

**TERMODINÁMICA EXTREMA.
I PARTE: LA RADIACIÓN DE MICROONDAS
DE FONDO DEL UNIVERSO**

*Comunicación efectuada
por el Académico Titular Dr. Fausto T. Gratton
en la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires
en la sesión plenaria del 25 de junio de 2012*

TERMODINÁMICA EXTREMA. I PARTE: LA RADIACIÓN DE MICROONDAS DE FONDO DEL UNIVERSO

Académico Dr. FAUSTO T. GRATTON

“En el principio creó Dios los cielos y la tierra...” Génesis 1.1

“Dijo Dios: ‘Haya luz’ y hubo luz.” Génesis 1.2

Prefacio

La termodinámica, nacida del humilde pero práctico estudio del calor y las máquinas térmicas, abarca todos los cuerpos de la naturaleza. Sus predicciones son a veces sorprendentes. En dos cuestiones la termodinámica está presente en configuraciones extremas. Un tema es el fondo cósmico de radiación de microondas (*cosmic microwave background* [CMB] *radiation*) asociada con el origen y la evolución del universo. El otro asunto son los enigmáticos agujeros negros que encierran los más velados secretos de la física y cuya masa - energía domina los centros de las denominadas galaxias activas. El ensayo se divide en dos partes, en esta primera relación se considera la radiación de microondas cósmica.

Desde su origen a principios del siglo XIX, pronto se pensó acerca de lo que la termodinámica podía decir acerca del destino del universo. Rudolf Clausius, padre del concepto de entropía, afirmó en 1865 que la entropía del universo –como sistema aislado porque contiene todas las cosas– crecía con el tiempo y debía tender a un valor máximo. Durante el siglo XX, como consecuencia del progreso de la astrofísica y de la relatividad general cobró vuelo la cosmología, una ciencia del universo que engloba las nociones fundamentales de tiempo, espacio, materia y energía. El distinguido físico norteamericano Richard C. Tolman publicó en 1934 una monografía con el significativo título *Relativity, thermodynamics and cosmology* que tuvo gran influencia en el desarrollo de la disciplina.

Las dos cuestiones mencionadas tienen como marco interpretativo la Teoría de la Relatividad General y la Gravitación de Einstein, que en esta década de 2010 cumple un centenario de las primeras publicaciones y luego de su presentación acabada. Es oportuno celebrar el aniversario del nacimiento de la magnífica unificación de la geometría del espacio-tiempo con los principios físicos fundamentales. En nuestra época la relatividad general es a menudo tomada como modelo por otras complejas teorías que describen las interacciones de las partículas elementales. La asociación de la termodinámica y la cosmología se ha vuelto más estrecha al consolidarse el modelo del Big Bang en la segunda mitad del siglo XX y los descubrimientos de la física y la nueva astrofísica de las últimas cinco décadas.

Este ensayo es un pequeño aporte a ese aniversario. Se recuerdan algunas de las sobresalientes consecuencias de la relatividad general sin transitar por terrenos físico-matemáticos especializados, con una dosis mínima de fórmulas y una exposición comprensible por toda persona culta.

Introducción: relatividad general, astrofísica y cosmología

El siglo XX comenzó con dos eventos científicos cruciales para la cosmología. Uno fue la Teoría General de la Relatividad elaborada por Albert Einstein a partir de 1911-1913 y formulada finalmente en 1916-17. Con la relatividad especial de 1905 Einstein había puesto en evidencia la estrecha vinculación entre espacio y tiempo que ya no podían concebirse como entidades independientes. En 1908 Hermann Minkowski mostró que se podían englobar espacio y tiempo en una sola entidad geométrica de cuatro dimensiones, el espacio-tiempo, cuyas propiedades resumían y reflejaban la relatividad especial.

La relatividad general es una generalización relativista de la gravitación universal de Newton, en la cual la noción de curvatura del espacio-tiempo está asociada con la distribución de materia-energía. Se recordará la equivalencia entre materia y energía de la relatividad restringida, según la célebre fórmula de Einstein $E=mc^2$, de modo que quien dice energía dice también masa y viceversa. El universo es un todo integral, no hay un espacio pasivo por un lado y cuerpos que se ubican en el espacio por otro, como entidades independientes. Los cuerpos modifican las propiedades del espacio y la geometría del espacio - tiempo, la cual a su vez gobierna el movimiento de los cuerpos. Como dijo John Wheeler (uno de los mayores relati-

vistas del siglo XX): “*Matter tells space how to curve, and space tells matter how to move*”.

Las figuras 1 a y b ilustran estos conceptos mediante una analogía propuesta por el gran relativista Arthur Eddington. Se trata de imaginar que una membrana elástica tensada hace las veces de espacio-tiempo. Esferas pesadas deforman la membrana y producen concavidades en su proximidad. En esos huecos, que simulan una acción gravitatoria, ruedan bolitas más pequeñas y algunas pueden quedar girando alrededor de la masa mayor como satélites; tal el caso de la Luna y la Tierra. En la teoría de la relatividad general la fuerza de gravedad de Newton es sustituida por efectos equivalentes debidos a la curvatura del espacio-tiempo.

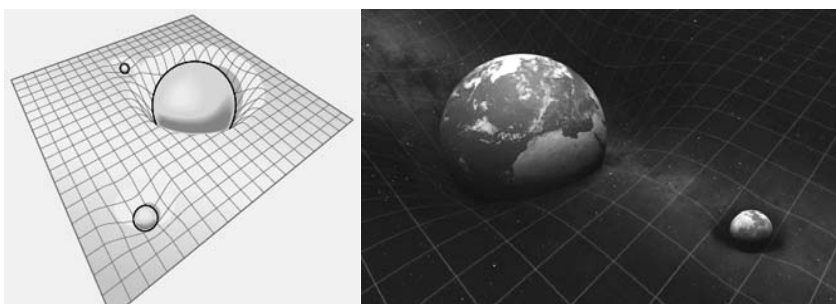


Fig. 1 a, b. *Curvatura del espacio - tiempo: la analogía de una membrana elástica que soporta cuerpos pesados.*

La relatividad general de Einstein se convirtió pronto en la teoría de la gravitación adoptada por la mayoría de la comunidad científica. Después de los éxitos de las primeras décadas del siglo XX, la relatividad general pasó a un segundo plano por el esplendor que tuvieron los descubrimientos de la física nuclear y la física cuántica. Pero más tarde, en la segunda mitad del siglo XX, tuvo un significativo renacimiento y muy importantes confirmaciones experimentales. Naturalmente, la cosmología se funda sobre una teoría de la gravitación porque ésta es la fuerza dominante en la escala cósmica (en la figura 2a: retrato de Einstein en 1912).

