

## LA RUTA DE LA LUZ

Jesús López [jeslopez@uol.com.ar](mailto:jeslopez@uol.com.ar)

Quien no sabe hoy que el universo se expande? Quizás sea uno de los temas más trillados tratados desde la escuela primaria. Con este comprimido artículo agregaremos un breve granito de arena a la literatura existente, quizás aclarando algunos temas borrosos.

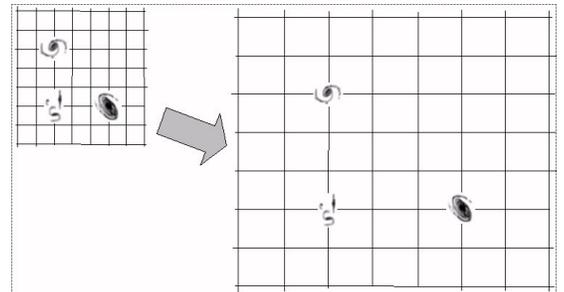
No parecen contradictorias las tremendas distancias que nos separan de los objetos más lejanos (quasars, GRB's, etc) cuando sabemos que cuando emitieron la luz que vemos hoy estaban muy cerca nuestro? Si el Big Bang ocurrió hace tanto tiempo, porqué todavía vemos su radiación como la radiación cósmica de fondo?

Algo no tan conocido es el hecho de que a medida que vemos objetos más lejanos, su tamaño aparente disminuye (esto es lo normal) pero a partir de cierta distancia empiezan a crecer en apariencia, como si estuvieran bajo una lupa cósmica.

El motivo de este artículo es dar las razones de estos fenómenos, a través de una revisión de lo que hoy sabemos. Todo lo que conocemos de los objetos cósmicos es a través de la radiación electromagnética (para abreviar: luz, pero comprende también la radiación X, gamma, UV, IR y radio). Además, absolutamente todo lo que vemos viene con información atrasada, desde nanosegundos hasta miles de millones de años. Cuanto más lejos, mayor demora. Para el mundo doméstico esa demora no es ni siquiera notable, pero para el universo cósmico el retardo es enorme!

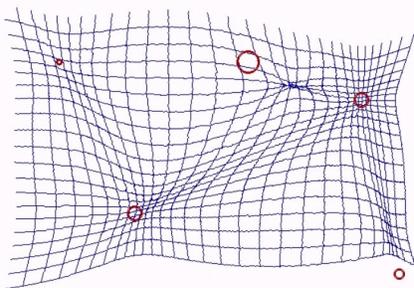
### Como se expande el espacio?

Poco después que Edwin Hubble descubriera la huída generalizada de las galaxias, los teóricos Friedmann, Walker, Robertson y DeSitter (FWR) propusieron un modelo que explicaba lo observado. Si se marca al espacio con una grilla imaginaria de referencia, ésta se expande en forma proporcional. Esta expansión no comprende a los objetos con una fuerte ligazón



*Fig 1 La grilla espacial se expande en forma proporcional.*

Distortion of Space Grid Caused by Density Concentrations



*Fig 2 La expansión despareja de la grilla debido a acumulaciones de masa.*

gravitacional (planetas, galaxias). De este modo aparecen dos métricas: la doméstica y la cósmica. Medida con la métrica doméstica (metro patrón, longitud de onda del Cesio, etc), la cósmica va creciendo con la expansión, y las galaxias se alejan entre sí. Pero si medimos con la métrica cósmica, las galaxias permanecen inmóviles en su grilla (salvo los movimientos particulares que son de pequeña significancia).

### El efecto Doppler

Los astrónomos evalúan las velocidades de los objetos a lo largo de la línea de visión

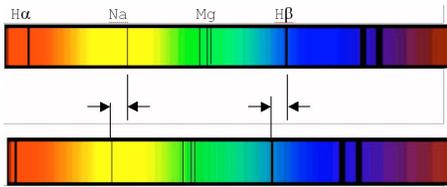


Fig 3 Arriba el espectro de comparación, abajo el espectro de un astro.

utilizando al muy conocido efecto Doppler (si alguno no conoce este efecto, que esté prevenido con los radares que miden la velocidad de los automotores en la ruta) en donde se mide el desplazamiento de las líneas espectrales en la luz de los astros. La velocidad Doppler es

$$vd/c = z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0 = (\lambda/\lambda_0) - 1 \quad (1)$$

donde vd: velocidad Doppler

c: velocidad de la luz

z: desplazamiento al rojo (si es alejamiento)

$\lambda_0$  : la longitud de onda emitida por un cuerpo en reposo y  $\lambda$  por uno en movimiento (de alejamiento es más larga que la del reposo).

