

La búsqueda del principio, un camino sin fin

J. G. Sánchez León

En 1914 el aventurero Ernest Shackleton puso un anuncio: "Se buscan hombres para peligroso viaje, salario reducido, frío penetrante, largos meses de completa oscuridad, constante peligro, dudoso regreso sano y salvo; en caso de éxito, honor y reconocimiento". El objeto era atravesar el Polo Sur. Aunque fracasó la expedición, se considera una de las aventuras épicas más grandiosas del siglo XX. Justo 100 años después, medio centenar de científicos han realizado un experimento tras pasar varios inviernos en el polo Sur, en la más completa oscuridad, el BICEP2, cuyo resultados, de confirmarse, nos aproximarán al momento en que se inició nuestro universo como nadie lo había hecho hasta ahora. Mientras tanto, varios miles de ingenieros y científicos preparan el gran colisionador de hadrones (LHC) para realizar una nueva tanda de experimentos en 2015, con la esperanza de resolver la encrucijada que quedó tras la detección del bosón de Higgs. Ambos experimentos deberían constituir un avance en la búsqueda de una teoría final que explique cómo hemos llegado hasta aquí, pero las sorpresas encontradas abren nuevos interrogantes.

En 1914, the explorer Ernest Shackleton placed an ad: "Men sought for a dangerous trip, low pay, penetrating cold, long months of complete darkness, constant danger, doubtful you will return save and sound; in the event of success, honor and recognition". The goal was to cross the South Pole. Although the expedition failed, it is considered to be one of the greatest epic adventures of the 20th century. Exactly 100 years later, some 50 scientists have completed an experiment – the BICEP2 – after spending several winters on the South Pole in total darkness. The results of this experiment, if confirmed, will reveal like nothing else has before the instant when our universe was born. Meanwhile, several thousand engineers and scientists are preparing the Large Hadron Collider (LHC) to carry out a new round of experiments in 2014, with the hope of solving the mystery remaining after detection of the Higgs boson. Both experiments should further the search for a final theory that explains how we have gotten where we are, but the surprises found on the way will open up new question marks.

EL MODELO ESTÁNDAR

Durante los años 60 y principios de los 70 del siglo XX, se consiguió elaborar una teoría que se denomina **el modelo estándar (ME)** (Figura 1) en el que se dedujo que todo cuanto conocemos está formado por dos clases de partículas: quarks y leptones, y sus correspondientes antipartículas, agrupadas en tres familias que interactúan entre sí por medio de tres tipos de fuerza (electromagnética, nuclear fuerte y electrodébil) que son transmitidas por partículas mediadoras llamadas bosones.

Algunas de las partículas del modelo ya se conocían (por ejemplo, electrones y fotones) y otras se detectaron empleando aceleradores de partículas gigantes, haciendo chocar electrones o protones a energías altísimas (Figura 2). El ME también incluye a los neutrinos. Estos nos llegan del sol, de explosiones de supernovas, de reactores nucleares, de desintegraciones radiactivas, incluso unos pocos proceden del propio *Big Bang*. Cada segundo nos atraviesan billones con más facilidad

que la luz que atraviesa una ventana transparente. Para detectarlos fue necesario disponer de detectores muy sensibles enterrados a cientos de metros de profundidad. El último detector de neutrinos es el *IceCube*, situado en el Polo Sur, que utiliza un kilómetro cúbico de hielo como volumen de detección.

El ME explicaba que, de los centenares de tipos de partículas observadas (electrones, protones, mesones, etc.), muy pocas eran elementales (no divisibles): sólo las de la Figura 1; el resto se podía obtener por combinación de éstas. Por ejemplo, el electrón era una auténtica partícula elemental, y sin embargo protones y neutrones están compuestos de dos tipos de quarks (el *quark up* o arriba y el *quark down* o abajo).

¿QUÉ FUE DEL BOSÓN DE HIGGS?

