

Corte esquemático del detector QUBIC. El instrumento está encerrado en una carcasa cilíndrica o criostato de 1,8m de alto y 1,6m de diámetro, que lo protege y mantiene a -269°C . Está abierto al cielo por una ventana de 45cm de diámetro de polietileno rígido de alta densidad, transparente a la radiación de microondas que el experimento procura medir. Escudriña el espacio en dos frecuencias: 150 y 220GHz y registra dicha radiación con dos técnicas (llamadas respectivamente *interferometría* y *bolometría*) mediante un conjunto de 1024 fotodetectores, cuyas señales permiten analizar las características de la radiación en estudio. Mantener el equipo a una temperatura tan baja, apenas 4°C por encima del cero absoluto, requiere disponer de un complejo sistema de refrigeración, especialmente diseñado para QUBIC.

QUBIC

Un experimento internacional de cosmología observacional con participación argentina

El Big Bang es la teoría cosmológica más ampliamente aceptada sobre la evolución del universo entre sus instantes iniciales y hoy. Describe matemáticamente cómo este se expandió de un estado en el que tenía altísima densidad y temperatura, y toda la materia y la energía estaban concentradas bajo la forma de un plasma de partículas elementales, y luego se fue enfriando hasta el punto en que se formaron los primeros núcleos atómicos, empezando por el de hidrógeno, al que siguieron con el transcurso del tiempo otros núcleos livianos. El proceso desembocó en la constitución de las estrellas y las galaxias por acción de la gravedad.

La teoría comenzó a ser formulada en 1927 sobre la base de varios antecedentes por el clérigo belga Geor-

ges Lemaître (1894-1966), profesor de física de la Universidad de Lovaina, y fue desarrollada principalmente por el físico ruso nacionalizado norteamericano George Gamow (1904-1968), quien entre otras cosas concluyó en 1948 que en la actualidad existiría en el cosmos una débil radiación difusa de microondas que recibió el nombre de *radiación cósmica de fondo*, algo que en 1964 constataron experimentalmente en los laboratorios Bell, por pura casualidad, los radioastrónomos estadounidenses Arno Penzias, nacido en Alemania, y Robert Wilson, un descubrimiento que les valió el premio Nobel de física en 1978.

Esa radiación, que llega a la Tierra con la misma longitud de onda desde cualquier dirección en la que se apunten los radiotelescopios, y que permea el cosmos

¿DE QUÉ SE TRATA?

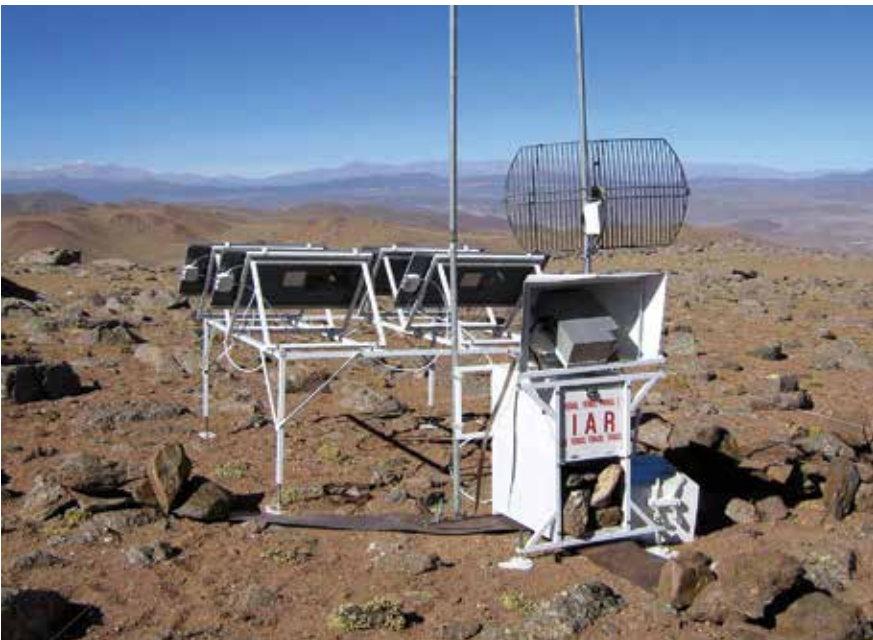
El análisis de las características de la radiación de microondas que nos llega del espacio podría llevarnos a entender mejor lo sucedido en los primeros instantes del universo.