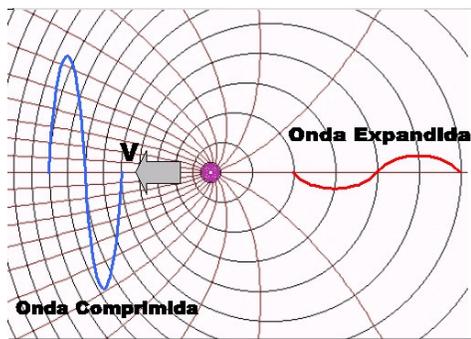


Fig 5 Los frentes de onda son esferas excéntricas, y las líneas de propagación son normales a ellas.

El efecto Doppler se caracteriza por comprimir las ondas de un lado y dilatar las del otro. Asimismo, como la energía se traslada a lo largo de las líneas de propagación, que son perpendiculares a los frentes de onda, ésta se concentra hacia delante y se diluye hacia atrás (de ahí las diferentes amplitudes en la figura).

La expresión (1) solo sirve para velocidades mucho menores a c. Para dar

una idea, tiene un 11% de error para  $vd= 60$  mil Km/s. Para velocidades cósmicas se necesita la expresión completa, que tenga en cuenta el efecto relativístico

$$z = \sqrt{(\beta+1)/\beta-1} - 1 \quad \text{con } \beta = vd/c \quad (2)$$

### Desplazamiento al rojo cósmico

La dilatación cósmica NO es un movimiento en la métrica homónima (las galaxias están fijas en la grilla), por lo que NO produce efecto Doppler. Entonces, a qué se debe el desplazamiento al rojo descubierto por Humason-Hubble? El modelo FWR establece que la expansión del espacio arrastra la materia, que está fija a su grilla imaginaria. Pero la clave es que también arrastra a la radiación que está surcando ese espacio.

La causa del desplazamiento al rojo cósmico es muy diferente a la del Doppler. Las ondas de radiación se alargan en la misma proporción en la que lo hace el espacio.

El z cósmico es el mismo en todas direcciones (isotrópico) en cambio el Doppler es anisótropo. Además el z cósmico no cumple con la ley de conservación de la energía, ya que todos los fotones emitidos van perdiendo su energía en el espacio a medida que su  $\lambda$  se dilata. Como

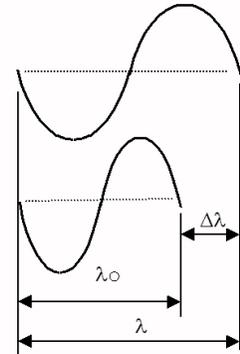


Fig 4 Longitudes de onda y su diferencia

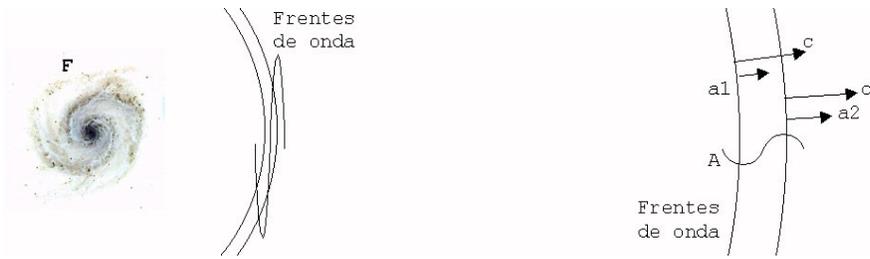


Fig 6 La velocidad de la luz se suma a la del arrastre cósmico. Este arrastre es levemente diferente para dos frentes consecutivos, lo que aleja los frentes entre sí y alarga su longitud de onda.

no se observan distorsiones en los objetos astronómicos y las estructuras que forman (salvo las lentes gravitacionales, que tienen otra causa), se supone que la velocidad de arrastre debe ser proporcional a la

distancia e independiente de la dirección. Sin embargo, el factor de proporcionalidad depende del momento considerado. Sería entonces

$$v_a = h(t) \cdot d \quad (3)$$

donde:

$v_a$ : velocidad de arrastre (medida en nuestra métrica inexpandible)

$h(t)$ : factor uniforme de proporcionalidad dependiente del tiempo

$d$ : distancia (nuestra métrica)  
Medimos el tiempo ( $t$ ) en miles de millones de años (Giga

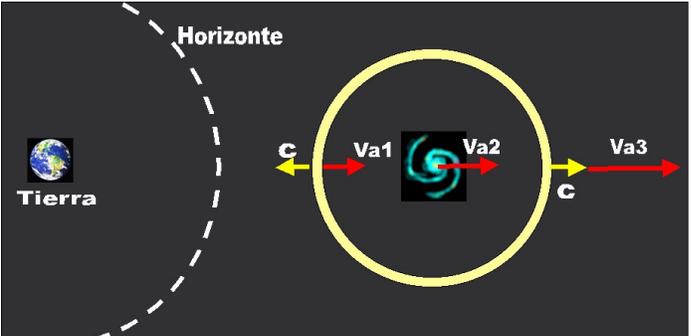


Fig 7 Una burbuja de luz emitida en un instante por la fuente, permanece centrada en ella, y es arrastrada por la expansión con la fuente. El horizonte es la distancia en la cual la  $v_a=c$ . Todos los objetos fuera del horizonte no pueden tener relación causal con la Tierra.