Aunque a principios de los 90 del s. XX se habían detectado todas las partículas del ME, quedaba un cabo suelto: ¿Por qué unas partículas como el fotón y algunos gluones sólo



J. GUILLERMO SÁNCHEZ LEÓN

es físico, ingeniero técnico de Minas y doctor en Matemáticas. Trabaja en Enusa desde 1983 y es profesor asociado de la Universidad de Salamanca. Ha publicado más de 100 artículos y ponencias, varios sobre Astronomía, algunos disponibles en <http://diarium.usal.es/guillermo>

van a la velocidad de la luz, mientras que otras van a cualquier velocidad intermedia? Esto se conoce como el problema de la masa. Una explicación fue lo que ahora se denomina **mecanismo Brout-Englert-Higgs (BEH)**, según el cual el espacio está lleno de un campo con el que algunas partículas interactúan -las que tienen masa como los quarks- y otras no (como el fotón) [según los expertos: el mecanismo BEH se refiere específicamente a la generación de masas para los bosones gauge, $W^\pm$, y Z a través de la simetría electrodébil, mientras que los leptones y quarks toman su masa del campo de Higgs, en este caso por medio de interacciones de Yukawa]. Peter Higgs dedujo en 1964 que la existencia del mecanismo BEH podría ser verificado por medio de un bosón. El prestigioso físico teórico Gerardus 't Hooft lo bautizó con el nombre de bosón de Higgs.

En la década de los 80 del siglo XX la Organización Europea para la Investigación Nuclear o CERN decidió construir un gran acelerador, el LHC, cuyo propósito principal era detectar este bosón. Se aprovecharía un túnel de 27 km de diámetro, entonces ocupado por otro gran acelerador, el LEP. Los norteamericanos decidieron construir otro mucho mayor, de 87 km, pero abandonaron el proyecto en 1993, con las obras ya iniciadas.

El proyecto tuvo éxito, aunque con algún sobresalto, como una importante avería que retrasó el programa de

El bosón de Higgs era una indicación clara de que el campo de Higgs (o mejor el BEH) existía, y de esta manera se explicaba por qué los quarks, entre otras partículas, tenían masa. Entonces, ¿nuestra masa viene del campo de Higgs? La respuesta es: sólo el 1 %. Por ejemplo, para una persona que pese 80 kg el campo de Higgs explica 0,8 kg, lo correspondiente a los quarks que forman los átomos de lo que estamos hechos. También están los electrones, pero su contribución a la masa es irrelevante. Ahora bien, los quarks son una parte muy pequeña del total de los protones y neutrones que forman los núcleos atómicos; el protón está formado por dos *quark u* y un *quark d*; el neutrón por dos *quark d* y un *quark u*. Según la Figura 1, la masa del *quark u* es 2,4 MeV y la del *quark d* 4,8 MeV, por tanto la masa de los quarks que forman un protón es $2 \times 2,4 + 4,8 = 9,6$ MeV; pero sabemos que un protón tiene casi 1.000 MeV (o 1 GeV). ¿De dónde procede la diferencia? La aportan los gluones, *g*, que mantienen unidos a los quarks, y los fotones. Estas partículas no interaccionan con el campo de Higgs. Sin embargo, si no existiese este campo, los electrones irían a la velocidad de la luz y no se habrían podido formar los átomos.

Tres generaciones de la materia (fermiones)				
	I	II	III	
masa →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
carga →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
espin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	arriba	encanto	cima	fotón
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d abajo	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s extraño	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b fondo	0 0 1 g gluón
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν _e neutrino electrónico	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν _μ neutrino muónico	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν _τ neutrino tauónico	91.2 GeV 0 0 1 Z ⁰ bosón Z
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electrón	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muón	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tauón	80.4 GeV ±1 1 W [±] bosón W
Leptones				Bosones de gauge

una masa menor de esos 126 GeV (de 110 a 115 GeV). Aún se conserva la esperanza de que la nueva tanda de experimentos en el LHC previstos para 2015, en los que la energía del colisionador pasará de 8 TeV a 14 TeV (la máxima prevista), sea capaz darnos indicios de estas partículas supersimétricas o de otras. Si no lo hace el LHC, supondrá una decepción, pues habrá confirmado la existencia del bosón H, pero nada más; la ventana a la nueva física que muchos esperaban no se habrá abierto. Se requerirán energías muy superiores a las del LHC (no se sabe cuánta) para observar nuevas partículas. El éxito del ME es que es capaz de explicar el comportamiento de la materia ordinaria desde pocos microsegundos después del inicio del universo. Se necesitarían energías mucho mayores para ir más atrás en el tiempo, llegar a un modelo que explique la materia oscura y la energía oscura, a la que nos referiremos más adelante.