Einstein vio enseguida las implicaciones cosmológicas de su teoría y admitió en sus ecuaciones la presencia de un término (que tenía opción de omitir) para controlar las consecuencias de la gravedad. La inclusión del coeficiente Λ , denominado por Einstein “*constante cosmológica*”, significa que la relatividad general también admite la posibilidad de un efecto de repulsión. Éste se torna importante sobre

escalas de distancia muy grandes, del orden del tamaño del universo, pero su influencia es despreciable a escalas mucho menores. Alrededor de 1920 se pensaba que, en promedio, el universo debía ser estático (constante en el tiempo). Pero en tal caso, el efecto de la atracción universal produciría tarde o temprano un colapso gravitatorio de todas las masas del universo. Para prevenir el derrumbe auto-gravitatorio de la materia Einstein introdujo la repulsión en las ecuaciones del campo gravitatorio. Con esto lograba un modelo estático del universo (1916) que él concebía eterno, de acuerdo con su visión cultural influenciada por lecturas de Spinoza.

El segundo desarrollo crucial para la cosmología fueron las observaciones de Edwin Hubble (retrato en la figura 3) realizadas durante la década de 1920 (continuando trabajos pioneros de Vesto Slipher de 1917) según las cuales las galaxias más lejanas parecen alejarse de nosotros con una velocidad v proporcional a su distancia r . Con las investigaciones de Hubble que se conocieron en 1929 los científicos se enteraron con sorpresa que los espectros de la luz de todas las galaxias más distantes viran hacia el rojo. Se empezó a hablar de una “fuga” de las galaxias lejanas, como si todas huyeran de la nuestra.

Dado que no hay razón para pensar que somos espectadores privilegiados, ubicados en el centro del universo, los cosmólogos adoptan un principio de interpretación de las observaciones por el cual esa “fuga”, estadísticamente hablando, tiene siempre el mismo aspecto. Es decir, que se ve del mismo modo cualquiera sea la posición del observador en el cosmos y es pareja en todas las direcciones. Brevemente: la velocidad de fuga de las galaxias lejanas es *isótropa* respecto de cualquier punto del universo. Este principio no es consecuencia de ninguna ley de la naturaleza, es una hipótesis. Según esta interpretación el universo no es estático y se encuentra en expansión.

El principio cosmológico es crucial porque permite extraer de la compleja matemática de la relatividad general algunas soluciones que tienen gran simetría y simplicidad. El tensor métrico del espacio-tiempo se reduce a una expresión manejable y se pueden construir modelos cosmológicos simples. En estas teorías la materia hoy concentrada en las galaxias, se supone distribuida uniformemente en todo el espacio con una densidad de masa constante. Se trata de modelos que representan promedios del cosmos sobre escalas gigantes; las galaxias, las estrellas, los planetas, son detalles microscópicos que en ellos se ignora.

Poco después de conocerse la relatividad general de Einstein, el astrónomo Willem de Sitter, propuso en 1917 un segundo modelo de

universo, en este caso sin materia-energía distribuida, pero en el cual la constante Λ tiene un rol central. En lugar de la noción fundamental de la relatividad general, según la cual la distribución de materia-energía es la que genera la curvatura del espacio-tiempo, de Sitter obtuvo una solución matemática de las ecuaciones de la relatividad general sin materia. Esta solución representa un espacio-tiempo en expansión, en el cual la constante cosmológica $\Lambda \neq 0$ determina la curvatura. En ese tiempo, se empezaba a comentar en círculos astronómicos el hecho curioso de que los objetos luminosos más remotos aparecían con un corrimiento hacia el rojo, como si estuvieran en movimiento respecto del observador. La teoría de de Sitter apuntaba precisamente hacia la posibilidad de un corrimiento al rojo, aunque no predecía la relación lineal entre V y r que más adelante determinaron las observaciones de Hubble (en la figura 2b: una fotografía de de Sitter).



Fig.2 a, b. *Einstein en la época de la Teoría General*



El astrónomo de Sitter.

Sabemos ahora que también Alexander Friedmann en Rusia, luego del convulsionado período de la revolución comunista, había encontrado en 1922-24 soluciones de la teoría general de la gravitación con evolución temporal. Friedmann afectado por problemas de salud murió joven poco después y el trabajo permaneció ignorado. Sólo muchas décadas más tarde se conoció que había encontrado la solución de las ecuaciones de Einstein sin el término cosmológico.

Pero Friedmann, matemático por formación, nunca hizo la conexión con los datos observacionales.



Fig.3. *Edwin Hubble y la “fuga” de las galaxias*

Inicialmente Einstein discrepó con de Sitter y no aceptó sus ideas. Pero alrededor de 1930, después del descubrimiento de que el universo no está en equilibrio y se expande, Einstein comentó que la introducción de la constante cosmológica había sido su “*error más grande*”. En esa década comenzó a interesarse por modelos cosmológicos en expansión y colaboró con de Sitter (1932) en un modelo de universo con $\Lambda=0$ que se expande para siempre.

Einstein tuvo también un intercambio de ideas científicas con George E. Lemaître (1894-1966), quien fue un pionero del Big Bang con un modelo de “*átomo primordial*”¹. A pesar del *mea culpa* de Einstein, el tema de la constante Λ y los modelos de Einstein y de Sitter han reaparecido en las investigaciones cosmológicas de nuestros días, como se dirá más adelante.

Para equilibrar las atribuciones históricas, las soluciones cosmológicas de la teoría de Einstein con una parte espacial homogénea e isotropa se denominan modelos de *Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker* (FLRW) (entre estos, el más difundido se suele llamar modelo cosmológico standard). El corrimiento al rojo es un hecho observacio-

¹ J. E. Peebles cuando trata el modelo de Lemaître en *Physical Cosmology*, escribe: “According to the usual criterion for establishing credit for scientific discoveries Lemaître deserves to be called the ‘Father of the Big Bang Cosmology’”.

nal, tal vez el más significativo de los que sostienen la teoría del Big Bang. Para explicar ese corrimiento se intentaron otras interpretaciones pero ninguna resultó satisfactoria. Finalmente se impuso la que mejor explica y correlaciona muchos hechos, a saber, que la “fuga” de las galaxias lejanas es de origen cosmológico y resulta de la expansión del universo. Se comprendió inmediatamente que si el universo se expande, la consecuencia más importante y significativa es que tuvo un comienzo y que por ende tiene una edad finita.

