

## Cosmología

# Nada sabemos aún sobre la inflación

El 17 de marzo pasado la Universidad de Harvard comunicaba el hallazgo de las esperadas ondas gravitatorias primordiales del Big Bang y, así, la confirmación de la Teoría de la Inflación Cósmica. Sin embargo, a fines de mayo, grupos independientes demostraron que la evidencia no era suficiente. Una no poco frecuente historia de la Física.

Guillermo Mattei - gmattei@df.uba.ar

Con el Big Bang nació el tiempo. Cuando el reloj cósmico marcó la fracción de un segundo, que resulta de dividirlo por un diez seguido de treinta y cuatro ceros, el universo naciente –una versión supercomprimida del actual– pasó, por alguna razón, por una etapa de expansión terriblemente acelerada: la *era inflacionaria*. Sin embargo, una de las consecuencias principales de esta era resultó ser el apaciguamiento, aplastamiento o suavizado de las características que definían a ese alocado universo bebé. Las inhomogeneidades o granularidades de la materia y energía por unidad de volumen –*densidades*–, los efectos de gravedades monstruosas –*curvatura espacial*– y algunas reliquias indeseadas simplemente se diluyeron luego de la inflación. En otras palabras, la energía que comandaba esa expansión desmedida, tampoco se sabe bien por qué, transmutó a la materia y a la energía que hoy observan los físicos inaugurando, así, la bien conocida por ellos, etapa del *Big Bang Caliente*.

De todas maneras, las leyes de la mecánica cuántica prohíben suavizar

completamente todo. El llamado *Principio de Incertidumbre* de Heisenberg sentencia que siempre quedará una granularidad residual aun en el estado de más baja energía o *estado de vacío cuántico* (ver EXACTAMENTE 41). En términos algo más técnicos, estas restricciones afectan a los llamados *campos cuánticos*, que son versiones de campos continuos –como por ejemplo el electromagnético– cuyas partículas virtuales asociadas pueden crearse y destruirse –de acuerdo con el Principio de Incertidumbre– durante intervalos de tiempo muy cortos. En el contexto inflacionario, los campos cuánticos relativamente *livianos* o de poca masa siempre fluctuarán.

Paradójicamente, esa borboteante fase inflacionaria necesariamente implicó dos predicciones contundentes: finalmente el universo debe ser altamente homogéneo y su geometría debe ser poco *curvada* a causa de los efectos gravitatorios. Eso es lo que los astrofísicos observan hoy con gran precisión. Luego, las pequeñas irregularidades o perturbaciones justo antes de la *etapa suavizada* son una fuente rica en información cuantificable acerca de la era inflacionaria anterior.

## Inflatón y ondas gravitatorias

En la inflación hay dos clases de efectos atribuibles a dos campos cuánticos fluctuantes: el *campo inflatón* y el *campo gravitacional*. Los físicos llaman *inflatón* al motor de la inflación que, aun sin conocerlo directamente, tiene efectos observables. El inflatón puede, eventualmente, convertirse en materia o en radiación, lo cual produce variaciones en la densidad del apretujamiento primigenio o *plasma*. Esas variaciones son justamente las que muestra el Fondo de Radiación Cósmica (FCR, ver recuadro *Lluvia cosmológica*) o mapa de las pequeñas diferencias de temperatura, de cien milésimos de grado, de un punto a otro de la bóveda celeste que fueron, a medida que avanzaba la expansión, la semilla de estrellas y galaxias (ver Figura 1).