Predio en Alto Chorrillos destinado a las instalaciones de los proyectos QUBIC y LLAMA.



Paisaje de la puna en camino a Alto Chorrillos.



Instrumental instalado en Alto Chorrillos para hacer mediciones preparatorias.

desde antes de que existieran las estrellas, es el más antiguo remanente que podemos detectar hoy del origen del universo y constituye, junto con las observaciones de 1929 del astrónomo estadounidense Edwin Hubble (1889-1953) sobre el desplazamiento hacia el rojo del espectro de la luz llegada de estrellas lejanas, una de las evidencias más importantes de la validez de la teoría del Big Bang y de la consiguiente expansión del universo. La edad de este, en consecuencia, sería la del alejamiento en el tiempo del inicio del proceso, que las mediciones más precisas realizadas datan de hace unos 13.800 millones de años.

La temperatura asociada con la radiación cósmica de fondo, que era elevadísima en los momentos tempranos del universo, fue descendiendo desde entonces hasta ubicarse hoy apenas por encima del cero absoluto, pero en 1992 por las mediciones del satélite COBE de la NASA se detectaron minúsculas diferencias (o anisotropías), de apenas unas diez millonésimas de grado, en la temperatura asociada con la radiación proveniente de distintas direcciones del espacio, diferencias que se interpretaron como la consecuencia de la manera en que se formaron las galaxias. Su descubrimiento les valió a los astrofísicos norteamericanos John Mather y George Smoot el premio Nobel de física de 2006. Confirmada por sucesivos experimentos, entre ellos las mediciones del satélite Planck de la Agencia Espacial Europea, dicha anisotropía constituye una confirmación adicional de la teoría o modelo del Big Bang.

Por otra parte, la radiación cósmica de fondo exhibe un pequeño grado de polarización. Decimos que la radiación electromagnética está polarizada cuando existe una dirección preferencial de oscilación de las partículas con carga eléctrica que la generan o la dispersan. Una antena emisora de radio, por ejemplo, emite señales con cierto grado de polarización, por lo que orientar la antena receptora con relación a esa polarización puede mejorar la señal recibida. Normalmente, la luz visible no nos llega polarizada, pero hay procesos, como la reflexión en una superficie, que pueden polarizarla. La radiación cósmica de fondo tiene una muy leve polarización cuya existencia fue confirmada en 2002 por un experimento realizado en el



Carcasa o envoltura externa del detector.

polo sur con un radiotelescopio instalado allí por la National Science Foundation de los Estados Unidos, y desde entonces su medición cada vez más precisa constituye un desafío relevante para la cosmología.

La polarización a la que nos estamos refiriendo es de dos tipos, llamados, respectivamente, modo E y modo B, que difieren debido que tienen distinto origen: la primera se relaciona con pequeñas irregularidades en la distribución de materia que dio origen a las galaxias, y la segunda, con ondas gravitacionales producidas en tiempos iniciales del Big Bang. Descubrir la huella de esas ondas gravitacionales primordiales, generadas en las primeras fracciones de segundo de la expansión del universo y mucho antes de que se constituyeran los objetos astronómicos que hoy existen, permitiría conocer detalles ignorados sobre las características del temprano Big Bang.