El corrimiento al rojo y el radio del universo

No es necesario adentrarnos aquí en la variedad de soluciones cosmológicas de la relatividad general. Recordamos solamente algunas breves nociones necesarias para comprender el contexto termodinámico.

Es sabido que muchas propiedades de las estrellas se averiguan mediante el estudio de la luz que emiten. Con técnicas espectroscópicas se puede medir la velocidad con que se mueven respecto de un observador. Numéricamente el corrimiento al rojo se da mediante el cociente z ,

$$z = (\lambda_{obs} - \lambda_{em}) / \lambda_{em} \quad (1)$$

donde λ_{obs} y λ_{em} son las longitudes de onda observadas y emitidas, respectivamente, del espectro que caracteriza átomos conocidos. Si el corrimiento es pequeño, $z \ll 1$, (velocidades no-relativistas) vale la física clásica y la velocidad v de la fuente emisora se obtiene con

$$v = zc \quad (2)$$

donde $c = 3 \times 10^5$ km/s es la velocidad de la luz en el vacío (para un valor aproximado de v alcanza con que sea $z \leq 0.5$). Cuando el espectro se desplaza hacia longitudes de onda mayores, el emisor muestra un corrimiento Doppler hacia el rojo. Midiendo el desplazamiento se deduce la velocidad del emisor y sabemos que se aleja de nosotros. Si se acercara, veríamos en cambio un desplazamiento del espectro hacia longitudes de onda menores, o sea un corrimiento hacia el azul.

Para valores de z más grandes, digamos $z \sim 1$ o mayores, la fórmula $v = zc$ se reemplaza con una expresión relativista

$$z = [(1+v/c)/(1-v/c)]^{1/2} - 1 \quad (3)$$

(tal que $z \rightarrow \infty$, cuando $v \rightarrow c$). Por ejemplo, al valor $z=4.9$ del quasar (*quasi-stellar object*) más lejano conocido, le corresponde una velocidad de recesión de $v/c=0.94$.

Está claro que estas velocidades no tienen sentido como velocidad del movimiento propio de una galaxia, o proto-galaxia. A grandes distancias en el cosmos ya no se trata de la velocidad del movimiento de una fuente luminosa, no es el efecto Doppler tradicional. Si el universo se expande, todas las distancias aumentan en cualquier dirección se mire. El corrimiento al rojo es una manifestación de la expansión del universo y podemos relacionarlo con la escala (variable con el tiempo) de longitudes.

La velocidad de expansión aumenta linealmente con la distancia, como encontró Hubble a fines de la década de 1930. La constante de proporcionalidad, H , que aparece en la ley de expansión

$$v = Hr \quad (4)$$

se denomina constante de Hubble. Esta constante tiene por unidad la inversa de un tiempo, luego $1/H$ debe ser una constante de tiempo relacionada con la edad del universo.

La medición de la constante de Hubble ha sido uno de los objetivos principales de las investigaciones cosmológicas de los astrónomos durante muchas décadas. Los datos a principios del 2000 daban para H alrededor de 72 km/s por Mpc (los astrofísicos emplean cantidades expresadas en una unidad híbrida). El parsec (abreviatura pc, 1 Mpc = 10^6 parsec; el megaparsec vale 3.09×10^{19} km = 3.26×10^6 a.l., años luz; 1 año = 3.16×10^7 s) es la distancia de un objeto para el cual se observa un paralaje (aparente) de 1" de arco a través del diámetro de la órbita terrestre. La distancia de los cuasars más lejanos observados es $\sim 10^4$ Mpc. El valor de H estuvo sujeto a considerable incerteza, $H= 50$ km/s por Mpc era el valor favorecido hace dos décadas. Hoy el mejor valor es $H = 73.8 \pm 2.4$ km/s por Mpc (Riess et al. 2011).

A partir de H se introduce un factor de escala cósmico R (que puede ser llamado "radio" del universo) mediante la relación

$$H = (1/R) (dR/dt) = d \ln(R) / dt ; \quad (5)$$

que define $R=R(t)$ como función del tiempo a menos de una constante

multiplicativa ($R \rightarrow KR$), que se elige convenientemente en los modelos cosmológicos.

Indicando con $R(t_2)$ el radio del universo al momento de observar la radiación y con $R(t_1)$ el valor a un tiempo anterior en el cual fueron emitidos los fotones, podemos escribir

$$v_{em}/v_{obs} = \lambda_{obs}/\lambda_{em} = R(t_2)/R(t_1) = 1+z \quad (6)$$

donde hemos indicado con ν las frecuencias de la radiación. Así, por ejemplo, $z=1$ implica emisión en un tiempo en el cual el radio del universo era la mitad del valor actual.

La consideración del corrimiento al rojo observacional como relación de las escalas de longitud del universo (actual *versus* época de emisión) es independiente del modelo cosmológico. La ecuación (6) tampoco depende de que la velocidad sea relativista o no-relativista. En cambio, la relación escala - tiempo es decir, la ley $R(t)$ es peculiar de las propiedades de cada modelo.

Dicho de otro modo, puesto que el universo se expande todas las longitudes aumentan y un corrimiento al rojo z quiere decir que el fotón fue emitido en una época en la cual la escala de longitudes del universo era una fracción $1/(1+z)$ del valor actual. La traducción de $1+z$ en una distancia (de la fuente que emitió el fotón) y un tiempo (la edad de la emisión) depende de los detalles del modelo cosmológico. Pero la interpretación de $1+z$ como relación de escalas de longitud del universo, es decir de “radios” cósmicos, es independiente del modelo.