En la década de 1980, luego de propuesta la idea de la inflación, los físicos especularon que, además de la fluctuación en las densidades, debía haber también fluctuación en el campo gravitacional. Estas fluctuaciones adicionales se llaman *ondas gravitacionales* y van acompañadas de sus partículas cuánticas o *gravitones*. En este sentido, de manera parecida al hecho de que una onda electromagnética es una



## LLUVIA COSMOLÓGICA

Esa molesta señal que reproduce la televisión de aire antes de la señal de ajuste es *ruido de fondo* y proviene del movimiento al azar de los electrones en la antena y en los circuitos del aparato. Si uno pudiera *descontarlo*, aún habría ruido de fondo: una fracción de ese ruido corresponde a fuentes de radio de nuestra galaxia. De nuevo, si uno pudiera descontarlo, aún habría ruido de fondo: una parte proviene de otras galaxias. Una vez más, si uno pudiera descontarlo, aún subsistiría un ruido que llega de todas partes del cielo por igual. Y ya no hay manera de descontarlo.

Este inevitable ruido del cielo tiene temperatura: tan solo tres y medio grados Kelvin. ¿Por qué? Cualquier cuerpo a temperatura superior al cero absoluto emite un ruido radioeléctrico producido por el movimiento de los electrones internos del cuerpo. La intensidad de ese ruido está muy relacionada con la temperatura del cuerpo.

Pero ¿qué causa esta lluvia que aún nos sigue mojando? Unos trescientos mil años después del Big Bang, la altísima temperatura del plasma de partículas y energía iniciales ya había descendido lo suficiente como para que esa sopa fuera menos densa y permitiera, así, que los fotones se escaparan. Esa lluvia de fotones es el Fondo de Radiación Cósmica, FCR.

Hasta la década de 1960, todos los estudios experimentales indicaban que el FCR llegaba por igual desde todas partes con asombrosa y desconcertante uniformidad. Pero, en los años 90, el satélite COBE fue el primer instrumento construido con la sensibilidad adecuada como para reconocer pequeñísimas variaciones en el FCR. Finalmente, en 2006, la sonda WMAP cuantificó esas variaciones de manera notable. Fue algo así como ver una pelotita de golf, primero, desde cincuenta metros –perfectamente redonda y blanca– y, luego, desde cinco centímetros: ya no perfectamente esférica sino con numerosos pozos de una profundidad muchísimo menor que su propio diámetro.

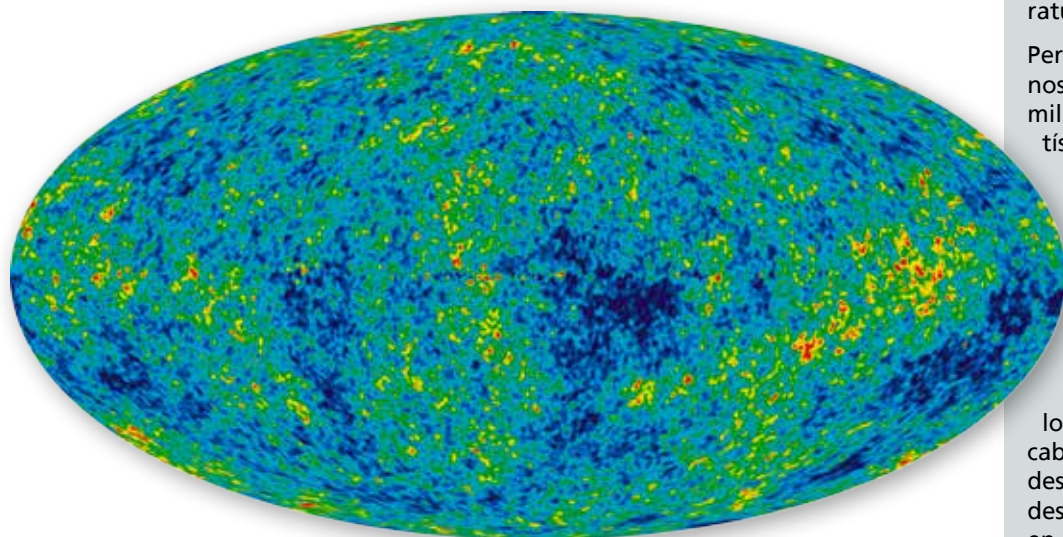


Figura 1. El Fondo Cósmico de Radiación (FCR) es un mapa de las diferencias de temperatura, de cien milésimas de grado, de la bóveda celeste.

oscilación de los campos eléctrico y magnético que se propagan a la velocidad de la luz, las ondas gravitacionales son una oscilación del campo gravitacional que se propaga a esa misma velocidad. A las ondas electromagnéticas se las detecta porque pueden hacer oscilar partículas cargadas y, en principio, a las ondas gravitacionales se las podría sentir cuando estiren y compriman alternadamente a la materia que encuentren a su paso.