A pesar de haberse realizado algunos intentos y hasta de haberse creído en un par de ocasiones que se lo había logrado, no se ha podido aún medir la polarización del modo B, tarea para la cual se diseñó el experimento QUBIC, una colaboración internacional financiada con dinero de diversas fuentes —entre las que se destaca la Agencia Nacional de Investigaciones de Francia—, en la que participan varias universidades y laboratorios de Francia, Italia, el Reino Unido y los Estados Unidos, a los que se agregó la participación argentina.

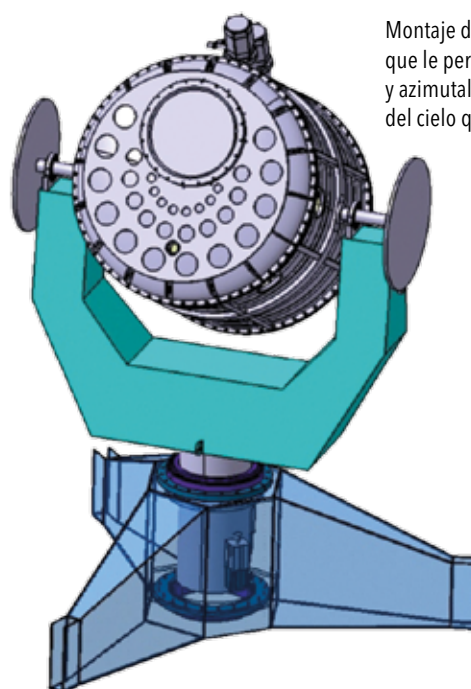
Para llevar a cabo las mediciones en cuestión se ha programado instalar el primer instrumento en el altiplano salteño, en un paraje denominado Alto Chorrillos, a unos 20km hacia el oeste de San Antonio de los Cobres, alrededor de 200km de Salta y a 4900m sobre el nivel del mar. El instrumento fue diseñado por los integrantes de la colaboración internacional QUBIC y está en construcción en diferentes laboratorios e institutos argentinos y europeos. En Francia se trabaja sobre los detectores, el diseño de la mecánica de estos, la electrónica de lectura y la programación; en Italia, sobre el criostato, los espejos, las bocinas de las antenas y los conectores; en Irlanda, sobre simulaciones ópticas; en Inglaterra, sobre el diseño

de bocinas, la criogenia interna, los filtros y el polarizador, y en la Argentina, sobre la adecuación del sitio, su infraestructura y el diseño mecánico de la montura.

También se programó localizar un segundo instrumento en la estación científica franco-italiana Concordia, en la Antártida. La elección del sitio para realizar mediciones astrofísicas de envergadura depende de un conjunto de factores, entre ellos los relacionados con la claridad de los cielos, la temperatura, la velocidad del viento y la humedad relativa del aire (que es el parámetro crítico si se procura registrar microondas, pues la humedad afecta la sensibilidad del instrumento). La geología, la accesibilidad, las comunicaciones (en particular el acceso a internet), el apoyo local y la posibilidad de incorporar personal local de diferentes niveles también forman parte de esos factores. En cambio, tienen menos importancia para un observatorio de radioastronomía ciertos requisitos fundamentales para la instalación de telescopios ópticos, como la ausencia de fuentes de luz terrestre que creen contaminación lumínica.

El sitio de Alto Chorrillos ya había sido evaluado y elegido para instalar un radiotelescopio llamado Large Latin American Millimetre Array (LLAMA), producto de la cooperación científica argentino-brasileña. Para hacerlo el Conicet obtuvo en comodato por veinte años del gobierno provincial un área de 400ha. Para QUBIC solo se necesita ocupar 100m².

La descripción del diseño y la operación de los instrumentos de medición de QUBIC nos llevaría a tecnicismos que están más allá de las posibilidades de esta nota, en la que solo dejamos constancia de que se están preparando



Montaje del detector sobre un pie que le permite movimiento cenital y azimutal para apuntarlo al sector del cielo que se desee.

equipos que combinan dos técnicas de detección diferentes, interferometría y bolometría. Esos equipos escudriñarán el cielo en dos frecuencias (150GHz y 220GHz) y estarán ubicados dentro de una carcasa cilíndrica de unos 1,8m de alto y 1,6m de diámetro que actuará como recipiente refrigerado o criostato y los mantendrá a temperaturas muy próximas al cero absoluto. Esto implica disponer de un complejo sistema de refrigeración que está siendo especialmente diseñado para QUBIC.