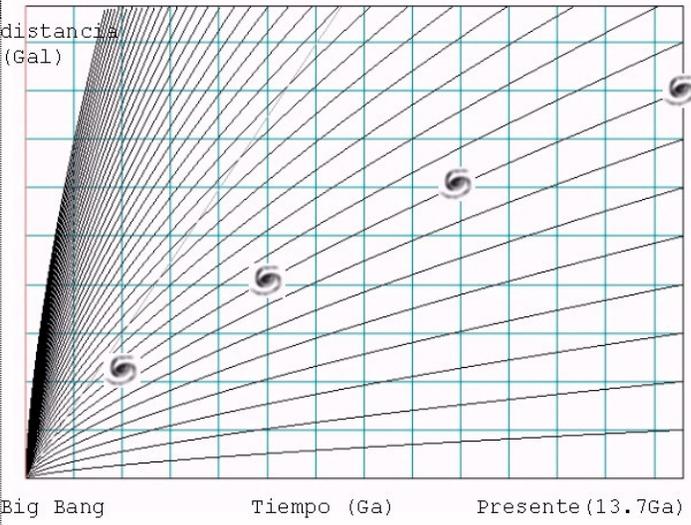


Fig 8 En el diagrama  $t-d$  vemos las curvas de expansión  $g(t)$ , para varios  $u$ . Se muestra la evolución de una galaxia con el tiempo, para 2, 5, 9, y 13.7 Ga.

años: Ga) desde el momento del Big Bang, y las distancias en miles de millones de años luz (Gal). En estas unidades la velocidad de la luz es  $c = 1$ . Este valor fue, y es, siempre el mismo en toda la evolución. Según el universo de FWR, el factor de proporcionalidad es

$$h(t) = k/t \quad (4)$$

con  $k = 2/3 = 0.67$

Además el tamaño de la grilla (distancia arbitraria entre dos galaxias o Factor de Escala) es

$$g(t) = u \cdot t^k \quad (5) \text{ Fig 8}$$

donde  $u$  es un valor genérico. Por otro lado, la edad del universo hoy es de 13.7 Ga, según los últimos valores

calculados por el satélite WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy

Probe). En la Fig 8 se dieron valores de  $u$  de forma tal de que en las evoluciones de los objetos, hoy estén a 1, 2, 3, ... nros. enteros de Gal.

Una de las mejores herramientas se consigue al determinar la trayectoria que sigue la luz hasta alcanzarnos hoy. Recurrimos al análisis matemático y resulta la

Fig 9 donde se ve que la luz nos llega de "emboquillada" desde el fondo del universo (en  $t=0$ , BB). Las distancias verticales desde el eje horiz. hasta la Línea de la Luz, son lo que se llaman "distancias angulares", y señalan las distancias que tenían los objetos que hoy vemos cuando emitieron su luz. Por ejemplo, la galaxia marcada estaba a 5.5 Gal ( $t = 6.3$  Ga) cuando emitió la luz que llega hoy, y en el presente está a 9 Gal.

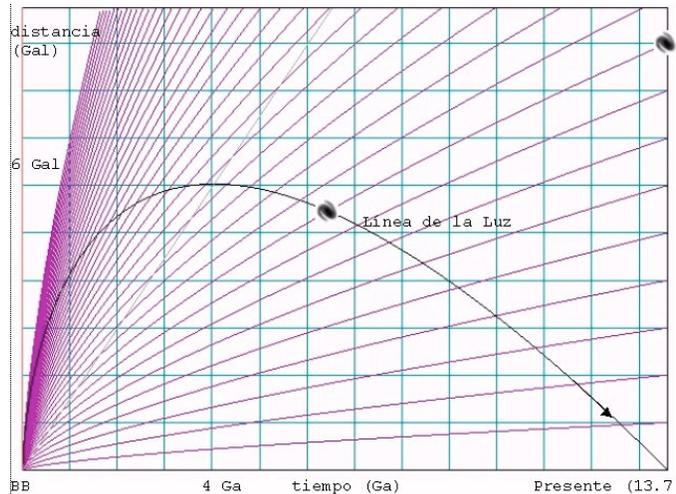


Fig 9 La trayectoria de la luz que nos llega de los objetos que están alineados en ella. Nunca estuvo más allá de 6 Gal.