Las ondas gravitacionales que provienen de la inflación son interesantes por dos motivos. Primero, porque existen como tales. Segundo, porque al analizar el mapa del FCR proveen una manera de diferenciar sus efectos de los de las fluctuaciones de la densidad. De eso se encargó exitosamente el físico argentino Matías Zaldarriaga (ver apartado *El mejor de todos nosotros*).



## DE POLVO SOMOS

Tras las huellas del Modo B, los científicos del polarímetro BICEP-2, del Centro Harvard-Smithsoniano para la Astrofísica (Estados Unidos), examinaron porciones de cielo de entre uno y cinco grados (de dos a diez veces una Luna llena) que les permitieron capturar fotones del FCR desde una perspectiva capaz de ver a través de nuestra propia Galaxia de la Vía Láctea. Para hacer esto, los astrofísicos experimentales se trasladaron al Polo Sur aprovechando el aire frío, seco y estable.

El equipo del BICEP-2 aplicó una nueva y completa tecnología para hacer estas mediciones con un análisis de datos, demandó tres años de depuración de las fuentes de enmascaramientos y errores, tales como el polvo galáctico. De todas maneras, con la hipótesis que la intensidad del polvo galáctico varía de la misma manera en todo el cielo, incluido el del polo Sur, grupos de investigación independientes demostraron que el Bicep-2 no obtuvo clara evidencia de ondas gravitatorias primordiales escondidas dentro de la señal que aportó el polvo galáctico. Luego, no hay evidencia ni a favor ni en contra de la inflación.

Un típico ejemplo de método científico. No hay búsqueda de consensos. No hay suicidios. A seguir trabajando.

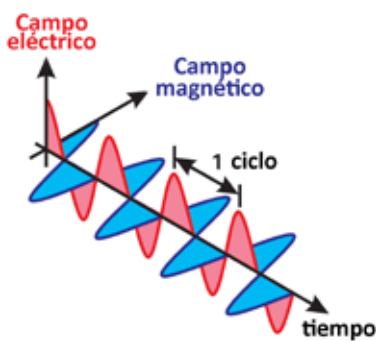


Figura 2. Propagación de una onda electromagnética.

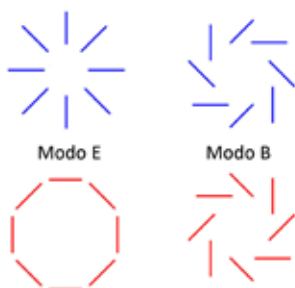


Figura 3. Modo E y Modo B de la polarización.