La montura mecánica sobre la que se apoyará el instrumento, con movimiento cenital y azimutal, está siendo diseñada en la Universidad Nacional de La Plata y será construida localmente. En la Argentina se ha reunido alguna experiencia en construir y operar instalacio-

nes para grandes proyectos de física experimental, por ejemplo, por su participación en el observatorio de rayos cósmicos Pierre Auger, ubicado en Malargüe, Mendoza.

De acuerdo con el cronograma acordado, se estima que el instrumento prototipo de prueba estará terminado en los laboratorios de París entre septiembre de 2017 y abril de 2018. Después de ensayarlo, el primer módulo de QUBIC será enviado a la Argentina para su instalación, prevista para mediados de 2018, y su puesta en funcionamiento a fines de ese año. Por su parte, la rama argentina de la colaboración pondrá en marcha, en laboratorios de la Universidad Nacional de Salta y de la oficina regional de CNEA, lo necesario para la integración final del instrumento en el país. También concluirá la preparación del si-

■ POLARIZACIÓN DE MODO B: HUELLA DE ONDAS GRAVITACIONALES PRIMORDIALES ■

La radiación cósmica de fondo es la luz más antigua que podamos observar, un vestigio del universo primitivo al que permeaba desde antes de que existieran galaxias, estrellas, planetas o átomos. Se propaga inalterada por el cosmos desde el momento en que protones y electrones se unieron y formaron átomos por vez primera, algo que acaeció al cabo de unos 380.000 años de expansión del universo a partir del Big Bang, un breve lapso comparado con los 13.4000 millones de años que transcurrieron desde entonces a nosotros.

La información que trae dicha radiación desde ese remoto pasado es excepcionalmente valiosa. Las anisotropías o minúsculas diferencias de temperatura entre las distintas direcciones de las que proviene que se mencionan en el texto son las huellas de pequeños excesos o déficits primordiales de materia en variadas regiones del espacio, que fue la causa de que hoy existan galaxias, estrellas y planetas.

La radiación cósmica de fondo transporta información sobre propiedades aún más primitivas del universo, codificada en su polarización. Esa radiación adquirió el pequeño grado de polarización comentado en el texto al ser dispersada por electrones antes de que estos se unieran con protones para formar átomos de hidrógeno. Cuánta polarización adquirió y en qué dirección dependió del movimiento de los electrones en ese momento y en cada lugar. Si los electrones se hubiesen movido con igual

velocidad en todas las direcciones posibles, no habrían existido direcciones privilegiadas en las cuales tuvo lugar diferente dispersión, sea mayor o menor, y no habría habido polarización. En cambio, los mencionados pequeños excesos y déficits primordiales de materia, que dieron origen a las galaxias, produjeron anisotropías en el movimiento de los electrones, las que generaron polarización, verificada con precisión creciente por diferentes experimentos desde hace quince años.

Se requieren mediciones aún más precisas de la polarización para determinar si el movimiento de los electrones tenía vorticidad o remolinos. Si los tenía, se habrá generado polarización de tipo o modo B, además de la de modo E, en la que el movimiento carece de vorticidad. Los pequeños excesos y déficits primordiales de materia no generan remolinos sino solo oscilaciones radiales, las cuales solo generan polarización de modo E. En cambio, las ondas gravitacionales dan al movimiento la vorticidad que produce polarización de modo B.