Su  $z = 9/6.3 - 1 = 0.429$ . No vemos nada que esté fuera de la Línea de la Luz. Ella representa a la radiación que terminó llegando a nosotros. Aquí vemos que en el pasado remoto, la velocidad de

arrastre superaba a  $c$ .

La prueba del modelo se debe basar en que debe reproducir las observaciones. Uno de los test es que cumpla la ley de Hubble, es decir, lo que vemos.

$$v_d = H_0 * d \quad (6) \quad \text{donde:}$$

$v_d$ : es la velocidad deducida de atribuir el desplazamiento al rojo  $z$  al efecto Doppler (ya sabemos que esto no es cierto en realidad).

$H_0$ : es la constante de Hubble (aprox. 72 Km/seg/Mpc)

$d$ : la distancia del objeto (angular, luminosa o presente). Este  $H_0$  se deduce

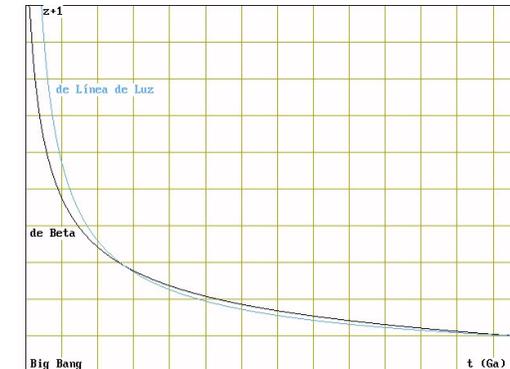


Fig 10 Comparación del  $(z+1)$  del universo FWR con el observado (ley de Hubble)

de objetos cósmicamente "cercaños".

La ley de Hubble es de forma parecida a la expresión (3), pero la diferencia está en que Hubble es lo que vemos y (3) es lo que ocurre! La ecuación que se deduce para la Línea de la Luz es

$$r(t) = [c/(1-k)] * [ T^{(1-k)} * t^k - t ] \quad (7) \quad \text{donde:}$$

$r(t)$ : distancias de la Línea de la Luz (coord. vertical, Fig 9) (Gal)

$T$ : edad (hoy) del universo (13.7 Ga)

$t$ : tiempo en Ga

Ahora que tenemos una idea de cómo se comporta el universo, podemos deducir una serie de parámetros útiles.

## Época de la Recombinación

Podemos calcular cuando se terminó la Época de Recombinación, muy poco luego del Big Bang, que se caracteriza por el paso del universo de la opacidad e incandescencia (3100°K) a la transparencia total. Esto se produjo simultáneamente en todo el espacio. Calculamos primero el  $z$  del Fondo Cósmico de Radiación (2.725°K), utilizando la ley de WIEN de la radiación:

$$(z+1) \text{ del fondo de radiación} = 3100/2.725 = 1137 \quad (8)$$

es el mayor corrimiento al rojo que se puede medir en el cielo. La expresión

$$(z+1) = [T/t]^k \quad (9)$$

deducida de la (7). nos da, despejando  $t$

$$t_{\text{recomb}} = 3.76 * 10^{-4} \text{ Ga} = 380 \text{ mil años} \quad (10)$$

Es la cifra aceptada en la literatura.

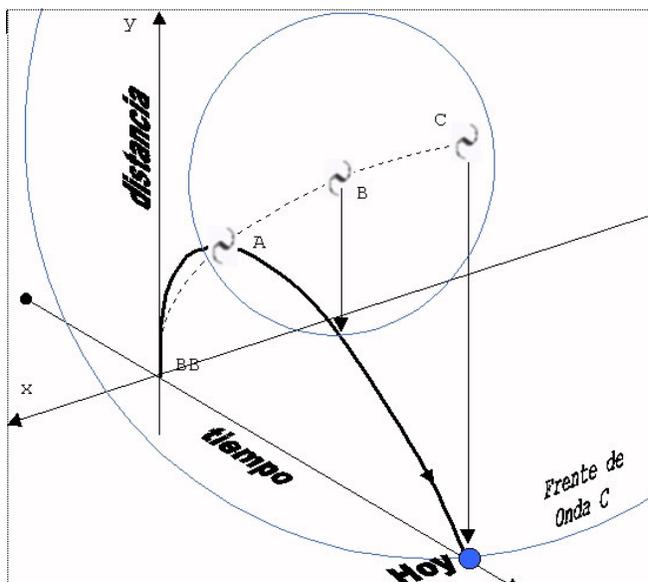


Fig 11 En la galaxia A hay un GRB. La luz del GRB crea una burbuja que va creciendo (B). Finalmente, cuando la galaxia llega a C, la burbuja de luz llega a nosotros en Hoy.