Parecía inverosímil ir más atrás en el tiempo y, sin embargo, en marzo de 2014 se publicaron los resultados de un experimento, el BICEP2, que nos retrotrae en el tiempo más atrás que el modelo estándar. Este experimento está relacionado con la otra gran fuerza presente en inicio del universo, la gravedad, y con la otra gran teoría, la general de la relatividad (TGR) de Einstein.

68 NUCLEAR ESPAÑA octubre 2014

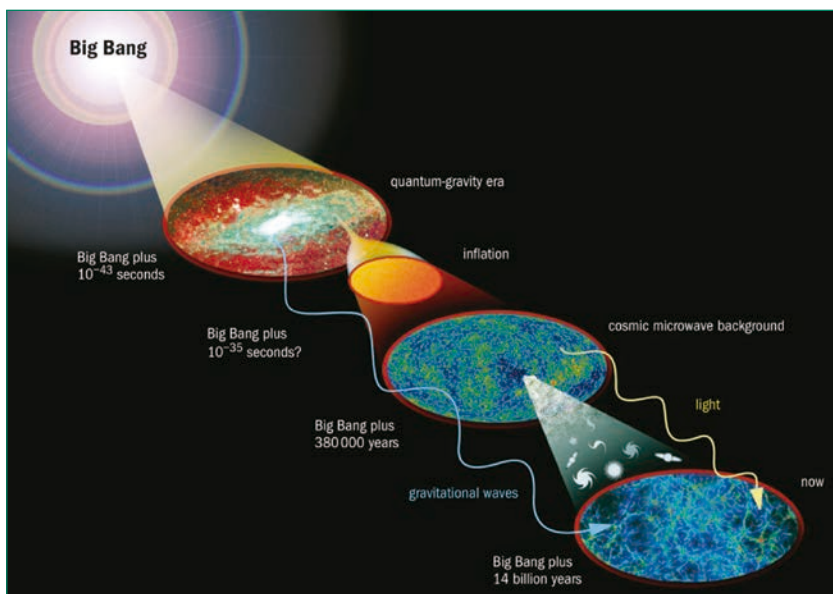


Figura 3. El Universo tras su nacimiento, según el modelo inflacionario, experimentó un proceso de expansión acelerada donde predominó el efecto de la gravedad. Su efecto, en forma de ondas gravitacionales, afectaría al fondo cósmico de microondas que corresponde a las ondas que nos llegan y que corresponde al momento (380.000 años después del Big Bang) en que el Universo se hizo transparente a la radiación electromagnética (Fuente: NASA).

una pelota de golf, o quizás en menos que el de un átomo. Desde esa situación casi inicial, el universo se empezó a expandir. Decimos casi inicial ya que las leyes de la Física que conocemos establecen un límite al tiempo mínimo que podríamos llegar a medir: es lo que se conoce como el tiempo de Planck, cuyo valor es 5×10^{-44} segundos (5 precedido de 44 ceros). Por debajo de ese valor, el tiempo pierde su sentido: no hay flecha del tiempo. Esa expansión no tuvo nada que ver con una explosión convencional, pues implica la expansión del espacio mismo. A medida que el universo se expandía, el espacio se iba creando, y bajo esta premisa carece de sentido pensar en un superátomo que explota en un espacio inmensamente vacío. Con los datos más recientes (los del satélite Planck) la expansión del universo se inició hace 13.800 millones de años, y desde entonces continúa. Varios experimentos confirman que es cada vez más rápida, lo que nos lleva a otro problema: tiene que existir una energía que empuja esa expansión, lo que se llama *energía oscura*, cuyo valor es tres veces mayor que la masa oscura, que a su vez es cuatro o cinco veces mayor que la materia visible.