El Big Bang y la síntesis primordial de los núcleos livianos

Otra evidencia del Big Bang, aunque indirecta porque en su construcción interviene un cálculo teórico de reacciones nucleares, proviene de otras observaciones: el estudio estadístico de la composición química de la materia visible del universo. A lo largo de muchas décadas los astrofísicos han acumulado evidencia sobre la distribución de los elementos en la materia observable del universo. Sabemos, por ejemplo, que alrededor del 75 % de la materia que irradia (ondas electromagnéticas) está constituida por hidrógeno, el elemento más liviano y por cerca de 24 % de helio, que en el orden de peso es el átomo que sigue en la tabla de los elementos. Después se detectan otros elementos pero en proporciones mucho menores. Se

han determinado porcentajes promediados sobre observaciones en todas las direcciones del espacio y a todas las distancias. La cosmología debe poder explicar esta particular composición: ¿por qué 75 % de hidrógeno, por qué 24 % de helio y pequeñas fracciones de otros isótopos livianos?

Esta evidencia experimental tiene una buena explicación en la cosmología del Big Bang. La teoría de la génesis nuclear de los elementos livianos fue desarrollada durante la década de 1940 por George Gamow, con aportes de Hans Bethe y luego con la colaboración de Ralph Alpher y Robert Herman. La denominada nucleogénesis del Big Bang muestra cómo, en un período comprendido entre 1 y 200 segundos desde el comienzo del universo, se produjo una síntesis nuclear primordial a partir del hidrógeno.

El Big Bang predice temperaturas enormes en el universo temprano. Un segundo después del comienzo $T \sim 10^9$ K, el universo era un gas mezcla de neutrones, protones, electrones, anti-electrones (positrones), fotones y neutrinos. A medida que el universo se enfrió durante la expansión, los neutrones decayeron en parte en protones y electrones y en parte se combinaron con los protones para formar deuterio ($D = {}^2\text{H}$, un isótopo del hidrógeno H). Durante los tres primeros minutos la mayor parte del deuterio se fusionó para producir helio, una muy pequeña parte de un isótopo del helio (He) y una minúscula fracción de litio (Li). A partir de los protones (H ionizado) los procesos nucleares generaron principalmente ${}^4\text{He}$ con una fracción de masa primordial cercana al 24 %. Los cálculos dan también pequeñas abundancias de isótopos livianos: D y ${}^3\text{He}$ con cerca de 10^{-5} y ${}^7\text{Li}$ alrededor 10^{-10} , donde estas fracciones son expresadas en números respecto de H.

El carbono, el oxígeno y los otros elementos más pesados no se produjeron en la síntesis primigenia. Hubo que esperar que el carbono se generara en el interior de la primera generación de estrellas. Luego, los elementos formados son lanzados al espacio con la explosión con que culmina la vida de las estrellas y se mezclan con el material interestelar residual. A partir de este material enriquecido por elementos pesados, se formará otra generación de estrellas y podrá continuar la síntesis de los elementos pesados en estrellas de sucesivas generaciones. Para ello se tiene que desarrollar un largo proceso evolutivo: la recombinación del plasma, el desacoplamiento de la radiación de la materia, la formación de las galaxias y la evolución de las estrellas.

La radiación residual de fondo en microondas

Los estudios teóricos de universos en expansión constituyeron la principal actividad de la cosmología durante varias décadas en la primera parte del siglo XX. Había pocas evidencias directas a favor de la expansión distintas del corrimiento al rojo de las galaxias. La situación cambió drásticamente en 1965 con el descubrimiento de la radiación de fondo cósmica en microondas (CMB, *cosmic microwave background*).

Esta radiación llega hasta nosotros desde todas las direcciones del espacio. Ha venido propagándose desde la formación de los átomos (la recombinación de protones con electrones) en el universo temprano, al final de la época de plasma, cuando su edad era de unos 400.000 años. El descubrimiento de la radiación de microondas de fondo dio un espaldarazo fundamental a la teoría de la expansión del universo y al modelo cosmológico del Big Bang. La termodinámica tuvo un papel protagónico en la confirmación de la interpretación cosmológica de la CMB.

En 1965 dos científicos de los Bell Laboratories de Crawford, New Jersey, Estados Unidos, realizaron sin proponérselo el importante descubrimiento. En la década de 1960 Arno Penzias y Robert Wilson trabajaron con un gran radiómetro de microondas, muy sensible y construido originalmente para conectarse con los satélites de telecomunicaciones Telstar (ver. Fig.4). Estaban interesados en la radioemisión de los restos de la supernova Cassiopeia A, pero les molestaba una fuente de ruido uniforme que creyeron provenía del instrumento e intentaron infructuosamente eliminar. Finalmente se convencieron que la radiación era real y que llegaba de todas las direcciones del cielo. Habían descubierto radiación en la banda de microondas de 160 GHz, que corresponde a la que emite un cuerpo negro con una temperatura cercana a los 3 grados Kelvin. Un cuerpo negro, como se sabe, es un sistema en equilibrio térmico que absorbe toda la radiación que recibe y la vuelve a emitir luego de reasignar esa energía a un continuo de frecuencias con una función espectral característica. Es la conocida Ley de Planck, con la cual Planck dio el primer paso hacia la física cuántica en el año 1900.

Luego de asistir a un coloquio de P.J. Peebles en el cual se discutió acerca de una radiación fósil de origen cosmológico, Penzias y Wilson decidieron consultar a Robert Dicke, distinguido astrónomo de la vecina Universidad de Princeton y director del grupo científi-



Fig.4. *Penzias, Wilson y el radiómetro con el cual detectaron la CMB*

co del cual formaba parte Peebles. Con su ayuda, se realizó la identificación de las microondas de 160 GHz como de origen cosmológico: un residuo del universo temprano (Fig. 5a). En 1978 Penzias y Wilson obtuvieron el premio Nobel por este descubrimiento. Se habían adelantado sin saberlo al grupo de Dicke, que estaba construyendo un radiotelescopio con el propósito de detectar la radiación cosmológica. Dicke a su vez ignoraba las publicaciones precedentes de Gamow en 1948 y de Alpher y Herman en 1950, que contenían una predicción teórica de la existencia de una radiación primordial, aunque estos autores no habían propuesto la detección experimental (Fig. 5b).



