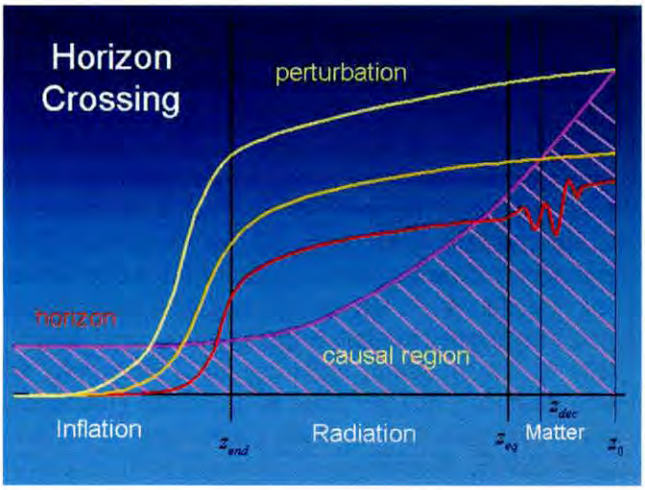


Figura 4. Las perturbaciones de la métrica generadas durante inflación mantienen su amplitud constante fuera del horizonte, hasta que vuelven a entrar, durante la época de la materia o de la radiación. El momento en el que entran depende sólo de su longitud de onda. Una vez dentro del horizonte causal, los bariones caen en estos pozos de potencial y sufren una fase de compresión hasta que la presión de radiación actúa como fuerza restauradora, induciendo oscilaciones acústicas.

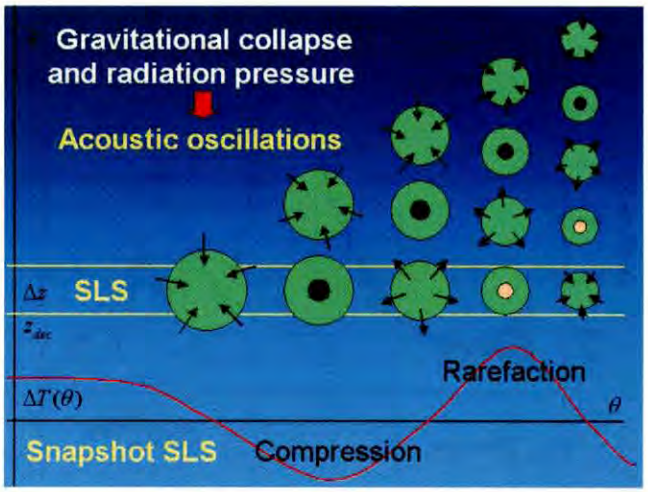


Figura 5. La estructura de picos que observamos en el espectro angular de las anisotropías del fondo de radiación son un reflejo de las oscilaciones acústicas que sufre el plasma cuando las perturbaciones de la métrica entran en el horizonte antes del desacoplo de los fotones.

que observemos hoy lo que observamos sería necesario que el universo empezara de una manera muy especial.

Lo mismo ocurre con la homogenidad a gran escala. Ya hemos comentado cómo los catálogos de galaxias las muestran distribuídas en cúmulos y supercúmulos, y cómo a enormes escalas (del órden del tamaño del universo observable, unos 20 mil millones de años luz de diámetro), la materia está distribuída de forma homogénea. Más aún, el fondo de radiación de microondas predicho por la teoría del Big Bang debería presentar pequeñas anisotropías que correspondan a las perturbaciones en la densidad de materia que más tarde darán lugar, por colapso gravitacional, a la estructura a gran escala. Las observaciones recientes indican que el fondo de radiación es extraordinariamente isótropo: la temperatura de cuerpo negro del fondo proviniente de dos puntos distintos del cielo no difiere más que una parte en 100,000. Pues bien, según la teoría del Big Bang, esto es imposible, debido a la existencia de horizontes: la luz no puede recorrer más que una cierta distancia desde el origen del universo. El horizonte asociado al momento del desacoplo de los fotones, responsables del fondo de radiación cósmica, subtiende hoy en día en el cielo un círculo de aproximadamente un grado de diámetro. Por tanto, dos puntos separados más de un grado en el cielo estaban desconexos causalmente en el momento del desacoplo, luego ¿cómo es posible que presenten todos la misma temperatura con diferencias del órden de unas partes en 100,000? Vuelve a ser un problema de condiciones iniciales. La única explicación es que algún fenómeno hizo que dichas regiones estuvieran en realidad en contacto causal en el origen del universo y por tanto a la misma energía. Esto es precisamente lo que propone el paradigma inflacionario.