La idea de *Big Bang* es aceptada por la práctica totalidad de los cosmólogos. Sin embargo, como ya hemos dicho, ese fenómeno no explica el origen del universo. Además, hay algunos hechos que inquietan a los cosmólogos. He aquí los más conocidos:

Se observa que el universo a gran escala la distribución de masa y ener-

gía es casi homogéneo. Esta homogeneidad es casi perfecta en el caso de la luz que tiene su origen en inicio del universo, en lo que se conoce como fondo cósmico de microondas, al que más adelante nos referiremos. Esta luz que nos llega de los confines del universo tiene una longitud de onda de 1,9 mm; no importa en qué dirección miremos. Hay partes del universo de las que la luz no nos ha llegado aún, y otras de las que nunca nos llegará, pues se alejan de nosotros a más velocidad que la luz (la teoría de la relatividad establece que nada puede ir más rápido que la luz, con una excepción: el propio espacio), y sin embargo vemos que esa parte del universo de la que nos llega luz por primera vez es similar al universo que conocemos. Es lo que se conoce como «problema del horizonte». Para que esto sea así, parece inevitable que en el pasado todo el universo estuviera interconectado. Además el orden debía regir. La necesidad de orden surge de la ley de la entropía, que dice que el universo considerado como un sistema tiende al desorden y por tanto cualquier momento del pasado era más ordenado que el instante siguiente. Esta es la explicación de por qué el tiempo tiene una flecha y las cosas van del pasado al futuro. Esto, que nos parece tan natural, no se entendería sin un universo que surgiese del orden, y eso es un gran misterio.

El llamado modelo inflacionario -propuesto por Alan Guth, Andrei Linde y otros físicos rusos- postula

que en los primeros instantes todo el universo estaba interconectado y en equilibrio: se trataba de la *era de la gravedad cuántica*, una frase para describir algo que no sabemos. Entonces se produjo una expansión extraordinariamente violenta, a una velocidad muy superior a la de la luz, en el denominado *periodo inflacionario*. Aceptando este hecho, el problema de la homogeneidad queda resuelto.

Hay otro problema de más enjundia si cabe, lo que se conoce como el «problema de la planitud». En muchas charlas divulgativas sobre cosmología se dice que el universo es curvo. Se suele representar con un globo sobre el que se pintan puntos que -se dice- representan las galaxias, y se hincha para mostrar cómo las galaxias se expanden. En un universo curvo, como el globo, un rayo de luz podría salir de un punto y con el tiempo volvería. La conclusión es que el universo podría ser ilimitado al igual que finito. También se aprovecha el globo para representar un triángulo uniendo tres puntos: los ángulos de ese triángulo suman más de 180° . Pues bien, el universo no responde a ese modelo. Se ha comprobado, al menos hasta donde nuestros instrumentos lo permiten, que el universo es plano, o para hablar con más propiedad, tiene *geometría euclídea*. Esto significa que, si trazásemos un triángulo entre tres galaxias muy distantes, sus ángulos sumarían 180° . Aunque no podemos construir directamente el supertriángulo que antes he descrito para verificar que la suma de sus ángulos mide 180° , sí se pueden diseñar experimentos equivalentes. Por ejemplo, recurramos al modelo del globo hinchado y supongamos que en un punto del globo hay encendida una velita que representa una galaxia. La luz de la vela, para no salirse del universo -el globo-, se curvaría según la curvatura del espacio, en este caso la superficie del globo. Si estamos en las antípodas de donde está la vela, la veremos siempre; da igual hacia dónde miremos. En un universo así, veríamos una misma galaxia muy distante mirando en distintas direcciones, como si estuviésemos en un universo limitado por un espejo. Pues bien, esto no se observa. El universo es plano (o es aún mucho más inmenso de lo que imaginamos), y si encendemos una linterna y alumbramos hacia un punto del espacio, su luz se irá alejando cada vez más de nosotros, y nunca retornará. Con esta premisa, eligiendo la Tierra como nuestro particular centro del universo, éste se extendería en torno a nosotros, formando una esfera de 46.000 millones de años luz de radio. Ese es el universo observable; de más