Fig.5 a. *John Dicke: interpretación de la CMB.*



b. *George Gamow: Big Bang y nucleogénesis.*

El hallazgo de la CMB hizo pensar que posibles fluctuaciones de la temperatura con la dirección de observación, es decir los apartamientos de la isotropía del flujo de la radiación, podían estar ligadas con las primitivas perturbaciones de densidad del universo, que con el transcurso del tiempo iban a dar lugar al crecimiento de las galaxias y los cúmulos de estrellas. Al comienzo los teóricos estimaron variaciones en la amplitud de la temperatura del uno por ciento, pero este nivel de resolución fue superado pocos años después por los experimentales y las fluctuaciones no aparecieron. Así pasaron algunas décadas durante las cuales los observadores mejoraban la precisión de los detectores, mientras los teóricos revisaban sus estimaciones de las fluctuaciones del universo temprano. A un cierto punto, cuando la resolución de las observaciones mostró que las fluctuaciones debían estar por debajo del uno por mil, los investigadores comprendieron que las variaciones de densidad de la materia ordinaria, la llamada densidad “bariónica”, no podrían haber tenido tiempo de desarrollarse y generar las estructuras astronómicas visibles en el presente.

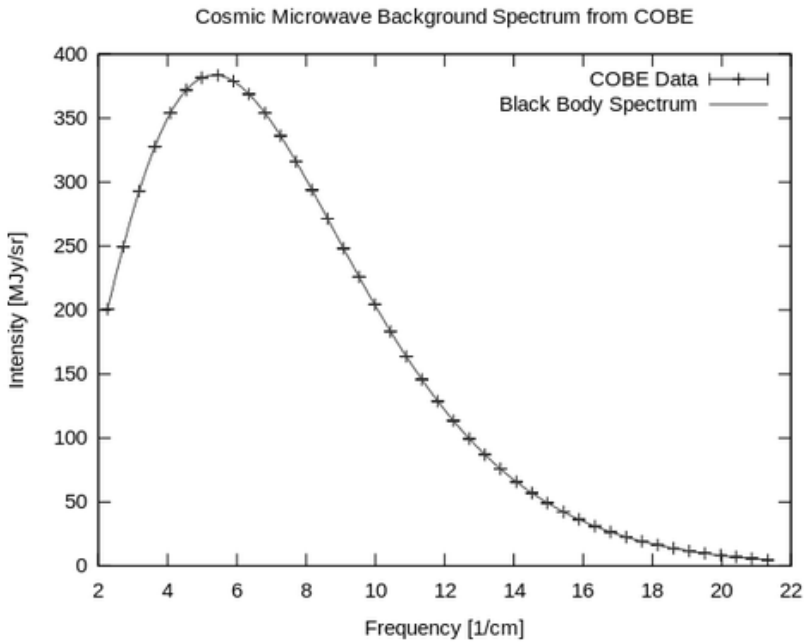


Fig. 6. Espectro de la CMB medido por COBE y la teoría termodinámica (Ley de Planck) - NASA

Entonces los teóricos comenzaron a hablar de una componente de materia desconocida, denominada “*materia oscura*” (no visible) cuya acción gravitacional debía ser dominante².

Hacia fines de la década de 1980 el límite observacional de las fluctuaciones de temperatura de la CMB estaba bien por debajo de una parte en diez mil y los cosmólogos se hallaron en serias dificultades para reconciliar el modelo de Big Bang standard con un nivel tan pequeño de fluctuaciones primigenias. Hasta el presente la formación de las estructuras astronómicas sigue siendo uno de los argumentos relevantes en favor de la hipótesis de materia oscura no bariónica.

Por fin las fluctuaciones fueron detectadas por el satélite COBE (*Cosmic Background Explorer*) de NASA en 1990, con una amplitud de algunas cienmilésimas, nivel que pudo acordarse con las predicciones de ciertos modelos cosmológicos con super-inflación inicial asociada a materia oscura fría (*cold dark matter*). Los resultados de COBE, confirmados por otras mediciones, han generado una intensa actividad sobre la CMB en la cosmología de nuestros días. En la figura 6: el espectro de la CMB medido por COBE y la comparación con la teoría termodinámica (Ley de Planck de la radiación de cuerpo negro), que revela un acuerdo extraordinario.

Cabe comentar también que el descubrimiento de la CMB constituyó el golpe de gracia para el modelo de universo estacionario con creación de materia de Gold, Bondi y Hoyle, que en la década de 1950 había rivalizado con el Big Bang.

El universo temprano: desacoplamiento de la materia y la radiación

Como se sabe, al aumentar la temperatura crece la energía media de los componentes atómicos de la materia y se pueden producir cambios de fase. Agregando cada vez más energía a una porción de

² Hasta hoy convivimos con un enigma que recibe el nombre de “materia oscura”. Hay una especie de materia completamente desconocida que interactúa con la materia ordinaria solamente a través de la gravedad: no produce radiación electromagnética y por lo tanto es invisible. Sus efectos se detectan indirectamente por su influencia gravitatoria. La materia oscura tiene importancia crucial en el mantenimiento de la estructura de las galaxias. También afecta la escala cósmica del universo y representa cerca de un 30 % de la materia-energía total pero desconocemos su constitución y origen.

materia ésta se termina por desintegrar. Primero se funde y licúa, luego a una temperatura mayor aún pasa a la fase gaseosa. A temperaturas todavía más grandes, alrededor de 10^3 K, las moléculas del gas se rompen y gases diatómicos, como el hidrógeno o el oxígeno, se disocian y se convierten en gases monoatómicos. A temperaturas aún más altas, $3-4 \times 10^3$ K, los electrones se separan del núcleo de los átomos. La ionización produce un plasma, es decir, una mezcla gaseosa de electrones e iones libres. Podemos seguir considerando esta sucesión de cambios de estados de la materia. Arriba de los 10^9 K la radiación es tan energética que resulta un plasma formado por electrones y positrones, es decir materia y antimateria, además de mesones y bariones. Si la temperatura sigue aumentando, a partir de 10^{12} K y más, se liberan los constituyentes más profundos de la materia, las partículas del núcleo - protones y neutrones y eventualmente a mayor energía los componentes sub-nucleares, los quarks.

Cuando imaginamos retroceder en el tiempo a partir de la distribución actual de galaxias, la ley de Hubble nos lleva al momento en el cual la densidad de masa-energía era extraordinariamente (diríamos, infinitamente) grande, el Big Bang. El universo comienza en un estado de altísima concentración de energía y se expande con una explosión. El tiempo t_0 transcurrido desde el origen hasta hoy es la edad del universo, comprendida entre ~ 13 y 15×10^9 años. La estimación que mejor ajusta observaciones y datos de distinto origen es $t_0 \approx 13.8 \times 10^9$ años. Estudios de formación de estructuras, radiación CMB y estructuras de gran escala, dan $t_0 = 13.77 \pm 0.13 \times 10^9$ años (Komatsu et al., 2011). Cabe esperar, como se ha dicho, que la edad del universo sea del mismo orden de magnitud que la inversa de la constante de Hubble, $t_0 \sim 1/H \approx 14 \times 10^9$ años y en efecto se comprueba esta concordancia.