Sin embargo, lo que ha hecho de la idea de inflación un nuevo paradigma no es la posible resolución de los problemas de condiciones iniciales de la teoría del Big Bang, sino la predicción de que inflación genera un espectro característico de perturbaciones de la métrica a partir de sus propias fluctuaciones cuánticas. Dichas perturbaciones actúan como potenciales gravitatorios, responsables tanto de las anisotropías del fondo de radiación como de las inhomogeneidades que más tarde darán lugar a la estructura a gran escala. El inflatón genera perturbaciones en la métrica que son de tipo escalar (que darán lugar a través de las ecuaciones de Einstein a perturbaciones de densidad) y tensor (es decir, ondas gravitacionales). Debido a que la densidad de energía de vacío del inflatón es muy aproximadamente constante y que éste evoluciona muy lentamente, la amplitud de las perturbaciones es aproximadamente constante, independientemente de la longitud de onda de la perturbación. Esto corresponde a un espectro de fluctuaciones que es aproximadamente invariante de escala (la misma amplitud para toda longitud de onda). Las pequeñas desviaciones respecto a invariancia de escala exacta contienen información sobre el potencial del inflatón y puede que en un futuro nos ayude a distinguir un modelo inflacionario de otro, o incluso a descartar modelos. Más aún, dado que una sola función (la densidad de energía del inflatón) es responsable tanto de las perturbaciones escalar como de las tensor, sus amplitudes están relacionadas. Si en un futuro no muy lejano se detectara el espectro de ondas gravitacionales provinientes de inflación, se podría testar esta relación entre las amplitudes y así comprobar si es consistente con las predicciones de inflación. Por otra parte, el paradigma inflacionario predice que las perturbaciones para cada longitud de onda se comportan como un campo aleatorio cuya amplitud sigue una estadística gausiana. Estas dos signaturas tan características han sido confirmadas tanto en las anisotropías del fondo de radiación como en la distribución de materia (galaxias) a gran escala. Mientras que la amplitud de las perturbaciones escalares de densidad depende de la evolución lenta del inflatón, la de las perturbaciones tensor sólo depende de la densidad de energía durante inflación. Aún no ha sido observado el fondo de ondas gravitacionales proviniente de inflación, pero si la escala de energía es suficientemente grande (del órden de la escala de gran unificación) es posible que dicho fondo sea detectado en un futuro próximo en el espectro angular de las anisotropías en la polarización del fondo de radiación, que