allá de esa distancia nunca nos llegarán señales, pues se aleja de nosotros a más velocidad que la luz. Un error frecuente es creer que, puesto que el universo lleva 13.800 millones de años expandiéndose y lo hace a la velocidad de la luz, el límite del universo observable debería estar a 13.800 millones de años luz, cuando en realidad está a 46.000. La explicación es que a la velocidad de la luz hemos de sumarle la de la expansión del universo. Veamos una analogía como ejemplo: si corremos a 10 metros por segundo sobre una cinta transportadora, que representa la expansión del espacio, que va a 20 metros por segundo, en un segundo nos habremos trasladado 30 metros. Fuera del universo observable, el universo podría continuar, incluso ser infinito, lo que nos lleva al abismo. En algo infinito formado por objetos que toman valores discretos, todas las condiciones imaginables acabarán dándose: bien podría existir alguien como usted, incluso muchas versiones tuyas en las que estaría leyendo exactamente este artículo. No podrá comprobarlo, pues nunca recibirá sus señales, ya que quedan más allá del universo observable. Un universo plano, en el sentido que se ha dicho, es realmente extraño; hay muchas más formas curvas que planas. Pues bien, en una de las versiones del modelo inflacionario, la densidad del universo es la justa (densidad crítica igual a 1) como para que la curvatura sea cero y nos encontremos en un universo plano.

Tras el periodo inflacionario, el universo continuó expandiéndose más lentamente. Durante los primeros microsegundos, las partículas que forman el ME interactuaban entre ellas; se creaban y se aniquilaban. Además de la gravedad, en vez de las tres fuerzas que observamos en la actualidad, había un solo tipo de fuerza. Los quarks se agruparon, surgiendo protones y neutrones, pero los átomos continuaron siendo inestables, y el universo era opaco, pues los fotones eran absorbidos y reemitidos. Cuando el universo tuvo 380.000 años, su temperatura descendió a 3.000 Kelvin, y los átomos -entonces sólo había hidrógeno, helio y algo de litio- dejaron de ionizarse, haciéndose transparente a la radiación electromagnética (fotones de luz). Cada fotón se desplaza siguiendo una onda de una determinada longitud. La longitud de onda correspondiente a una temperatura de 3.000 Kelvin es de casi una micra. Al irse el espacio expandiendo esta misma onda se estira (si no lo ve pinte una onda sobre una superficie elástica y estírela) y ahora tienen longitud de onda de 1,9 mm, que está en el rango de las microondas y corresponde a una temperatura media próxima al cero absoluto: 2,725 K. Esta temperatura