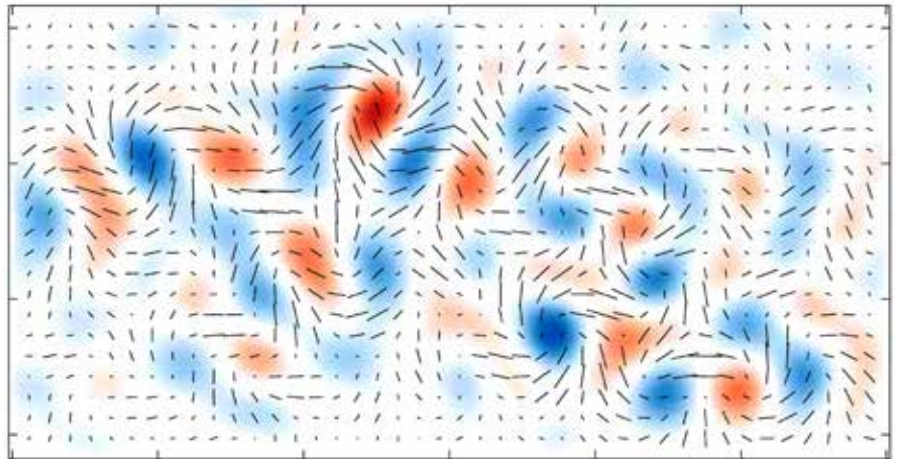


Figura 4: Señal del Modo B de la polarización medida por el experimento BICEP2.

### Cristales polarizados

Cualquier tipo de radiación que observemos, como las microondas del FCR, tienen una polarización. ¿Polarización? Matemáticamente, las ondas electromagnéticas son dos flechas o vectores: una es el campo eléctrico y la otra el magnético (ver Figura 2). Los tamaños de ambas flechas varían armónicamente en un plano perpendicular a la línea de propagación y la polarización es la dirección en la que oscila el campo eléctrico. Por ejemplo, en la luz que proviene de una lámpara incandescente todos los fotones luminosos que salen de ella tienen sus polarizaciones en direcciones aleatorias, por lo que el efecto global es inexistente. Sin embargo, cuando la luz del Sol rebota en el pavimento de una ruta, esta la polariza en la dirección horizontal. Es decir, todas las flechas del campo eléctrico quedan alineadas en forma paralela al piso. Como los vidrios polarizados de las lunetas delanteras, por su estructura polimérica, dejan pasar solo luz con los campos eléctricos perpendiculares al piso, el efecto final es el de anular la polarización incidente y, así, atenuar la intensidad. La radiación del FCR es parecida a una fuente incandescente, pero no absolutamente. El FCR tiene una muy pequeña polarización residual. Aun sin ondas gravitacionales, el FCR está polarizado debido a las fluctuaciones de densidad. Luego, las medidas y observaciones astronómicas del FCR deberían poder diferenciar a la

polarización inducida por la densidad de la polarización inducida por la gravedad.

El mapa de la polarización del FCR (ver Figura 4) se caracteriza por una distribución de pequeñas rayitas en el cielo que describen las direcciones de la oscilación neta del campo eléctrico. A partir de estos mapas, los físicos distinguen dos clases o modos de la polarización (ver Figura 3): el modo E y el modo B. Las perturbaciones de densidad producen el Modo E, mientras que las de las ondas gravitacionales producen ambos modos. En este contexto, el principal objetivo del experimento de Bicep-2 de la Universidad de Harvard fue el de encontrar una genuina polarización en Modo B proveniente de ondas gravitacionales primordiales (Ver recuadro *De polvo somos*).

### La energía de la inflación

Tanto las fluctuaciones de densidad como las de ondas gravitacionales surgen de fluctuaciones cuánticas en la etapa de inflación. Sin embargo, medir las fluctuaciones de densidad no arroja información acerca de la energía involucrada en la inflación. Con las fluctuaciones de las ondas gravitatorias ocurre algo diferente: ellas mismas son producto de la inflación y, además, los astrofísicos las observan directamente usando el hecho de que su amplitud –su intensidad, en algún sentido– está directamente relacionada con la escala de energías presente en la inflación. |

### PARA VER Y ESCUCHAR MÁS

<http://phdcomics.com/comics/archive/phdo31914spanish.gif>

[https://www.youtube.com/watch?feature=player\\_etailpage&v=4lBNJbCzfk](https://www.youtube.com/watch?feature=player_etailpage&v=4lBNJbCzfk)

# El mejor de todos nosotros

Leer a Cortázar y a una de sus mejores biografías es una experiencia impactante, pero charlar mano a mano con alguien que lo haya conocido personalmente tiene un sabor adicional. La trascendencia internacional del graduado de Exactas-UBA, Matías Zaldarriaga, está hoy bastante difundida (ver *EXACTAMENTE* 36), pero su huella por el Departamento de Física, narrada de primera mano, no tanto.