Dado que la luz tarda un cierto tiempo en llegar hasta nosotros, mirar los objetos más lejanos significa ver las etapas más antiguas del universo. Si pudiéramos mirar suficientemente lejos veríamos como se inició todo. Pero esto no es posible porque a partir de un cierto momento –alrededor de 400.000 años desde el comienzo– no podemos penetrar más atrás con la visión. Hay una “nube”, en sentido figurado, que se extiende sobre lo que ocurrió en esa primera etapa. El universo temprano era muy denso y muy caliente, la materia estaba desarticulada en sus componentes elementales y las partículas libres coexistían con un baño de radiación electromagnética. El camino libre medio de la luz, la longitud que recorre un fotón entre una dispersión (*scattering*) y otra era muy pequeño y la luz no se podía

propagar sin ser continuamente dispersada. Esta es una propiedad típica de un plasma de alta densidad, es decir de un gas formado por electrones y núcleos atómicos separados.

Recapitulando, a partir del inicio hay un complejo desarrollo combinado de energía y materia. Durante los primeros 400.000 años, velado por la “*niebla*” que impide la observación electromagnética directa, tenemos el universo temprano (*early universe*) en el cual la física de partículas elementales domina la escena y proporciona un cierto conocimiento (aunque provisorio e hipotético) de esa etapa. Hay evidencia indirecta de la evolución nuclear primordial en los primeros minutos, como hemos señalado. A partir de los $\sim 400,000$ años de edad, luego de la recombinación de electrones y núcleos para formar átomos neutros, el gas primordial deja de estar ionizado, se torna transparente para la luz y podemos investigar y especular acerca de las fluctuaciones que mucho más tarde, hace unos 10.000 millones de años (10×10^9 años) generaron las galaxias.

Para el tema que estamos tratando interesa el período, alrededor de los 400,000 años desde el comienzo (por lo tanto $\sim 13 \times 10^9$ años atrás) en el cual, debido a la reducción gradual de temperatura, el plasma primordial se ha recombinado. Ello ocurre a temperaturas algo menores a $1\text{eV} \approx 1.1 \times 10^4$ °K, una estimación razonable es $T^* = 3000$ °K. La energía de ionización del hidrógeno (la energía de ligadura del estado fundamental) es de 13.6 eV, equivalente a una temperatura de 15×10^4 °K, pero la mecánica estadística muestra que la ionización del gas es ya importante a temperaturas de un orden de magnitud inferiores.

A temperaturas menores de T^* el plasma se ha recombinado rápidamente y la materia se ha vuelto transparente: ello ocurre para valores de $z \approx 1100$. Se estima que a valores inferiores de z los fotones pueden viajar libremente a través del universo hasta el momento actual. Ello se debe a que la probabilidad de dispersión durante ese trayecto es muy pequeña. La radiación primordial se desacopla completamente de la materia. Esos fotones traen información acerca del estado del universo en la época de la recombinación, del tiempo de su última dispersión por el plasma del universo temprano.

La radiación CMB corresponde a un máximo espectral de cuerpo negro asociado a la temperatura $T = 2.7255 \pm 0.0006$ °K según mediciones muy precisas realizadas por el satélite COBE (Mather et al. 1999). Señalemos que, una vez descontadas las anisotropías debida a movimientos locales, la radiación CMB es isotrópica con gran exactitud. Se observa en todas las direcciones del espacio con casi

perfecta uniformidad, pero como se ha dicho en la década de 1990 el mundo científico fue sacudido por la noticia de que COBE había podido detectar algún grado de no homogeneidad en la radiación de fondo.

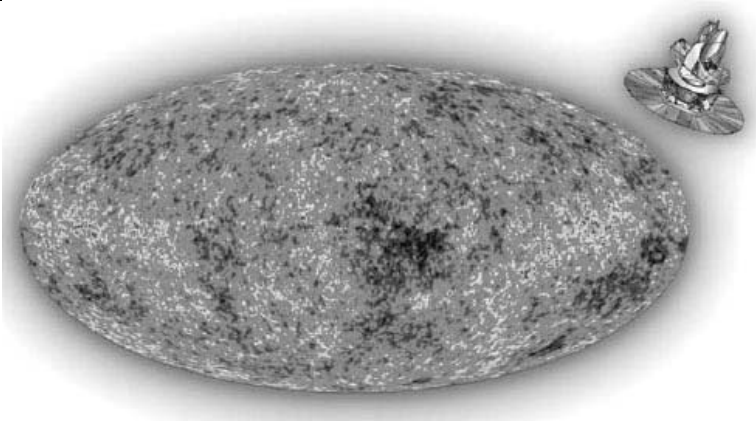


Fig.7. Las anisotropías de la CMB observadas por WMAP (NASA)

Las minúsculas diferencias de uniformidad registradas entonces por COBE han sido confirmadas por observaciones de alta resolución más recientes por el *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP), satélite lanzado por NASA en 2001 (ver figura 7). Son muy importantes porque revelan las fluctuaciones de densidad en el universo primitivo al tiempo de la recombinación y permiten la ubicación temporal del comienzo de la formación de galaxias. Este aspecto de la CMB es como la pieza de un rompecabezas: va completando una visión de conjunto que consolida la teoría del origen del universo. La investigación de estas fluctuaciones es uno de los temas más importantes de la cosmología actual.

No es el propósito del ensayo una revisión de la cosmología actual, se omiten por brevedad muchos temas muy significativos. Se dejan de lado cuestiones de la mayor importancia tales como la hipótesis de una etapa inicial de expansión super-rápida (*la gran inflación*), el problema del predominio de la materia sobre la antimateria y la cuestión de la “masa oscura” (*dark matter*) o masa faltante, alguna apenas mencionada al pasar.

