

El Nóbel, Colombia y el Universo

Sergio Torres Arzayús

Uno de los más celebrados premios Nóbel en el área de astrofísica resultó de un trabajo publicado en un escueto artículo de 2 páginas donde un par de radio astrónomos reportan haber detectado ruido en una antena de radio. ¿Porqué un experimento aparentemente inocuo es merecedor del Nóbel? Ganarse el Nóbel de física no solamente representa recibir la suma de 10 millones de coronas suecas, un viaje en primera clase a Estocolmo y un banquete con su majestad el rey de Suecia. El Nóbel es el máximo reconocimiento que un científico puede recibir y conlleva un prestigio de altísimo nivel, por eso se otorga a trabajos extraordinarios. El trabajo en cuestión se trata nada menos que del descubrimiento en 1965 por Arno A. Penzias y Robert W. Wilson de la radiación térmica dejada por la gran explosión (“big bang”) que dio origen al universo y por el cual recibieron el Nóbel en 1978. Este descubrimiento revolucionó la cosmología dando evidencia a favor de la teoría del Big Bang, explicando la expansión del espacio y la abundancia relativa de los núcleos ligeros (helio, deuterio y litio) en el universo [1-3].

El experimento de Penzias y Wilson es el ejemplo arquetipo del descubrimiento al azar. Las observaciones no fueron de ninguna manera planeadas para descubrir los rastros del Big Bang. Mientras que estos dos astrónomos trabajaban en los laboratorios de la empresa de teléfonos Bell en New Jersey haciendo mediciones de interferencia en telecomunicaciones con satélites apareció un fondo de ruido en su aparato receptor. Después de tratar en vano de hallar la fuente de ruido en factores locales este fue atribuido a la temperatura del universo. Las observaciones fueron reportadas en un artículo insustancial titulado “Medición del exceso de temperatura de antena a 4080 MHz” que es ejemplar por su brevedad, precisión y carencia de alardes ostentosos.

De los 100 premios Nóbel de física otorgados desde su creación por Alfred Nóbel en 1901 solo 7, y solo en los últimos años, han sido en el área de astrofísica. El hecho de que los Nóbel en astrofísica se han dado solo en los últimos años es reflejo del avance de la materia: Hans Bethe (1967) por el descubrimiento del mecanismo de generación de energía en las estrellas; Martin Ryle y Anthony Hewish (1974) por su trabajo en radioastronomía y el descubrimiento de los pulsares; Penzias y Wilson (1978) por el descubrimiento de la radiación cósmica de fondo; Subramanyan Chandrasekhar y William A. Fowler (1983) por avances en la teoría de la estructura y la evolución estelar (Chandrasekhar) y por estudios de las reacciones nucleares que formaron los elementos primordiales en el universo (Fowler); Russell A. Hulse y Joseph H. Taylor

(1993) por el descubrimiento de un nuevo tipo de pulsares; Riccardo Giacconi (2002) por sus contribuciones al avance de la astrofísica de rayos X; y este año el premio va a George Smoot y John Mather por liderar el proyecto COBE (“Explorador del Fondo Cósmico”) de la NASA con el cual se descubrieron las anisotropías en la radiación de fondo y se midió con precisión su espectro.

La mayoría de los Nóbel en física (64%) han sido por trabajo experimental y el tiempo típico entre el trabajo y el premio supera los 15 años. Tiempo suficiente para asegurarse que el descubrimiento ha quedado firmemente establecido, aceptado por la comunidad científica, corroborado por múltiples experimentos independientes, y se ha podido determinar el impacto del trabajo al avance de su campo. En física de altas energías, por ejemplo, pasaron 26 años desde el descubrimiento de una segunda familia de neutrinos (1962) por Leon Lederman y el reconocimiento con el Nóbel (1988) una vez quedó claro el impacto de su descubrimiento en el avance del modelo estándar de partículas e interacciones. Para Penzias y Wilson pasaron 13 años entre el descubrimiento y el premio, mientras que en el caso del COBE el tiempo de espera fue 13 años. La complejidad de los experimentos modernos es un aspecto que ha cambiado substancialmente en los últimos años: mientras que el descubrimiento de Penzias y Wilson se realizó con solo dos personas, el COBE fue el trabajo de un equipo de mil personas.