## Distancia de los objetos cósmicos

Los GRB's (Gama Ray Bursters) son quizás los objetos más lejanos detectados. A que distancia estaba un GRB con un  $z=6$  cuando emitió su luz?

Calculamos con la (9):

$$t = T/(z+1)^{1/k} = 0.75 \text{ Ga} \quad (11)$$

= 750 mill. de años luego del BB y entonces, la distancia en el momento del estallido (expr 7):

$$d = 3.65 \text{ Gal}$$

y la distancia a la cual se encuentra hoy (presente):

$$d_{\text{hoy}} = d * (z+1) = 3.65 * 7 = 25.58 \text{ Gal} \quad (12)$$

## Tamaños angulares

Cuando está en A, la galaxia emite la luz que vemos hoy,

cuando la galaxia llega a C.

El diámetro angular bajo el cual se ve la galaxia A, es el que tenía cuando emitió la luz que vemos hoy (Fig 12)

$$D_a = d/TA \text{ (radianes)} \quad (13)$$

La Fig 13 es el diámetro angular que presentaría una galaxia como la Vía Láctea en función del corrimiento hacia el rojo  $z$ . La distancia la obtenemos de la Línea de la Luz (Fig 9).

Vemos dos curvas. Una es del

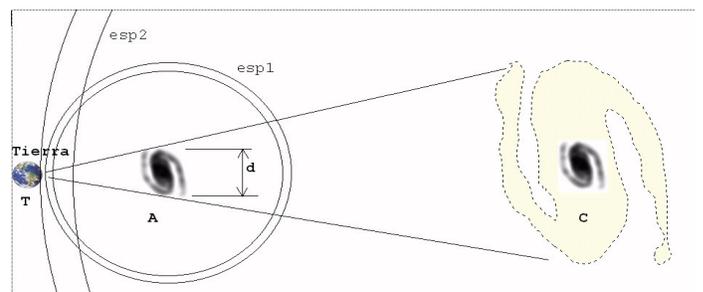


Fig 12 Referente a la fig 11, la galaxia emite su luz en A, y en la Tierra se recibe cuando está en C.

universo FWR y la otra de un universo en Estado Estacionario (SS). La Línea de la Luz para el Estado Estacionario sería recta.

Este fenómeno es muy difícil de medir en la práctica, pero se ha comprobado para un conjunto de radiogalaxias compactas, que son avistadas a mayor distancia que en el rango óptico.

### Brillo de los objetos cósmicos

El brillo aparente de los objetos cósmicos es mucho menor al de los cercanos. Lo podemos evaluar si calculamos la densidad de energía de la cáscara de radiación que un cuerpo puntual emite en un tiempo determinado.

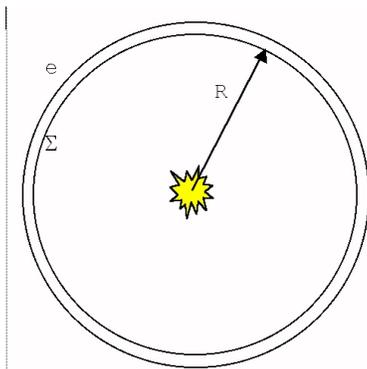


Fig 14 Cáscara de luz emitida en 1 seg.

Si en un segundo se emiten una cantidad N de fotones, cada uno de energía  $h \cdot f$  (Cte de Plank y frecuencia), su densidad volumétrica se repartirá en el volumen de la cáscara

$$V = 4\pi R^2 \cdot e \quad (14)$$

$$\text{Entonces la densidad de energía será } \delta = N \cdot h \cdot f / (4\pi R^2 \cdot e) \quad (15)$$

para un R no cósmico.

Pero para un R donde z empiece a tener un valor significativo ocurre lo siguiente:

- 1) R se convierte en  $R \cdot (z+1)$
- 2) cada fotón pierde energía  $(z+1)$  veces
- 3) el espesor de la capa se dilata a:  $e \cdot (z+1)$

Con lo que la densidad de energía se convierte

$$\text{en } \delta = N \cdot h \cdot f / [4\pi R^2 \cdot (z+1)^4] \quad (16)$$

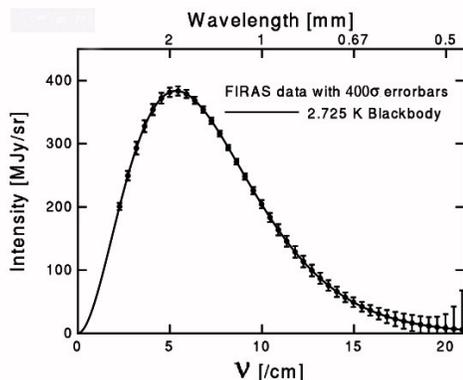


Fig 15 Espectro del Fondo Cósmico de Radiación tomado por el satélite COBE.