Pero no se puede dejar de señalar aunque sea brevemente otro descubrimiento mayor. Ochenta años después del “traspie” de Einstein con la constante Λ , sorpresivamente una repulsión de gran escala aparece en observaciones más refinadas y precisas. La acele-

ración de la expansión fue anunciada hace 14 años por Saul Perlmutter, Brian Schmidt y Adam Riess. Estos investigadores recibieron el premio Nobel el año pasado, 2011. El fin del siglo XX fue marcado por ese descubrimiento. Luego de una etapa de crecimiento con ritmo constante, la expansión del universo se está acelerando. La fuente de esta misteriosa fuerza que se opone a la gravedad es denominada “energía oscura”³. Algo semejante a la constante cosmológica surge nuevamente con otro vestido (esquema de la aceleración de la expansión en figura 8 - Nasa).

Cuando Feynman, Dyson, Tomonaga y otros físicos de la década de 1950 completaron el desarrollo de la electrodinámica cuántica, confirmaron que el espacio vacío (sin materia) está temporáneamen-

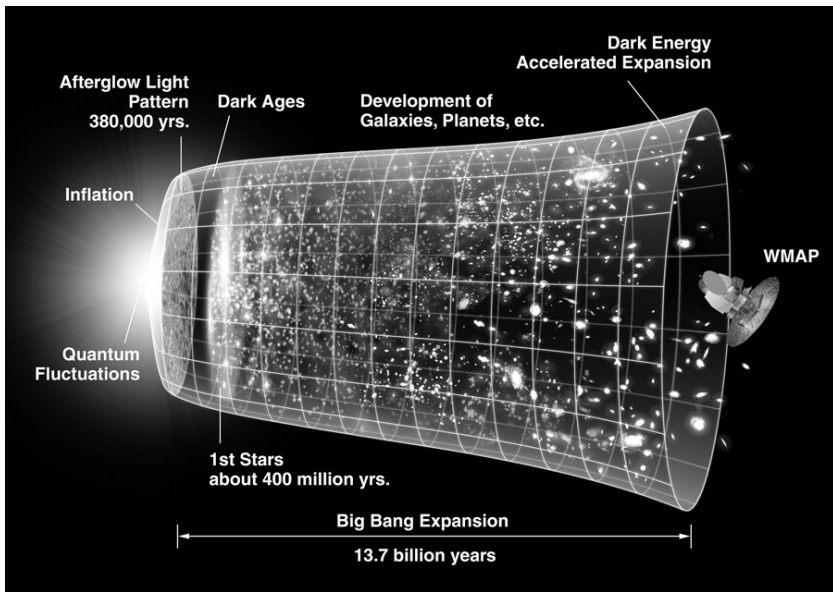


Fig.8. Esquema del Big Bang con la aceleración de la expansión. NASA

³ Otra cuestión misteriosa lleva el nombre de “energía oscura” y es una de las cuestiones irresueltas de la física de las partículas elementales. En el modelo cosmológico standard es apenas el agregado de un término constante en las ecuaciones de la relatividad general (la constante cosmológica Λ) y es responsable de la aceleración de la expansión. Luego de muchas décadas en las que se pensó que era nulo, ahora este coeficiente ha sido medido y tiene un pequeño valor positivo. La interpretación física es la de una densidad de energía del espacio-tiempo, pero el origen y la explicación mediante las teorías cuánticas de campos y otras que se intentan siguen envueltos en la bruma.

te lleno de partículas “*virtuales*” que se forman y se destruyen continuamente, tal como había sido imaginado en la década de 1930. Los físicos comenzaron a sospechar que el espacio (el “vacío cuántico” como estado fundamental de los campos de fuerza) es depositario de una forma de energía oscura, cuya magnitud no podían predecir con la teoría existente. Las mediciones más recientes sobre la expansión del universo ponen de relieve que el célebre “tropezón” de Einstein, no fue un error después de todo. Una forma de energía desconocida parece dominar por sobre la materia-energía total del universo y esa extraña fuerza repulsiva está estirando la escala fundamental del radio de curvatura.

Se ignora si la etapa de “*inflación*” de la expansión del universo recién formado y la actual expansión debida a energía oscura, tienen siquiera algo que ver una con otra. La energía oscura es un gran problema para todas las variantes de física teórica fundamental de hoy. Con la aceleración de la expansión los temas de Einstein y de Sitter de la década de 1930 vuelven a ser una referencia relevante de la cosmología contemporánea.

La termodinámica y el fondo de microondas cósmico (CMB)

Una muy citada paradoja debida a Olbert - 1826, en su versión actualizada afirma que en un universo euclidiano (infinito, sin curvatura) el brillo de la superficie de fondo es independiente de la distancia. En ese mundo cualquier línea visual necesariamente termina en materia (habría siempre estrellas, una tras otra, sin fin), caliente lo suficiente como para ionizar y dispersar fotones, i.e., $T > 10^3$ °K. Por lo tanto, el cielo debería ser tan brillante como la superficie del Sol, sin días y sin noches. La razón por la cual el cielo nocturno es oscuro y la noche sin Luna es negra salvo las titilantes estrellas cercanas, se explica con la expansión de universo la cual enfría la temperatura de la radiación de fondo a unos 2.73 °K. Tolman, en la monografía teórica de 1934 citada, ya había mostrado que en un universo en expansión la radiación de cuerpo negro mientras se enfría permanece en equilibrio térmico. Como consecuencia de la expansión la ley de la radiación de cuerpo negro tiene ahora su máximo alrededor de las longitudes de onda de 1 mm y produce la radiación de fondo de microondas (CMB).

¿Cómo interviene la termodinámica en este proceso y cómo explica la temperatura de fondo observada? Con la información dada

hasta aquí, la termodinámica de la radiación luego de la recombinación del plasma se plantea de un modo muy simple.

A partir de la ecuación $R(t)=R(0)(1+z)$ se desprende que la escala de longitudes crece proporcionalmente a $(1+z)$ y que por lo tanto el volumen varía como

$$V=V_0 (1+z)^3 \quad (7)$$

indicando con V el volumen actual y con V_0 el volumen al tiempo de la recombinación. Asumiendo la termalización de la radiación previa a la recombinación, la temperatura actual de la radiación se debe a la expansión de un gas de fotones. Esa evolución es adiabática dado que el universo es por definición un sistema aislado y su entropía se conserva. Los fotones ya no intercambian energía con la materia y su entropía se conserva por separado. Luego la evolución del gas de fotones es una expansión adiabática.