La astrofísica es la aplicación de la Física a los procesos que se observan en el universo tales como la emisión de pulsos de rayos gama, planetas extrapolares, formación de agujeros negros, supernovas, emisión de radio-ondas en la galaxia, y muchos otros fenómenos. Por otro lado la cosmología es un nicho de la astrofísica donde se estudia el universo como un todo, tanto su composición como su origen y evolución. Penzias y Wilson, y Smoot y Mather han sido los únicos en recibir el premio Nóbel por trabajo en cosmología. Antes de 1965, excepto por el descubrimiento de la expansión del espacio por Hubble en 1929, no existía la cosmología experimental.

A diferencia de las otras áreas experimentales, en la astrofísica y sobretodo en la cosmología no se hacen experimentos de laboratorio en el sentido tradicional de recrear un fenómeno un número arbitrario de veces para hacer mediciones precisas. No podemos crear una estrella o un agujero negro en el laboratorio, mucho menos recrear el Big Bang. Para los cosmólogos el experimento del universo ya ha sido realizado. Basta con recoger los datos y hacer el análisis. Por esta razón se usa el adjetivo de “observacional” para referirse a la astrofísica experimental.

COBE: Un Termómetro Cósmico

En muy resumidas palabras podríamos decir que lo que hicieron Penzias y Wilson y luego Smoot y Mather fue medirle la temperatura al universo. ¿Cómo es posible medir la temperatura del universo con una antena de radio? Que una antena pueda ser usada como termómetro se basa en el hecho de que todo cuerpo “caliente” emite radiación electromagnética. Esta radiación (*radiación térmica*) es producida por la energía de agitación de los átomos. Entre más caliente una sustancia más energética la radiación que emana de esta y por lo tanto más alta la frecuencia pico de la radiación.

La teoría de la radiación térmica fue motivo de intensa actividad para los físicos a finales del siglo XIX contando con contribuciones de notables científicos como Kirchoff, Wien, Boltzman, y culminando con el trabajo de Max Plank. La noción de “quantum” desarrollada por Plank (premio Nóbel 1918), que dio nacimiento a la teoría cuántica, fue introducida para explicar las características de la radiación de *cuerpo negro* (una sustancia ideal que posee la propiedad de convertir toda la energía térmica de sus átomos en radiación electromagnética). De acuerdo a la termodinámica y tal como lo demostró Plank esta radiación exhibe un espectro característico (Figura 1) que depende únicamente de la temperatura del mismo. La relación de Stefan-Boltzman $\rho = AT^4$, (donde ρ es la densidad de energía, T es la temperatura y A una constante de proporcionalidad) es consecuencia del espectro de cuerpo negro.

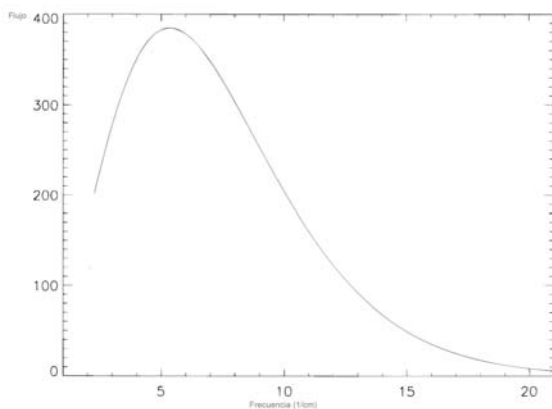


Figure 1. Espectro de cuerpo negro de la radiación cósmica de fondo tal como fue medido por el COBE (fuente: The Astrophysical Journal, 473:576-587, 1996)

Con base en el hecho de que todo cuerpo cuya temperatura es mayor que la del cero absoluto emite radiación electromagnética y de que esta radiación tiende a ser de mayor frecuencia cuanto mayor sea la temperatura se puede decir que una antena de radio es un termómetro. Nótese sin embargo que esta debe estar “sintonizada” a la frecuencia

adecuada para que la temperatura deseada pueda ser medida. Alguien podría señalar la poca utilidad de un termómetro que para su uso se requiere saber el valor de la temperatura de antemano. Esta aparente deficiencia no es para nada limitante cuando lo que se desea es medir un efecto que es predicho por la teoría, como lo es el caso de la radiación térmica predicha por la teoría del Big Bang. La suerte de Penzias y Wilson está en que sin saberlo ellos sintonizaron su antena justamente al rango de frecuencias (microondas) donde la temperatura del universo se puede medir.

