

Fondo Cósmico de Microondas:

La herramienta indispensable para poder describir la evolución del universo como un todo es la teoría de la Relatividad General del célebre físico alemán Albert Einstein (1879-1955). Junto con la Relatividad Especial, también suya, ambas teorías supusieron una completa revolución en la Física, eliminando el concepto de espacio absoluto presente desde los tiempos de Newton, y que constituía un grave problema conceptual a finales del siglo XIX y principios del XX.

El principio cosmológico dice que el universo a gran escala (observar el universo a distancias superiores a cientos de millones de años-luz) es homogéneo e isótropo. La homogeneidad conlleva que todos los lugares del universo son equivalentes, en el sentido de que cualquier observador medirá las mismas propiedades físicas (Temperatura, densidad, etc.). La isotropía implica que, además, dicho observador medirá lo mismo en todas las direcciones en las que observe.

Tras Einstein, el físico y matemático ruso Alexander Friedman (1888-1925) fue el primero en mostrar que la Relatividad General permite soluciones de universo homogéneo en expansión o contracción. Aun hoy, en su nombre, seguimos llamando a las ecuaciones del universo en expansión como ecuaciones de Friedman. En forma independiente, el sacerdote, astrónomo y físico belga Georges Lemaitre (1894-1966) redescubrió las ecuaciones, y propuso que la expansión del universo es la causa del desplazamiento hacia el rojo en el espectro electromagnético de las galaxias lejanas. Fue también el mismo Lemaitre el que introdujo el concepto de átomo primitivo en un artículo en la revista Nature en 1931, sugiriendo un inicio cuántico para el universo. Su teoría del átomo primitivo se asemeja enormemente al modelo actual de la inflación como punto de partida del universo.

La Radiación del Big Bang

La radiación de la detección del fondo de radiación fósil del Big Bang es un ejemplo de lo que en ciencia se llama Serendipia: un descubrimiento muy valioso hecho de forma accidental. Los físicos Arno Penzias y Robert Wilson detectaron, sin saberlo, el fondo cósmico de microondas en 1964, cuando hacían medidas astronómicas con una antena de telecomunicaciones en los laboratorios de Bell (Holmdel, Nueva Jersey, EE. UU.)

Aunque la motivación principal para el desarrollo de tecnologías eran las comunicaciones por satélite, a mediados del siglo pasado esas mismas antenas empezaron a usarse con fines astrofísicos. La radioastronomía nació también de forma casi accidental, a principios de los años treinta.

A principios de los años sesenta, y con el objetivo de realizar observaciones de fuentes de radio astronómicas, Penzias y Wilson empezaron a usar una antena de 20 pies (unos seis metros de diámetro) de Holmdel (figura 1), acoplada a un nuevo receptor de radio extremadamente sensible, que operaba a una longitud de onda de 7,35 cm (equivalente a 4080 MHz). Su sorpresa fue cuando detectaron que su antena captaba un exceso de señal de radio cuyo origen eran incapaces de explicar. Ese exceso de señal estaba presente siempre en sus datos, independiente de la dirección del cielo en la apuntasen, y no parecía tener un origen

terrestre. Tampoco tenía variaciones entre el día y la noche, y no mostraba variaciones estacionales. Dedicaron meses de trabajo a intentar aislar su origen. Una de las anécdotas que cuenta el propio Wilson de aquella minuciosa y sistemática tarea es que, en ese proceso de caracterización de la señal, tuvieron que limpiar con sumo cuidado el interior de la antena, que estaba llena de excrementos de paloma (lo que Penzias describía metafóricamente como “material dieléctrico blanco”). Habiendo rechazado todas las posibles fuentes de error y de interferencia, se rindieron a la evidencia: la señal que detectaban era real, producía de todas direcciones con igual intensidad (es decir, era isotrópica), y correspondía una amplitud de unos 3,5 K.