Las ondas gravitacionales son olas del espacio-tiempo que se propagan a la misma velocidad que las ondas electromagnéticas. Llevó un siglo y requirió enormes esfuerzos comprobar su existencia, predicha por Albert Einstein en 1916. Lo logró el experimento Laser Interferometric Gravitational-Wave Observatory (LIGO), que registró el paso de ondas de ese tipo emitidas durante la colisión y el colapso de dos agujeros

negros, un proceso astrofísico relativamente cercano y reciente en la escala del universo. La búsqueda de polarización de modo B en la radiación cósmica de fondo apunta a descubrir si había ondas gravitacionales antes de la aparición de objetos astrofísicos, es decir, si existieron ondas gravitacionales primordiales.

Se especula que los excesos y déficits primordiales de materia son consecuencia de efectos cuánticos durante un breve período de expansión exponencial del universo, denominado *período inflacionario*. Esos mismos efectos cuánticos predicen la existencia de ondas gravitacionales primordiales, que de existir habrían dejado su huella en la forma de polarización de modo B.

La polarización de modo E ha sido medida con alta precisión. Hace un par de años, experimentos realizados en el polo sur y en la puna de Atacama lograron también detectar polarización de modo B, producto de la distorsión de polarización de modo E provocada por un efecto de lente gravitacional, por el cual la atracción de la materia sobre la luz que llega desde lejos distorsiona su trayectoria como lo haría un vidrio irregular. En cambio, no se ha detectado polarización primordial de modo B en la radiación cósmica de fondo, supuestamente por lo minúsculo de sus efectos. Esos efectos, además, deben ser diferenciados de otros de diversos orígenes que contaminan la huella primordial que se busca desenmascarar.



Una calle de San Antonio de los Cobres.

tio de Alto Chorrillos, mientras que en San Antonio de los Cobres ya ha iniciado la labor de difusión y de educación sobre temas relacionados con el experimento.

El emplazamiento en plena puna salteña de esta clase de instalaciones traerá aparejada la necesidad de mejorar, entre otras cosas, la provisión de energía, las comunicaciones y los caminos de acceso al sitio, así como de construir en este y posiblemente en San Antonio de los Cobres sendas sedes que incluyan laboratorios y puedan ser compartidas por QUBIC y LLAMA. Se puede esperar, también, que ciertos beneficios económicos de estos

proyectos se diseminen entre los pobladores de San Antonio de los Cobres en forma de demanda de bienes y servicios y oferta de empleo.

La detección de polarización primordial de modo B es uno de los grandes desafíos de la cosmología observacional contemporánea. Su medición podría confirmar que hubo una etapa inflacionaria en las primeras fracciones de segundo de expansión del universo, y cuáles fueron sus características. Varios experimentos de frontera decidieron enfrentar ese desafío. Entre ellos QUBIC, en la puna salteña. **CH**

LECTURAS SUGERIDAS

ALEKOTTE I y HARARI D, 2002, 'Un desafío cósmico para observatorio Auger', CIENCIA HOY, 12, 71: 49-60.

ARNALEM, 2009, '¿Dónde instalamos el telescopio?', CIENCIA HOY, 19, 110: 57-62.

ETCHEGOYEN A y FILEVICH A, 1996, 'Las mayores energías de la naturaleza. El proyecto Pierre Auger', CIENCIA HOY, 6, 35: 21-28.

GANGUIA, 2003, 'La polarización de la radiación cósmica de fondo', CIENCIA HOY, 13, 74: 56-61

Integrantes argentinos de la colaboración internacional QUBIC

Alberto Etchegoyen. Doctor (DPhil) en física, Oxford. Investigador superior en CNEA y en Conicet. Profesor titular, UTN-FRBA. Director de ITeDA (CNEA, Conicet, UNSAM).

Diego Harari. Doctor en física, UBA. Investigador principal del Conicet.

Beatriz García. Doctora en astronomía, UNLP. Investigadora independiente del Conicet.

Clementina Medina. Doctora en física, UNSAM. Investigadora adjunta del Conicet.

Gustavo E Romero. Doctor en física, UNLP. Investigador superior del Conicet. Profesor titular, UNLP.