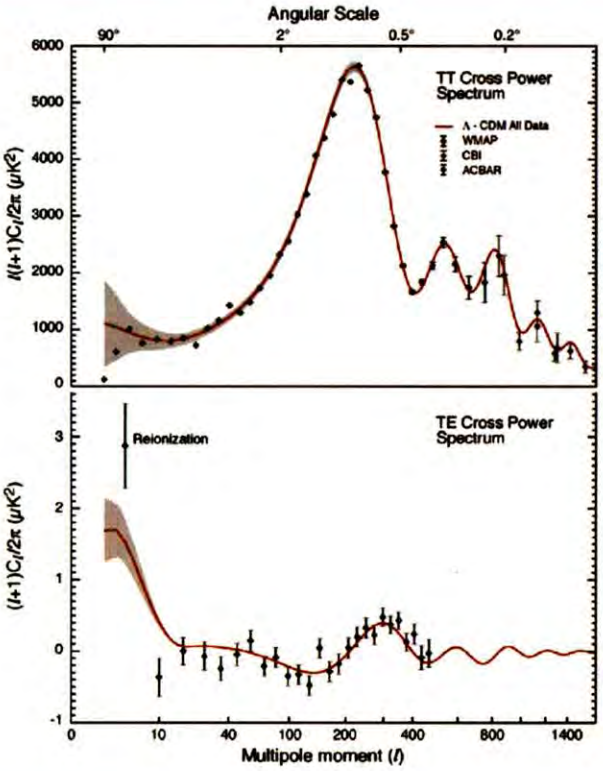


Figura 6. La figura superior muestra el espectro de potencias angular de las anisotropías en la temperatura observadas por el satélite WMAP. La figura inferior muestra las correlaciones cruzadas temperatura-polarización como función del multipolo. Ambas son comparadas con las predicciones de inflación (curvas rojas contínuas). Las franjas grises corresponden a la variancia cósmica, o el error intrínseco debido a nuestra posición en el cielo.

medirá con enorme precisión el satélite Planck Surveyor de la ESA.

Además, la idea de inflación es consistente con la observación reciente de oscilaciones acústicas en el patrón de fluctuaciones de temperatura y polarización del fondo de radiación. El paradigma inflacionario predice que, debido a la expansión exponencial, las perturbaciones de la métrica adquieren longitudes de onda mayores que el horizonte causal durante inflación y que más tarde entrarán otra vez dentro del horizonte durante la época de la materia o de la radiación. Lo que determina cuándo vuelven a entrar es su longitud de onda, ya que lo harán sólo cuando el horizonte, que crece más rápidamente que el tamaño del universo, sea del órden de la longitud de onda de la perturbación. Antes de la recombinación y del desacoplo de los fotones, los bariones y los fotones forman un plasma fuertemente acoplado debido a la interacción electromagnética. Los bariones caen en los pozos de potencial creados por las perturbaciones de densidad, comprimiendo el plasma hasta que la presión de radiación actúa como fuerza restauradora, induciendo así oscilaciones acústicas, verdaderas ondas de presión en el plasma. Ahora bien, como todas las perturbación de una misma longitud de onda entran *simultáneamente* dentro del horizonte, la materia que siente esta perturbación (en concreto los bariones y los fotones) estará en fase, independientemente de su posición en el espacio. Las perturbaciones con longitudes de onda menores que el tamaño del horizonte en el momento del desacoplo entraron dentro del horizonte antes y por tanto indujeron oscilaciones que en el momento del desacoplo habían sufrido ya varias fases de compresión y rarefacción. Estas perturbaciones corresponden a fluctuaciones de temperatura que subtienden separaciones angulares menores que un grado. Por otra parte, existen perturbaciones que entraron exactamente en el momento del desacoplo y por tanto no les ha dado tiempo a los bariones a completar una oscilación y se encuentran en la fase de compresión. Estas corresponden a fluctuaciones en la temperatura que subtienden en el cielo aproximadamente un grado de separación angular. Finalmente, existen perturbaciones, cuya longitud de onda es mayor que el horizonte en el desacoplo, que entraron después y que por tanto no presentan el fenómeno de las oscilaciones acústicas. Dado que el fondo de radiación es en realidad una instantánea del momento del desacoplo (la superficie de última dispersión de los fotones), podemos ver en él la huella de las oscilaciones acústicas inducidas por las perturbaciones de la métrica, en distintas fases según su separación angular.