Figura 1

El grupo de los laboratorios Bell y el grupo de Princeton publicaron dos artículos en el mismo número de la revista *Astrophysical Journal*, en julio de 1965. El artículo de Penzias y Wilson mostraba la detección y el número con la medida de la amplitud de la señal. El artículo de Princeton, firmado por Dicke, Peebles, P.G Roll y D.T Wilkinson se titulaba “Radiación Cósmica de cuerpo negro”. Su conclusión principal era que Penzias y Wilson habían detectado la radiación fósil del Big Bang.

Radiación Cósmica de cuerpo negro

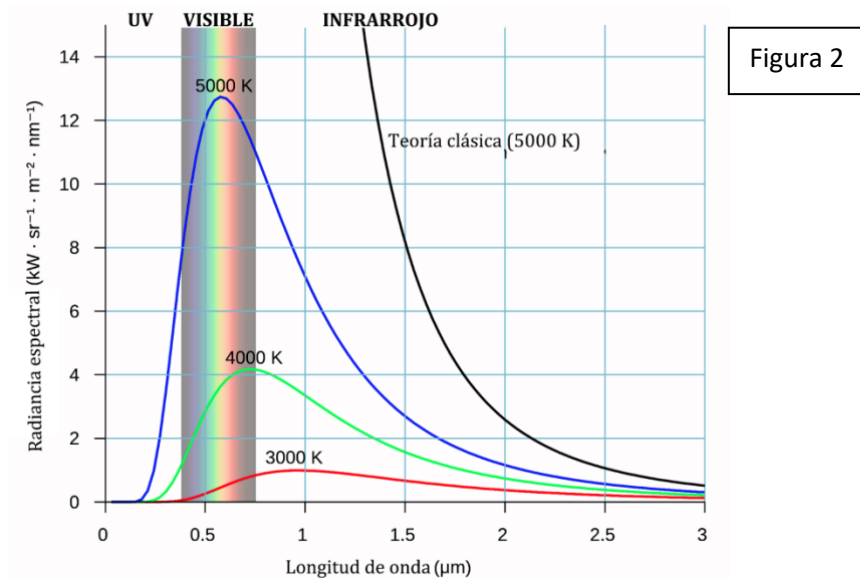
El espectro (se refiere a como se distribuye la energía en un colectivo de partículas) de la radiación electromagnética o de la luz, para cada valor de energía, cuantos fotones tienen esa cantidad de energía. Cada uno de esos fotones tiene asociado una cantidad de energía que viene dada por la expresión:

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

Donde h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz en el vacío, λ es la longitud de onda y ν es la frecuencia de la onda. La ecuación relaciona conceptos asociados de partículas (fotones) con conceptos vinculados a ondas (longitud de onda y frecuencia). Y es que, dependiendo del fenómeno estudiado, a veces se presenta la luz no como un conjunto de fotones, sino como una serie de ondas electromagnéticas. Es lo que se conoce como dualidad onda-partícula.

La curva (figura 2) corresponde con gran precisión a lo que se conoce como una distribución de cuerpo negro. Un cuerpo negro es la distribución de energía asociada a un conjunto de fotones que se encuentran en equilibrio termodinámico. Por tanto, el hecho de que esa curva se

asemeje tanto a un cuerpo negro nos está dando información de cómo eran las condiciones físicas en el pasado remoto del universo: nos habla de equilibrio termodinámico.



Para describir la distribución espectral de energía de un cuerpo negro basta usar un único parámetro: la temperatura de equilibrio del sistema, T . Esto es precisamente lo que esperamos de un sistema en equilibrio termodinámico. Merece la pena escribir la ecuación correspondiente al cuerpo negro, que es lo que se conoce como fórmula de Planck:

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (2)$$

Donde I es la intensidad específica (energía por unidad de área, unidad de tiempo, unidad de ángulo sólido y unidad de frecuencia), k es la constante de Boltzmann. Esta ecuación, obtenida por primera vez por el físico y matemático alemán Max Planck (1958-1947), constituye uno de los resultados fundamentales de la física moderna, y resultado esencial en el nacimiento y desarrollo de la mecánica cuántica. Una vez fijada la temperatura T , la ecuación nos describe cuantos fotones tenemos para cada valor de la frecuencia ν .