Siguiendo un desarrollo similar al de las fuentes puntuales, las fuentes extendidas también sufren la misma disminución de brillo superficial. Una prueba está en el mismo fondo cósmico, una fuente superficial de un ángulo sólido de  $4\pi$  steradianes (que abarca todo el cielo), la mayor que se puede concebir.

La ley de Stefan-Boltzmann establece que el brillo bolométrico de un cuerpo negro (emisión térmica) a una temperatura absoluta T debe ser  $B = \sigma \cdot T^4$  donde  $\sigma$  es la cte. de Stefan (el exponente de T coincide con el exponente del factor  $(z+1)$

en la expresión [16]). Aquí hay dos coincidencias: una es la distribución espectral, que pertenece a un cuerpo de  $2.725^\circ\text{K}$  y otra

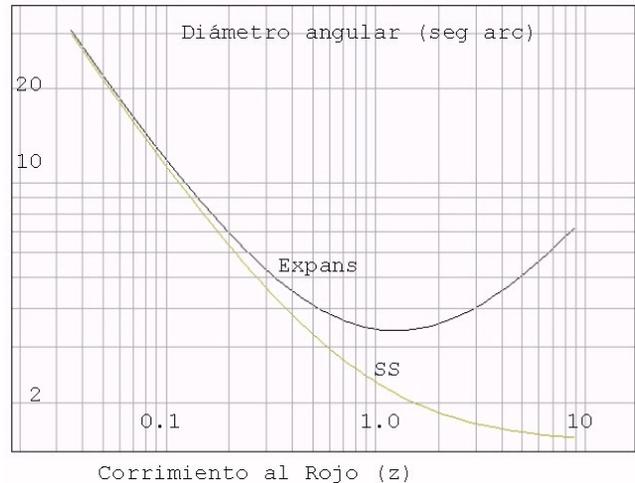


Fig 13 El tamaño angular de una galaxia se hace mínimo para  $z=1$ . Luego vuelve a aumentar.

es la magnitud del brillo (Intensidad en MiliJanskys por Steradián), que también es la de un cuerpo a la misma temperatura. Podemos ver, como ejercicio, como va variando el brillo de una galaxia típica que los aficionados pueden fotografiar con sus CCD's, con el lugar que ocupa en la Línea de la Luz del diagrama t-d (Fig 9)

Tiempo desde hoy (Ga)	2	4	6	8	10	12	13
Corrimiento al rojo z+1	1.11	1.26	1.47	1.80	2.40	4.05	7.33
Dism. en Brillo (Magn)	0.64	1.48	2.01	4.41	7.52	15.6	31
Tiempo de Exposición	1.8m	3.9m	11 m	1 h	17 h	1200d	

El tiempo de exposición de referencia se toma como 1 minuto para una galaxia cercana (p.ej M106). La cámara CCD es una standard. Para la cámara del Telescopio Hubble, WFC3 que va de 0.2 a 1.7 micrones, los tiempos de exposición son mucho menores que los mostrados arriba.

### Velocidades de arrastre

Es el valor de  $h(t)$  que está mostrado en las expr.(3) y (4). Esta velocidad NO es la de la constante de Hubble.

t pos BB (Ga)	1	2	3	4	5	6	8	10	11	12	13
$h(t)$ Km/s/Mpc	655	328	218	164	131	110	82	66	60	54	50.9

### Radiación Cósmica de Fondo

A pesar de que el Big Bang ocurrió hace unos 13.7 Giga años, todavía queda un recuerdo. Porqué vemos este fondo cósmico entonces? Es lo más lejano que podremos detectar? No hay nada detrás de él?

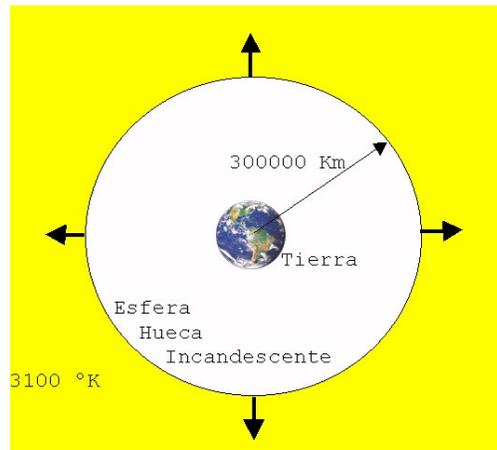


Fig 16 Al primer segundo la esfera hueca incandescente tien un radio de 300000 Km.