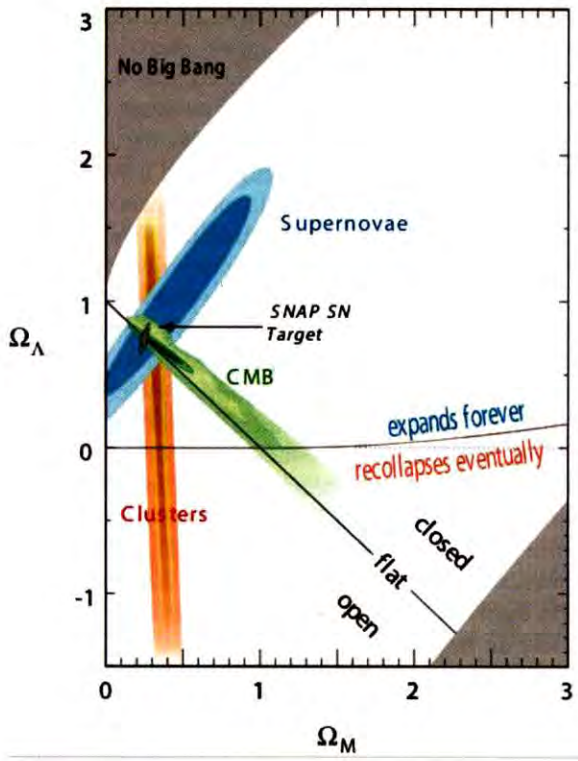


Figura 7. La evolución actual del universo depende de dos parámetros fundamentales: la densidad media de materia y la densidad de energía oscura o constante cosmológica. Sus valores producen diversos efectos. Primero, su suma nos da el contenido total de energía cósmica y determina la geometría espacial. Segundo, su diferencia caracteriza la fuerza relativa entre atracción y repulsión gravitacional, y determina cómo el ritmo de expansión depende del tiempo. Estos dos efectos han sido testados con observaciones recientes. El tercer efecto, un balance entre las dos densidades, determina el destino del universo. Los tres efectos tienen muchas combinaciones distintas. Sorprendentemente, hoy en día las observaciones parecen caer todas en una pequeña región del espacio de parámetros. En un futuro próximo, con el lanzamiento de los satélites SuperNova Acceleration Probe (SNAP) y Planck Surveyor, por parte de la NASA y de la ESA respectivamente, podremos reducir aún más la región del espacio de parámetros cosmológicos.

Tabla 1. *Los parámetros del modelo estándar cosmológico.* El modelo estándar de la Cosmología tiene del órden de 20 parámetros diferentes, necesarios para describir la geometría del espacio-tiempo, el contenido de materia y energía, y el espectro de perturbaciones de la métrica. Incluímos aquí el valor de los parámetros más relevantes (con errores correspondientes a una desviación estándar, salvo indicación expresa), determinados a partir de las medidas de WMAP, así como los errores porcentuales con los que las medidas del futuro satélite Planck permitirá determinarlos. El ritmo de expansión está escrito en unidades de $H = 100\ h$ km/s/Mpc.

Cantidad física	símbolo	WMAP	Planck
Densidad total	Ω_0	1.02 ± 0.02	0.7%
Materia bariónica	Ω_B	0.042 ± 0.002	0.6%
Constante cosmológica	Ω_Λ	0.71 ± 0.04	0.5%
Materia oscura fría	Ω_M	0.25 ± 0.04	0.6%
Materia oscura caliente (neutrinos)	$\Omega_\nu h^2$	<0.006 (95% c.l.)	1%
Suma de masas de neutrinos	$\Sigma\, m_\nu$ (eV)	<0.45 (95% c.l.)	1%
Cociente barión-fotón	$\eta \times 10^{10}$	6.1 ± 0.3	0.5%
Cociente barión-materia oscura	Ω_B/Ω_M	0.17 ± 0.01	1%
Curvatura espacial	Ω_K	<0.02 (95% c.l.)	0.5%
Temperatura del fondo radiación	T_0 (K)	2.725 ± 0.002	0.1%
Ritmo de expansión	H_0 $(km/s/Mpc)$	71 ± 3	0.5%
Edad del universo	t_0 (Gyr)	13.7 ± 0.6	0.5%
Época del desacoplo	t_{dec} (kyr)	379 ± 8	0.5%
Época de la reionización	t_{reion} (Myr)	180 ± 100	5%
Amplitud espectral	A	0.833 ± 0.085	0.1%
Índice espectral ($k_0 = 0.05$ Mpc^{-1})	n_s	0.98 ± 0.03	0.2%
Variación del índice espectral	$dn_s/d \ln k$	-0.021 ± 0.018	0.5%
Razón tensor-escalar	r	<0.71 (95% c.l.)	5%
Parámetro de reionización	r	0.17 ± 0.04	5%