El profesor del Departamento de Física Juan Pablo Paz relata: "En 1992, el astrofísico Diego Harari, que en ese entonces era profesor en el Departamento de Física, aceptó a un estudiante para dirigir su tesis de licenciatura. Ese estudiante era brillante a todas luces: había hecho la carrera rapidísimo, con notas espectaculares, todos los docentes hablaban de él y, como si lo anterior fuera poco, se daba tiempo para actuar como representante estudiantil en el cogobierno universitario de la FCEyN." Eran las épocas del intento neoliberal por asaltar la Universidad Pública, y Zaldarriaga era un referente de la resistencia.

Su mentor, Diego Harari, ahora investigador del CONICET en el Centro Atómico Bariloche y profesor en el Instituto Balseiro, confirma: "Lo que a mí más me impresionaba era la rapidez de su pensamiento, como si sus neuronas estuvieran cableadas mucho más eficientemente que las de cualquiera de nosotros. Su capacidad deductiva y su intuición física eran notables. Cuando empezó a trabajar en su tesis de licenciatura, le propuse que estudiáramos un trabajo publicado unos meses antes sobre polarización del FCR generada por ondas gravitacionales. El tenía que estudiar, entre otras cosas, relatividad y cosmología antes de poder abordar el tema. Yo calculaba que tendría cómodamente unos tres o cuatro meses para *entretenerse*, mientras yo mismo estudiaba los detalles de ese trabajo y pensaba cómo continuar la investigación. Una semana después Matías entró a mi oficina y me explicó en el pizarrón, con lujo de detalles, no solo los cálculos de ese trabajo sino sus propios avances para mejorar el método."

Otro profesor del Departamento de Física, Diego Mazzitelli, ahora en el Centro Atómico Bariloche y en la Universidad de Río Negro, recuerda: "Cuando volví a la Argentina de mi post doctorado en Trieste, me ofrecieron dictar la materia Relatividad General. Matías estaba entre los alumnos. ¡Fue una frustración muy grande para mí no poder responderle casi ninguna pregunta! Claramente ya sabía muchísimo del tema y con una profundidad notable".

Y así fue que en 1993 Zaldarriaga se recibió de licenciado en Física con una tesis sobre anisotropía de la polarización del FCR y comenzó su doctorado con

Harari en un plan de trabajo centrado en ese mismo tema. Fernando Lombardo, profesor del Departamento de Física y ex compañero de doctorado de Zaldarriaga en los años 90 aporta: "Matías siempre estaba interesado por todo lo que hacíamos los demás, fuera o no un tema cercano a su trabajo. Todo le interesaba, todo lo preguntaba y, al poco tiempo, ponía en jaque a más de uno en su propio tema, con preguntas que mostraban la profundidad del entendimiento y una motivación permanente".

Paz finaliza: "Estuvo poco menos de dos años en el Departamento de Física y decidió continuar su doctorado en Estados Unidos. Mandó las solicitudes, dio el examen de admisión con notas inéditas y las mejores universidades lo tentaron con condiciones extraordinarias. Matías eligió el Instituto Tecnológico de Massachussets donde se graduó en muy poco tiempo. En su doctorado siguió trabajando en el mismo problema en el que se había iniciado aquí, pero obviamente con una perspectiva mucho más amplia y con la mira puesta en los diversos experimentos que por ese entonces planeaban detectar las anisotropías en la polarización. Hoy Matías Zaldarriaga es uno de los expertos más importantes del mundo en ese tema. Trabaja como profesor en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton (Estados Unidos), un lugar para muy pocos."

Leer a los Cortázar y, además, a sus buenas biografías puede ser muy estimulante pero entrevistar a sus amigos no tiene precio.



Matías Zaldarriaga

Diana Martínez Liáser