La explicación no es complicada. Hace 13.7 Ga el universo (quizás de tamaño infinito) era un medio incandescente y opaco, quizás como el ambiente en el interior del sol, y su "grilla" se venía expandiendo muy rápidamente. En un momento dado todo el volúmen del espacio se volvió transparente simultáneamente. Sin embargo la información que llega a nosotros se toma su tiempo por la "lenta" velocidad de la luz. Todo lo que veríamos sería que estábamos en el centro de una esfera hueca de radio creciente, con la superficie interna incandescente.

Para aclarar esto último, supongamos que en este momento se apagarán todas las estrellas del universo. Nos enteraríamos recién dentro de muchos años. Quizás nuestro nietos empezarán a sospechar que algo extraño estaría pasando!

Después de 13.7 Ga del BB, la "esfera incandescente" está extremadamente virada al rojo, por la expansión espacial, y su posición es muy lejana. Algunos autores llaman al fondo cósmico la última fotósfera de la recombinación o del Big Bang, pues en ese momento se recombinaron los átomos de Hidrógeno y Helio que formaban el medio.

## Enfriamiento de la Radiación Cósmica de Fondo luego del BB

La temperatura del material incandescente justo en el Big Bang debe haber sido de 3100°K, ya que esa es la temperatura de recombinación del átomo de Hidrógeno.

Con lo que sabemos, podemos calcular como se fue enfriando este fondo a medida que el universo comenzaba a envejecer.

Con la expresión(9), la temperatura del medio incandescente y sabiendo que la época de recombinación fue en  $t= 3.8 \cdot 10^{-4}$  Ga, podemos calcular las temperaturas del fondo para diferentes edades del universo (T).

$$\text{Temp de Fondo} = 3100^{\circ}\text{K}/(z+1)$$

Edad	0.35	0.4	0.5	0.6	0.8	1	2	4	8	16	32	64	100
z+1	1.11	1.21	1.41	1.59	1.93	2.24	3.56	5.67	9.02	14.4	22.8	36.3	49
T°K	2739	2562	2199	1950	1606	1384	871	547	344	215	136	85	63

La Edad (T) del universo está en millones de años. El (z+1) es el de la Radiación Cósmica de Fondo para cada época; y T°K es la temperatura del fondo (hoy 2.725°K). Solo 8 millones de años (nada frente a 13.7 Ga) bastaron para enfriar el universo y permitir que ingrese a la "Era Oscura", que se extendió hasta la "Era de la Reionización", donde se formaron las primeras estrellas.

### Verdad sobre el fondo

Una de los engaños mayores que nos impone el universo es este fondo de radiación. Es un espejismo y una visión solo del pasado. Hoy en su lugar, seguramente, lo único real que debe existir es una continuación de nuestro entorno, con más y más galaxias.

### Irregularidades en la temperatura del Fondo (Anisotropía)

El satélite COBE fue el primer proveedor de datos completos sobre la radiación de fondo. Luego de descontar una bipolaridad Doppler de 368Km/s, queda nuestra Vía Láctea. Descontada, queda un fondo residual muy parejo de 2.725°K con fluctuaciones de 1 en  $10^5$ . Sachs y Wolfe habían predicho que se encontrarían fluctuaciones de temperatura 10 veces mayores, pero el COBE no tenía la nitidez (solo 8°) ni la sensibilidad para detectar la estructura fina. La nave WMAP tomó la imagen del cielo con mayor precisión.

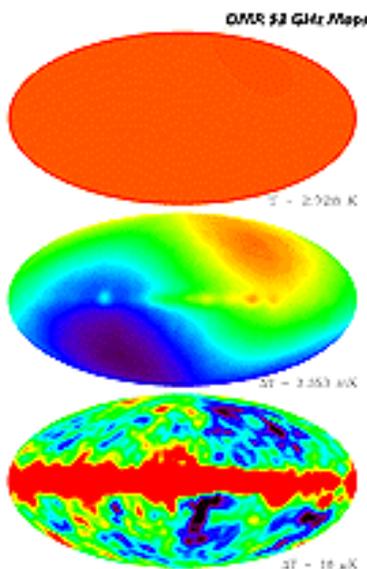
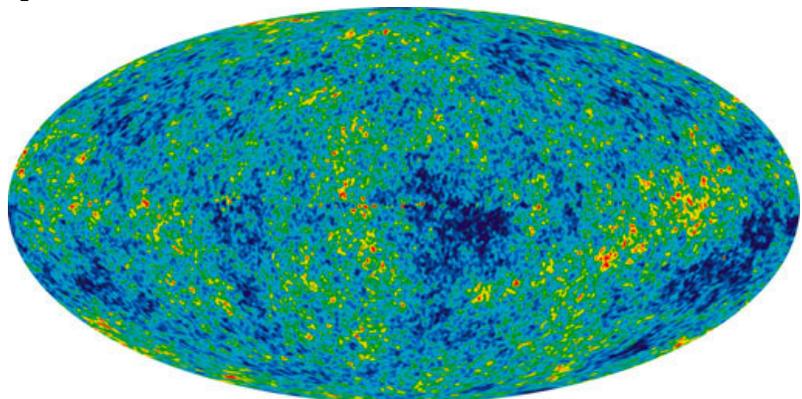


Fig 17 Imágenes del Fondo Cósmico del COBE

Fig 18 El Fondo Cósmico de precisión tomado por el WMAP mostrando sus "grumos".