¿Y cual es la conexión de todo esto con el universo? Estamos en 1965, Penzias y Wilson no saben que está sucediendo con su antena que continua recibiendo ruido a toda hora del día y en todas las direcciones. Ellos igualmente ignoraban el hecho de que el físico ruso George Gamow y sus colegas R. A. Alpher y R. C. Herman habían predicho 16 años atrás la existencia del susodicho ruido. Gamow consideraba el universo en el pasado como un gas caliente de partículas nucleares a alta temperatura y densidad. En el modelo naciente del Big Bang Gamow usaba el hecho conocido de la expansión del espacio para predecir una época remota cuando el universo era suficientemente caliente como para encender reacciones nucleares donde se sintetizan los elementos ligeros que observamos en el universo. A medida que el universo se expande este se enfría. Gamow calcula la densidad y la temperatura necesarias para la núcleo-síntesis de los elementos ligeros, con lo cual se obtiene la densidad de radiación en el pasado. El decremento en la densidad de energía de radiación debido a la expansión del espacio se puede calcular y así estimar su valor hoy del cual se deriva la temperatura presente del universo usando la relación de cuerpo negro $\rho = \sigma T^4$. El resultado de este sencillo cálculo fue publicado en 1948 y concluía que la temperatura del universo hoy debe ser de 5 grados Kelvin, muy cerca al valor de 3,5 grados medido por Penzias y Wilson y de 2,725 Kelvin conocido hoy con una precisión de 1 milikelvin gracias al COBE (Kelvin es la escala absoluta de temperatura, el cero absoluto equivale a -273,15 grados Celsius).

Curiosamente estos resultados no eran muy conocidos por los astrónomos en ese entonces ni aparentemente por el grupo de Princeton (J. Peebles, D. Wilkinson, R. H. Dicke) quienes independientemente llegaron a la misma predicción que Gamow y planeaban hacer mediciones del fondo de radiación.

Posterior al descubrimiento del fondo de radiación se creó toda una “industria” académica en torno al tema. El grupo experimental de Smoot en particular se convirtió en líder con mediciones tanto del espectro como de la homogeneidad de la radiación de fondo en globos, aviones, picos de montañas, desiertos, y hasta la Antártica.

Rápidamente los intentos por precisar las propiedades de la radiación de fondo se vieron limitados por el ruido de microondas emitido por las moléculas de agua en la atmósfera terrestre, que se interpone como un velo de radio-interferencia entre el fondo cosmológico y el instrumento de medida. Surge así la necesidad de hacer observaciones fuera de la atmósfera, tal como fue propuesto a la NASA con el COBE por Smoot, Mather y Mike Hauser a finales de la década de los 70. La idea era usar una plataforma satelital en la cual se montan las antenas sintonizadas en el rango de microondas que es donde mejor se puede medir la temperatura del cosmos.

El 18 de noviembre de 1989 fue lanzado el cohete Delta que llevó al COBE a su órbita polar a 900 Km de la Tierra. La plataforma incluye tres instrumentos: el radiómetro propuesto por Smoot (DMR) para medir diferencias de temperatura en diferentes direcciones del espacio, el espectrómetro FIRAS de Mather para medir el espectro y el DIRBE para medir el fondo de radiación difusa en el infrarrojo.

Manchas en el Universo

Las observaciones astronómicas revelan la presencia de macro-estructuras en el universo tales como las galaxias y los cúmulos de galaxias. Estas estructuras se formaron a partir de pequeñas irregularidades en la distribución de la materia según lo explicó el físico ruso E. M. Lifshitz desarrollando el formalismo de fluctuaciones en la densidad de la materia. Desarrollos teóricos posteriores proveen el mecanismo que genera las perturbaciones en el plasma primordial. El modelo inflacionario de A. Guth y A. Linde, que postula una época de crecimiento acelerado, explica el origen mismo del Big Bang y el espectro de las fluctuaciones en el plasma primordial a partir de fluctuaciones cuánticas en el campo que genera la inflación.