Debido a la naturaleza transversal de las ondas electromagnéticas los fotones tienen dos grados de libertad $f=2$, de modo que el índice adiabático de esas “partículas” es $\gamma=(f+2)/3=4/3$ (como asegura la mecánica estadística). La bien conocida ley de las transformaciones adiabáticas de un gas ideal $pV^\gamma=\text{constante}$ (p : presión; V : volumen), se puede reescribir como $V^{(\gamma-1)} T=\text{constante}$. De aquí resulta

$$T=T_0/(1+z) \quad (8)$$

y poniendo $T_0 = T^* \approx 3000$ °K, valor asociado a $1+z=1100$ se obtiene $T \approx 2.73$ °K para la temperatura actual de la radiación de fondo, en concordancia con las observaciones.

Podemos notar que para la materia (básicamente un gas monoatómico) el exponente adiabático es en cambio $\gamma=5/3$ y se obtiene

$$T=T_0/(1+z)^{5/3} \quad (9)$$

o sea, una temperatura media mucho menor que la de la radiación CMB. Se entiende que se trata de la materia (casi todo hidrógeno monoatómico interestelar e intergaláctico) que no está confinada en las estrellas, siendo esta última de todas maneras una fracción minoritaria.

Dado que para la radiación de cuerpo negro la energía se rige por la ley de Stefan-Boltzmann

$$E = uV = \alpha T^4 V, \quad (\alpha = 7.56 \times 10^{-16} \text{ J/K m}^3) \quad (10)$$

y que la entropía es

$$S = (4/3)(E/T), \quad (11)$$

se comprueba fácilmente que

$$E = E_0 / (1+z), S = S_0. \quad (12)$$

Es decir que la entropía de la radiación de fondo permanece constante, como cabía esperar porque hemos argumentado que la expansión es adiabática.

El número de fotones es proporcional a E/T , cociente que no depende de z (en esta etapa del universo) y por lo tanto el número de fotones de la radiación de fondo también se mantiene constante. Los datos de WMAP restringen la densidad de materia bariónica en relación con la densidad de fotones al valor $n_B/n_f = 6.14 \pm 0.25 \cdot 10^{-10}$, para la época de la nucleosíntesis. Por qué el cociente n_B/n_f es tan pequeño y no cero, es una de las incógnitas de la cosmología del Big Bang, denominado el problema de la bariogénesis. De lo dicho se concluye que en la etapa actual la entropía del universo reside en gran medida en la radiación de fondo de microondas y no en la materia.

Por lo menos así se pensaba hasta algún tiempo atrás. Pero resulta así cuando el balance no toma en cuenta los agujeros negros, de los cuales en el pasado cercano no había prueba firme de existencia. Ahora en cambio se ha acumulado mucha evidencia y su importancia cosmológica se ha puesto de manifiesto en tiempos recientes. Otra de las maravillosas predicciones de la teoría de Einstein. Los agujeros negros, según parece, pueden contener ciclópeas cantidades de entropía. Pero esta cuestión se deja para la II parte del ensayo sobre termodinámica extrema,

*“...perché nuovi accidenti a nascere hanno
per disturbarle, de’quai le novelle
all’altro canto vi faró sentiré,
s’all’altro canto mi verrete a udire.”
Ariosto, Orlando Furioso, IX, 94⁴.*

⁴ “...porque nuevos accidentes han de nacer que las perturbarán, noticia de los cuales os haré saber en el otro canto, si al otro canto me vendréis a oír”.

Post Illa. La idea de *Termodinámica Extrema* proviene de dos lecciones dictadas en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA (2003-2004) ahora elaboradas y actualizadas. Los dos textos son una contribución a la celebración del primer centenario de la teoría general de la relatividad en la Academia.

Referencias

- Berry, M., *Principles of cosmology and gravitation*, Cambridge, 1976.
- Cervantes-Cota, J. L. and G. Smoot, *Cosmology today – A brief review*, arXiv:1107.1789v2, 14 Nov 2011.
- Clifford, Will M., *Was Einstein Right?*, Harper Collins, 1986.
- Davies, Paul, Editor, *The New Physics*, Cambridge University Press, 1989.
- Gratton, Fausto T., *Notas sobre el tiempo en la cosmología contemporánea*. En Epistemología de las Ciencias. El Tiempo (I parte), pp.177-215, CIAFIC Ediciones, Buenos Aires, 1997.
- Gratton, Livio, *Cosmologia*, Zanichelli, Bologna, 1987.
- Gratton, Livio, *Origine ed Evoluzione dell'Universo*, La Nuova Italia Scientifica, Roma, 1992.
- Lanczos, Cornelius, *The Einstein Decade*, Academic Press, New York and London, 1974.
- Marinoni, C., J. Bel and A. Buzzi, *The Scale of Cosmic Isotropy*, arXiv:1205.3309v1, 15 May 2012.
- Melrose, Donald B., *Thermodynamics Lecture Notes, Thermodynamics in Astrophysics and Cosmology L8* (pdf), School of Physics, University of Sydney, 2002.
- Misner, C. W., K. S. Thorne and J. A. Wheeler, "Gravitation", Freeman and Co., San Francisco, 1973.
- Neuenschwander, D. E., *The de Sitter Universe and Redshifts*, Radiations, Fall 2008.
- Overbye, Denis, *Lonely Hearts of the Cosmos: The Story of the Scientific Quest for the Secret of the Universe*, Harpers & Collins, New York, 1992.
- Olive, K. A. and J. A. Peacock, *Big-Bang Cosmology*, (pdf, University of Minnesota - University of Edinburgh), September 2011.
- Peebles, James E., *Physical Cosmology*, Princeton University Press, 1971.
- Penrose, R., *The Roads to Reality*, Random House, 2004.
- Penrose, R., *Cycles of Time*, Vintage, NY, 2010.
- Prosperi, Giovanni M., *Il Problema del Tempo nella Fisica*, en Epistemología de las Ciencias, El Tiempo, Ciafic Ediciones, Buenos Aires, 1997.
- Realdi, M., *The Universe of Willem de Sitter* (pdf, Dep. Astronomy, University of Padova, Italy).
- Reeves, Hubert, *L'Evolutione Cosmica*, Rizzoli, Milano, 1993.
- Smolin, Lee, *The trouble with physics*, Mariner Books, NY, 2007.
- Tolman, R. C., *Relativity, thermodynamics, and cosmology*, Clarendon, 1934.