Las primeras observaciones de las anisotropías del fondo de microondas, hechas por COBE, no tenían suficiente resolución angular como para distinguir dicho patrón en las fluctuaciones de temperatura. Sin embargo, las observaciones recientes hechas por el satélite WMAP, con resolución de 10 minutos de arco, han mostrado sin lugar a dudas la existencia de oscilaciones acústicas, tanto en las anisotropías de temperatura del fondo de radiación como en el espectro de polarización de dicho fondo. La correlación entre el espectro angular de anisotropías en la temperatura y la polarización constituye otra prueba más de que el paradigma inflacionario describe de forma consistente las observaciones cosmológicas, no sólo a nivel de la métrica homogénea e isótropa, sino además al de las perturbaciones de primer órden. Más aún, el paradigma inflacionario predice un único tipo de fluctuaciones, luego todas las componentes del plasma primordial anterior a la recombinación (bariones, fotones, materia oscura y neutrinos) estan relacionados entre s\ii; es decir, no hay perturbaciones de entropía (o densidad de número), todas son adiabáticas. Esta es una signatura característica de inflación. Si la perturbación fuera de entropía, ésta induciría un espectro angular de fluctuaciones de temperatura y polarización defasado exactamente un cuarto de oscilación, por lo que la posición de los picos acústicos estarían desplazados respecto de lo que se observa en el espectro angular. Las medidas de las anisotropías hechas por el satélite WMAP sugieren que las perturbaciones son adiabáticas, como predice el paradigma de inflación.

Lo que resulta sorprendente es que una idea en principio tan sencilla sea capaz de generar tanta estructura y de hacer predicciones concretas que una década más tarde han sido ampliamente confirmadas por las observaciones. Aún no entendemos por qué el paradigma inflacionario funciona tan bien, cuando aún desconocemos prácticamente todo sobre el mecanismo que lo genera, es decir acerca de la naturaleza del campo responsable, de la escala de energía a la que ocurrió, etc. Un nuevo paradigma científico suele crear una estructura teórica en la que plantearse nuevas preguntas. En este sentido el paradigma inflacionario es un buen ejemplo; en el contexto de inflación podemos preguntarnos sobre el origen de la radiación y la materia que permea el universo. Desde el punto de vista de la inflación, la gran explosión de la teoría del Big Bang correspondería precisamente con ese momento al final del periodo inflacionario en el que la energía latente (o potencial) del inflatón se convirtió en calor (o radiación), en un proceso conocido como el recalentamiento del universo. A partir de ese momento nuestro universo siguió expandiéndose como predice la teoría del Big Bang. Es más, es probable que durante el recalentamiento se dieran las condiciones necesarias para generar la asimetría materia-antimateria. Actualmente se está investigando sobre los detalles del proceso de recalentamiento pues podría dar signaturas características (producción de campos magnéticos, ondas gravitacionales o incluso defectos topológicos) que pudieran ser observadas en un futuro no muy lejano, con lo que tendríamos acceso a una nueva ventana al universo primitivo.

Sin embargo, quizá lo más interesante desde el punto de vista filosófico sea la posibilidad de hacernos preguntas en el contexto de inflación sobre el origen del universo y sobre lo singular de nuestra existencia en él. Según el paradigma inflacionario, la región del universo que nos ha tocado habitar es una pequeña isla cuasi-homogénea y plana en un metauniverso en expansión eterna y donde regiones muy alejadas de nosotros pueden llegar a ser arbitrariamente densas y curvas. La mayor parte del universo continúa inflándose exponencialmente incluso hoy en día, creando nuevos universos –causalmente desconexos del nuestro– que más tarde terminarán su proceso inflacionario y sufrirán el recalenta-

miento, como hizo el nuestro hace 13 mil millones de años, en un Big Bang exactamente análogo al nuestro. Es posible incluso que las leyes de la Física en estos universos desconexos sea distinta de la que conocemos en el nuestro. Quizá las constantes fundamentales, incluso los grupos de simetría remanentes, sean distintos. Posiblemente hasta la constante cosmológica –la energía de vacío– sea distinta. Aún desconocemos por qué las constantes fundamentales toman los valores concretos que medimos en el laboratorio y en el universo. Podría ocurrir que la razón última de dichos valores, y en particular del valor de la constante cosmológica, sea porque si no fuera así, no podríamos existir para medirlos. Por desgracia, estos argumentos antrópicos son poco predictivos, e insatisfactorios desde un punto de vista puramente científico. Es de esperar que en un futuro no muy lejano, una teoría cuántica de la gravedad nos permita no solo dar un origen fundamental al paradigma inflacionario, sino una explicación plausible al problema de la constante cosmológica actual.