La prueba de que el espectro de la radiación de fondo es un espectro de cuerpo negro con la temperatura predicha por la teoría es sin duda un resultado de inmenso significado. Sin embargo, para mantener la consistencia del modelo del Big Bang con respecto a las macro-estructuras del universo es importante también determinar si la temperatura del universo es constante o si existen pequeñas variaciones dependiendo de la dirección de observación. Según la teoría deben existir pequeñas diferencias de temperatura.

¿Cual es la conexión entre las grandes estructuras en el cosmos y la temperatura del universo? Cuando apenas habían transcurrido 300 mil años desde el origen, el universo era como una sopa muy caliente (3000 Kelvin) de partículas. Las partículas eran los protones, neutrones, electrones y la luz (a temperaturas elevadas la luz se comporta como partículas, es decir los fotones). Todas

estas partículas participaban de las mismas fluctuaciones del plasma, es decir los fotones y la materia estaban acoplados. Cuando el universo se expande este acople se pierde, materia y radiación se divorcian y siguen cada una su propio camino. La materia formando estrellas, galaxias y cúmulos; la radiación enfriándose y llenando todo el espacio con la radiación de fondo que apareció un día en la antena de Penzias y Wilson. Las fluctuaciones en el plasma primordial son las semillas comunes que generan tanto la estructura en la materia como las anisotropías (desigualdades) en la temperatura de la radiación. Los cálculos teóricos indican que el universo al momento del desacople de la materia y la radiación sustenta 3 mecanismos de generación de anisotropías en la radiación de fondo: cambios en la longitud de onda de la radiación por el efecto Doppler debido a la velocidad de ondas acústicas en el plasma; anisotropías intrínsecas producidas por las fluctuaciones mismas en la densidad de materia; y los efectos del campo gravitacional en los fotones (efecto Sachs-Wolfe). Estas últimas aparecen a escalas angulares de 10 grados y mayores, mientras que las anisotropías intrínsecas y el efecto de ondas acústicas se manifiesta a escalas angulares pequeñas. Cualquiera que sea el mecanismo la respuesta es clara: la aparición de estructura en el universo debe haber dejado una huella en la radiación de fondo que se manifiesta en pequeñas anisotropías.

Las anisotropías en la radiación de fondo a una escala angular de 10 grados fueron observadas por primera vez por los instrumentos DMR del COBE después de acumular 3 años de observaciones ininterrumpidas (Figura 2). Las mediciones indicaban desviaciones de temperatura (relativo al valor medio) al nivel de 30 millonésimas de grado Kelvin consistente con las predicciones teóricas. Mediciones más recientes por el proyecto WMAP [4] han logrado sondear la radiación cósmica con mayor sensibilidad y resolución angular detectando las anisotropías dejadas por el efecto Doppler y poniendo así cotas más restringidas a los parámetros cosmológicos: vivimos en un universo de geometría plana, de origen caliente (Big Bang) e inflacionario, de 13.700 millones de años, con una gran componente de materia oscura (0.196), una enorme cantidad de energía de repulsión (0.762), y relativamente baja cantidad de materia nuclear "normal" (0.042). Las proporciones anteriores son expresadas en términos de la densidad crítica 10^{-26} Kg/m^3 .