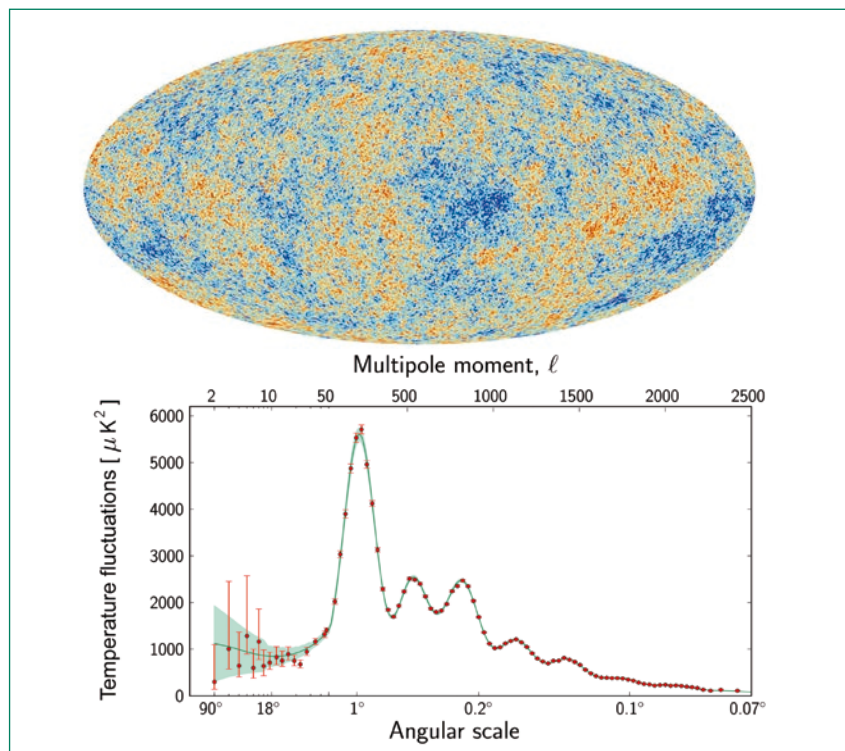


Figura 4. 380.000 años tras el Big Bang se formaron los átomos, y los fotones pudieron desplazarse sin apenas interacciones. Si miramos al cielo con un instrumento apropiado, en la actualidad estos fotones tienen una longitud de onda de 1,9 mm (en el rango de las transmisiones de UHF), que equivale a una temperatura media de 2,725 K, oscilando ligeramente en torno a este valor (aquí representado por variación de colores), según un patrón que en termodinámica corresponde a un cuerpo negro. Es lo que se conoce como "fondo cósmico de microondas" o FCM. (Mapa elaborado por el satélite Planck. Fuente ESA)

oscila ligeramente en torno a este valor y se ha comprobado que sigue una distribución de temperaturas que en termodinámica se llama cuerpo negro. Es una prueba más, que corrobora que el Big Bang existió y no es una mera elucubración teórica. Las mejores medidas han sido realizadas por el satélite Planck, que permite medir con una precisión de millonésimas de kelvin. Con menor precisión antes lo habían hecho los satélites Cobe y WMAP. El mapa del cielo midiendo esas temperaturas es lo que se denomina *fondo cósmico de microondas*, FCM o CMB (Figura 4). El FCM es la luz no visible que recibiríamos si eliminásemos todas las fuentes de luz del universo (básicamente la de las estrellas).

ONDAS GRAVITACIONALES Y EL EXPERIMENTO BICEP2

¿Es el universo inflacionario sólo una especulación, una conjetura para hacer que algunas cosas encajen? Pues puede que no, o al menos hay una predicción del modelo inflacionario (MI) que puede verificarse experimentalmente.

Según el MI, en esos primeros instantes el espacio experimentó fuertes distorsiones, generando ondas gravitacionales. Las ondas gravitacionales

surgen al aplicar la TGR a campos gravitatorios muy intensos como, por ejemplo, en estrellas de neutrones rotando sobre sí a corta distancia; hay experimentos en curso para medirlas, como el LIGO. El reto es enorme, se requiere ser capaz de detectar desplazamientos del tamaño de un átomo en varios kilómetros. Hasta ahora no se han observado directamente y, sin embargo, es posible que ya las hayamos observado indirectamente: el fondo cósmico de microondas tendría la impronta de las ondas gravitacionales primordiales en forma de polarización. Los fotones se desplazan en forma de ondas, y estas ondas pueden oscilar en más de una dirección. Este fenómeno se llama polarización; por eso empleamos gafas polarizadas, que hacen que nos lleguen solo los fotones que oscilen en un plano determinado elegido para evitar los reflejos. Las ondas gravitacionales indujeron un modo de oscilación en los electrones que afecta al modo de dispersión de los fotones que inciden sobre ellos (Figura 5). Esos fotones presentan varios modos de polarización, uno de ellos, el modo de polarización B, está directamente relacionado con la interacción entre los electrones y las ondas gravitacionales.