Bibliografía

[1] ABBOTT, L. 1988 The mystery of the cosmological constant. *Scientific Am.* May, pp. 106-113.

[2] BRUSH, S. G. 1992 How cosmology became a science. *Scientific Am.* August, pp. 34-40.

[3] FREEDMAN, W. L. 1992 The expansion rate and size of the universe. *Scientific Am.* November, pp. 54-60.

[4] GUTH, A. H. 1997 *The inflationary universe*. Reading: Perseus Books.

[5] HENRY J. P., *et al.* 1998 The evolution of galaxy clusters. *Scientific Am.* December, pp. 52-56.

[6] HOGAN, C. J., *et al.* 1999 Surveying space-time with supernovae. *Scientific Am.* January, pp. 46-51.

[7] KRAUSS, L. M. 1999 Cosmological Antigravity. *Scientific Am.* January, pp. 53-59.

[8] LINDE, A. D. 1994 The self-reproducing inflationary universe. *Scientific Am.* November, pp. 32-39.

[9] LINDE, A. D. 1990 *Particle Physics and Inflationary Cosmology*. New York: Harwood Academic Press.

[10] PEEBLES, P. J. E., SCHRAMM, D. N., TURNER, E. L. & KRON, R. G. 1994 The evolution of the universe. *Scientific Am.* October, pp. 53-57.

[11] WEINBERG, S. 1977 *The first three minutes*. New York: Basic Books.

[12] Wilkinson Microwave Anisotropy Probe home page, http://map.gsfc.nasa.gov/.

Juan García-Bellido
es profesor en el Dpto. de Física Teórica. Univ. Autónoma de Madrid.

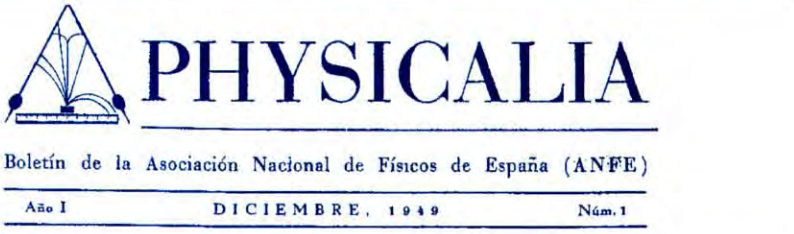
Cartas al Director

El Emblema de los Físicos

Acabo de leer el número 3 de nuestra revista y en su página 4, viene una nota sobre el emblema del físico que creo es incompleta. Acompaño un nota aclaratoria.

Cuando fundé ANFE, Asociación Nacional de Físicos de España, pensé que era conveniente tener un emblema. Pero diferente de los que utilizaban los cuerpos de Ingenieros, con ramas de laurel etc.

Se me ocurrió utilizar símbolos de las unidades físicas, pues yo estaba ya en íntimo contacto con la Comisión Internacional de Unidades del Bureau Internacional des Poids et Mesures en Sevres, Paris, del que sería miembro activo durante muchos años.


PHYSICALIA

Boletín de la Asociación Nacional de Físicos de España (ANFE)

Año I DICIEMBRE, 1949 Núm. 1

El emblema lo diseñé y dibujé en el Instituto de Óptica, donde trabajaba. Lo utilizamos en el papel de cartas y, después, apareció en el primer número de nuestra revista Physicalia, del que acompaño una fotocopia.

Allí aparece un péndulo en sus dos posiciones extremas, y entre ellas, un metro. Son los elementos de la física clásica que representan las dos unidades elementales más antiguas. Dentro de este marco aparece el esquema de la desintegración del radio en campo magnético, uno de cuyos rayos gamma choca con un núcleo produciendo un electrón y positrón.

Este esquema dejó de utilizarse cuando la Asociación Nacional de Físicos fue sustituida por el Colegio de Físicos.

Leonardo Villena