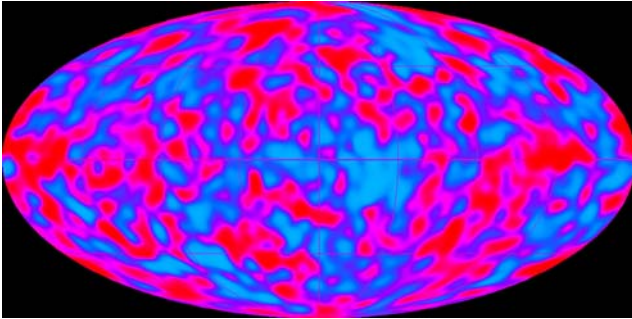


Figure 2. Mapa de las anisotropías en la radiación cósmica de fondo observadas por COBE. Las manchas en el mapa representan pequeñas variaciones de la temperatura relativas al valor medio (rojo = más caliente, azul = más frío)

La Galaxia y Colombia

Los primeros análisis de las anisotropías de la radiación de fondo con los datos del COBE indicaban la presencia de las huellas dejadas por las fluctuaciones en la densidad de materia. Sin embargo, para profundizar en los estudios era necesario hacer mediciones cada vez más precisas de la variancia direccional de la radiación del universo. Este objetivo encontró una dificultad seria con la radiación de nuestra galaxia que aparece como la señal más intensa en los aparatos de medición (Figura 3).

Nuestra galaxia, la Vía Láctea, está compuesta de miles de millones de estrellas sumergidas en un disco de gas compuesto primordialmente por hidrógeno y “polvo” interestelar. En el medio interestelar existen tres mecanismos básicos de radiación electromagnética. Los electrones libres se mueven bajo la influencia del campo magnético de la galaxia emitiendo radiación sincrotrón. Los átomos ionizados en nubes de hidrogeno producen una emisión característica (*bremstrahlung*). Finalmente, el polvo intergaláctico emite en el infrarrojo. Cada una de estas componentes tiene un espectro característico que permite tratarlos separadamente. La disponibilidad de mediciones precisas de la radiación proveniente de la galaxia provee una aplicación inmediata no solamente para el estudio de los procesos de radiación ya mencionados sino también la posibilidad de sustraer la componente galáctica en los mapas de la radiación cósmica de fondo.

Durante una visita de trabajo en 1990 a Washington el autor propuso a Smoot (con quien ya había trabajado en el periodo 1986-1989 en el proyecto COBE) hacer una medición de la radiación electromagnética de la galaxia desde Colombia. Nace el proyecto GEM (“Galactic Emission Maps”) [5]. La idea era usar el mismo radiotelescopio desde tres sitios distribuidos en latitud de tal forma que se alcance el mayor cubrimiento posible de la

esfera celeste. Colombia, por su posición ecuatorial, ofrecía una ventaja estratégica permitiendo enlazar observaciones realizadas en el hemisferio norte (California) y sur (Brasil).

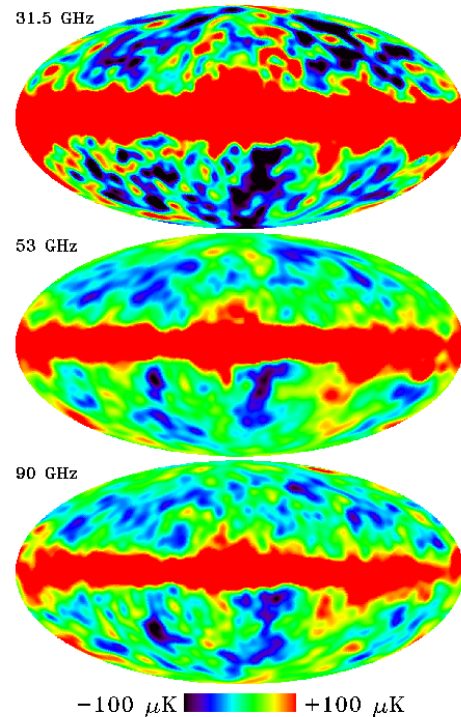


Figure 3. Mapas del COBE a las diferentes frecuencias (31.5, 53 y 90 GHz) donde aparece la radiación galáctica (banda central)

Con el apoyo de Colciencias y de la National Science Foundation se formó en 1990 el primer equipo GEM conformado por el grupo de Smoot de los Laboratorios Lawrence de Berkeley (Universidad de California), el INPE en Brasil y el Centro Internacional de Física, la Universidad de los Andes y el Observatorio Astronómico en Colombia. Una vez construido el radiotelescopio usando una antena parabólica Scientific Atlanta de 5.5 m y receptores a 408, 1465, 2300 y 5000 Mhz, se hicieron las primeras mediciones desde el desierto del Owens Valley en California. En 1992 Smoot viaja a Colombia y participa en el estudio de selección de sitio en Colombia (Figura 4).