La longitud de onda del FCM y de los modos de polarización requeriría dis-

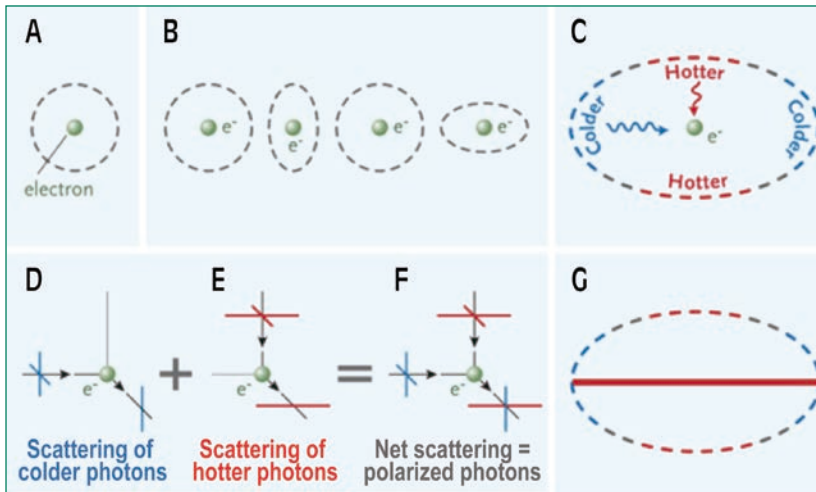


Figura 5. Las ondas gravitacionales (OG) al estirar y encoger el espacio crean patrones de polarización en el fondo cósmico de microondas (FCB). Suponga un plasma de electrones y fotones donde cada electrón ocupa el centro de una esfera de espacio vacío (A). Antes de que OG choque con la esfera ésta conserva su forma de esfera pero cuando la OG la golpea, esta se estira y se contrae con un patrón oscilante (B). En lugar de un plasma uniforme, el electrón “ve” alrededor de él un universo un poco más caliente en la dirección comprimida y un poco más frío en la dirección de estirada (C), pues los fotones de ondas más largas (D) tienen menos energía que las más cortas (E). Cuando los fotones se dispersan fuera del electrón, se polarizan, moviendo en un solo plano (líneas salientes). El patrón resultante (F) es una suma de los fotones con polarizaciones frías y calientes. Como los fotones procedentes de las regiones más calientes tienen más energía su patrón de polarización resalta (G). Ver Figura 6. Fuente: (<http://www.skyandtelescope.com/astronomy-news/direct-evidence-of-big-bang-inflation>)

poner de un satélite específicamente diseñado para ello, que sería muy costoso. Sin embargo, se ha conseguido diseñar un ingenioso experimento en tierra: el BICEP2 (Figura 6), un telescopio que detecta microondas y su polarización, empleando bolómetros a un coste razonable (unos 10 millones de dólares, mucho menor que el de un satélite, e insignificante comparado con el LHC). Ha tenido que ser ubicado en el lugar más seco de la Tierra (el hidrógeno del vapor de agua absorbe las microondas, y eso lo sabemos bien

los aficionados a la cocina rápida) que es el Polo Sur, en una montaña de unos 4 km. Allí, un grupo de intrépidos científicos aventureros han pasado aislados largas temporadas en los últimos años, aprovechando las noches polares, que duran varios meses. En marzo de 2014 publicaban los resultados donde informaban, para algunos de forma prematura, de que habían observado los modos de polarización B en unos valores coherentes con el modelo inflacionario. Algunos creen que los modos de polarización medidos por el

BICEP2 pueden ser debidos a interferencias del FCM con el polvo intergaláctico. Se están contrastando con los del satélite *Planck* y, por ahora (octubre 2014), no se ha llegado a una conclusión definitiva. Probablemente se requiera una nueva campaña de medidas, que ya está en marcha, utilizando del BICEP3. Como dijo Shackleton en su anuncio, en caso de éxito sus investigadores y los padres de MI, tendrán honor y reconocimiento. En cualquier caso la aventura al adentrarse en terrenos inexplorados es en sí mismo gloriosa.