Para el fondo cósmico de microondas, la temperatura que mejor describe las observaciones del tipo de la figura 2 es $T=2,725$ K. con este valor y usando la ecuación (2) se pueden derivar características promedio de la radiación de fondo en la actualidad. Por ejemplo, el máximo de emisión de fondo de un cuerpo negro cumple la denominada Ley de Wien, $\lambda_{max} \cdot T = 2,9 \text{ mmK}$, que nos muestra que la longitud de onda a la que tenemos el máximo de emisión cambia de manera inversamente proporcional a la temperatura. Así, para el valor actual de la temperatura del fondo de microondas tenemos $\lambda_{max} = 1,06 \text{ mm}$. Es decir, el máximo de energía del fondo de microondas esta en forma de fotones corresponde a 1 mm de longitud de onda.

Anisotropías en el fondo cósmico de microondas:

La primera detección del grado de inhomogeneidad del FCM (fondo cósmico de microondas) fue obtenida por el satélite COBE, el cual confirmó en 1992 el espectro de cuerpo negro del fondo de microondas y mostro que las anisotropías (las desviaciones respecto a la

homogeneidad) se encontraban en un nivel de una parte entre cien mil. Por este descubrimiento, los investigadores responsables de la misión COBE, los astrofísicos estadounidenses John Cromwell Mather y George Fitzgerald Smoot, recibieron el premio Nobel en física en 2006.

Una de las imágenes que produjo el satélite COBE se muestra en la figura 3, es la mejor ilustración posible de la isotropía del fondo de microondas, y sin duda constituye uno de los resultados más importantes de la física del siglo XX. Se trata de un mapa de todo el cielo, que representa la intensidad que captamos de la radiación de fondo cósmica en cada dirección de observación. El universo en su pasado era tremendamente homogéneo. Es la mejor prueba del principio cosmológico y la evidencia más clara de evolución en el cosmos.

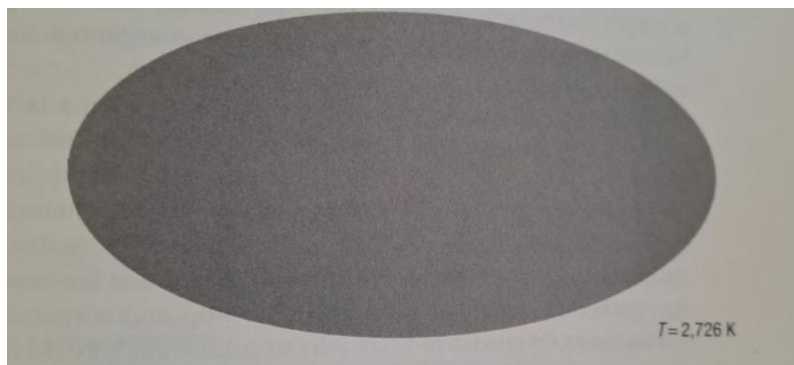


Figura 3

En los últimos años, el avance tecnológico en las antenas y la sensibilidad de los receptores de microondas ha sido espectacular, de forma que experimentos de la Tierra, montados en globos estratosféricos, y otros en satélites (WMAP de la NASA, y Planck de la ESA) nos han proporcionado una imagen muy completa de cómo era el universo a la edad de 380000 años.

La figura 4 es el mejor mapa que tenemos en la actualidad de las anisotropías del fondo de microondas. Fue obtenido por el satélite Planck en 2015 y constituye una imagen directa de nuestro universo recién nacido. El mapa en falso color muestra las pequeñas inhomogeneidades en la distribución primordial de fotones por el cambio de colores, las cuales a su vez trazan semillas para la formación de todas las estructuras que observamos hoy día en el universo, en particular galaxias. Esas variaciones son del orden de decenas de millonésimas de grado Kelvin (microKelvins), y codifican tanto las condiciones físicas del universo en su nacimiento como el contenido energético del mismo.



Figura 4

Este mapa muestra un tipo de mancha característica, que se repite con más frecuencia que las otras en prácticamente toda la imagen. Corresponde a una anisotropía de aproximadamente un grado angular sobre el cielo.