Figure 4. Expedición para el estudio de sitios en Colombia. En la foto: Enrique Chaux, George Smoot, Julián Gómez, Mauricio Becerra, Sergio Torres, Andrés Umaña

Por su clima seco y baja radio interferencia el estudio concluyó con la elección de la región desértica en cercanías a Villa de Leyva para la instalación del radiotelescopio GEM. En el período marzo-mayo de 1995 se completaron 745 horas de observación con el receptor de 408 MHz permitiendo la realización del primer radio-mapa galáctico desde latitudes ecuatoriales (Figuras 5 y 6). GEM sigue activo en Brasil bajo la tutela de Thyrso Villela.



Figure 5. Radiotelescopio GEM en Villa de Leyva (S. Torres)

Con la colaboración GEM un grupo de estudiantes y jóvenes investigadores en Colombia participaron en un experimento de alta relevancia científica con un grupo internacional de científicos de altura Nóbel. El trabajo en el proyecto GEM con participación de estudiantes e investigadores colombianos ha resultado en 11 artículos publicados en revistas internacionales con referee, 8 artículos publicados en memorias de simposios

internacionales, 2 tesis de magíster y 2 tesis universitarias (referencias completas aparecen en la publicación 6 abajo).

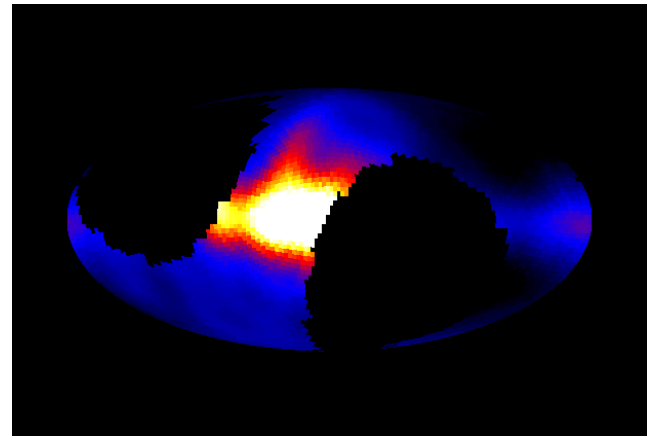


Figure 6. Mapa parcial de la emisión de radio de la Galaxia a 408 MHz con datos obtenidos desde Co

La experiencia del proyecto GEM fue un ejemplo de colaboración internacional exitosa en áreas de investigación de punta, que brindó una excelente oportunidad de formación a investigadores jóvenes en países en vías de desarrollo. Por estas razones el proyecto GEM fue adoptado como proyecto líder por la Oficina de Asuntos Espaciales de las Naciones Unidas.

Referencias:

1. S. Torres, "El cosmos ayer y hoy", *Innovación y Ciencia*, **Vol. XII**, No. 4, pp. 22-29 (2005)
2. S. Torres, "El origen del universo", *Innovación y Ciencia*, **Vol. III**, No. 2, pp. 44-49 (1994)
3. "Exploremos el Universo", en el web: <http://home.earthlink.net/~astronomia>
4. S. Torres, "Proyecto WMAP de la NASA confirma el Big-Bang", *Innovación y Ciencia*, **Vol. XI**, No. 1, pp.42-48, (2003)
5. S. Torres, "La Vía Láctea: estudios recientes y aportes del proyecto GEM en Colombia", *Innovación y Ciencia*, **Vol. IV**, No.5, pp. 30-37 (1995)
6. S. Torres, "The Galactic Emission Mapping (GEM) project: summary and results", in *Developing Basic Space Sciences World-Wide: A Decade of UN/ESA Workshops*, Eds. W. Wamsteker, R. Albrecht, H. J. Haubold, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2003. pp. 123-129 (<http://home.earthlink.net/~astronomia/fgem.html>)
7. Mayor información sobre los temas tratados en este artículo se pueden encontrar en el web: <http://home.earthlink.net/~astronomia/fcobe.html>