EPILOGO

El Modelo Estándar y la Teoría General de la Relatividad son las mejores herramientas de que disponemos para explicar nuestro mundo, pero están lejos de dar una respuesta a lo que nos rodea. La mayoría de los físicos creen que debe existir una teoría fundamental que unifique y expanda esas dos teorías. Algunos de los mejores cerebros de la Física están dedicando sus esfuerzos a su búsqueda. Einstein invirtió en ello más de 30 años de forma infructuosa. Hay varias líneas abiertas (supercuerdas, teoría M, gravitación cuántica, mundos holográficos, etc.) pero parece que estamos lejos de encontrarla. ¿Por qué el mundo se rige por leyes matemáticas y por qué estas son las que son? Para resolver este problema, algunos físicos recurren a una extraña idea: el multiverso; existen infinitud de universos, y nosotros tenemos la suerte de vivir justo en el que tiene las condiciones para ello, pero existirán muchos otros por ahí. De hecho, en una de las versiones del universo inflacionario, estos universos se están creando continuamente, y quizás seamos capaces de diseñar experimentos que lo comprueben.

En la medida en que nos aproximamos más al principio surgen nuevos interrogantes que ni sospechábamos, y nada indica que esto vaya a cambiar. Como dijo en una ocasión el que fuera Secretario de Defensa estadounidense Donald Rumsfeld, refiriéndose a un tema muy diferente, “Hay cosas que desconocemos que desconocemos”.

BIBLIOGRAFIA

- Sobre el modelo estándar: “El gran acelerador de hadrones y la búsqueda de la partícula divina”. G. Sánchez. Nuclear España. Octubre 2008 (http://diarium.usal.es/guillermo/files/2014/02/NESuperaceledoryLaparticulaDivina_GuillermoSánchez.pdf).
- Sobre el experimento BICEP2, los artículos técnicos pueden descargarse de www.bicepkeck.org. En Investigación y Ciencia se han publicado varios artículos sobre el tema (véase: Tras la huella de la Inflación por R. Schwarz. Julio 2014).
- Sobre el satélite Planck: <http://sci.esa.int/planck/> ■

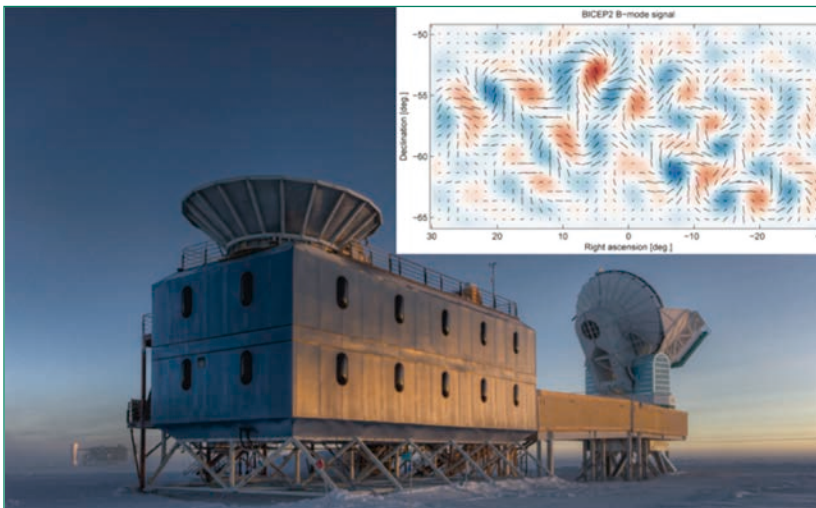


Figura 6. La foto muestra las instalaciones del Experimento BICEP2. El recuadro superior muestra, en coordenadas astronómicas, los indicios de los modos B de polarización. La longitud de las líneas es proporcional a la magnitud del efecto en cada punto. El color rojo indica sentido horario y el azul sentido antihorario. Estos resultados son compatibles con la existencia de ondas gravitacionales en el Big Bang (Fuente: BICEP2).