## El Cosmos y el Audio

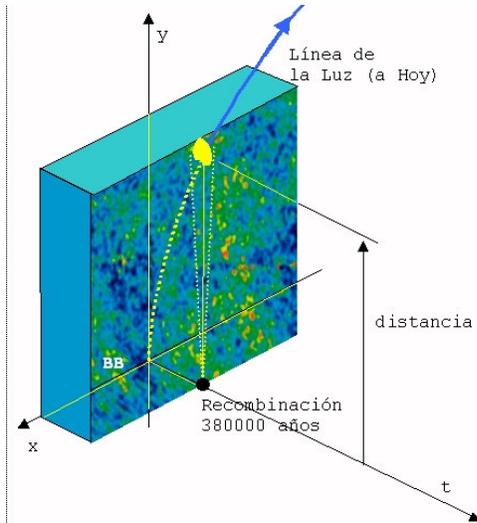


Fig 19 Distancia de la Línea de la Luz y ángulo  $\theta$  subtendido por un grumo

medio forman "ondas estacionarias", que afectan a algunas regiones (vientres) y dejan libres a otras (nodos). Las zonas donde se establece una presión mayor que la media (pico de la onda), se calienta y viceversa en las rarificadas. Como en un instrumento musical de viento, hay frecuencias que entran en resonancia (armónicas) y otras que mueren. La diferencia entre un instrumento de viento y el universo es la forma en que se producen las resonancias. En el instrumento es por su largo físico y en el cosmos por el tiempo. Las ondas estacionarias del medio estaban influidas por la materia oscura, que actúa gravitacionalmente pero no genera presión, y por la materia ordinaria que sí. Se puede estimar que el tamaño de las regiones de compresión de la primera armónica eran de unos 600000 al. Por otro lado, la distancia de la Línea de La Luz que llega hoy la calculamos de la expr. (7)

$$d = 0.035578 \text{ Gal}$$

Y el ángulo  $\theta$  que subtendía el grumo de la perturbación

$$\theta = 6 \cdot 10^{-4} (\text{Gal})/d (\text{Gal}) = 0.01686 \text{ radianes} = 0.96^\circ$$

que es el ángulo que tienen las perturbaciones más intensas del fondo de radiación.

Se estima que la razón principal de la anisotropía (los grumos) en el Fondo Cósmico de Radiación fue la existencia de inmensas ondas sonoras estacionarias en el medio incandescente previo a la recombinación y transparencia. Los efectos de las compresiones y rarefacciones provocadas por estas ondas en la temperatura del medio quedaron congeladas en la superficie de la esfera hueca que hoy vemos en el fondo del universo. La causa de estas ondas sonoras ha sido la expansión violenta primitiva. En todo el medio incandescente apareció simultáneamente una onda de presión que dio origen a componentes en todas las frecuencias de sonido (que los cosmólogos llaman escalas). Sin embargo, ondas de igual frecuencia que van y vienen por el

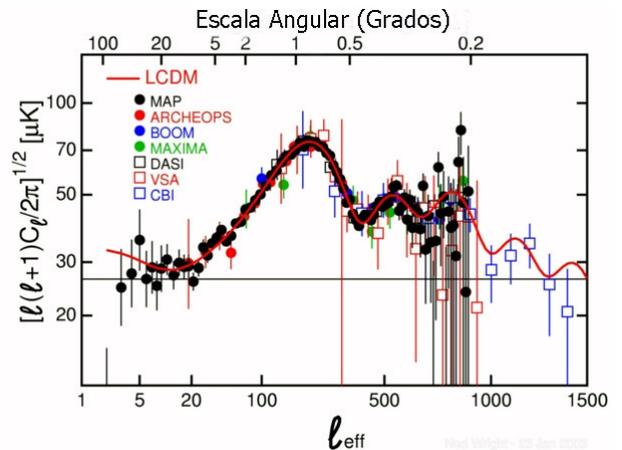


Fig 20 Espectro de potencias angulares que muestra las resonancias calculada y medidas.

## Conclusión

No es correcto el título de este párrafo. Aquí recién empieza este tema cautivante, pero por ahora no nos podemos extender más. Daremos un listado de algunos de los artículos y lugares de referencia y consulta para el interesado con acceso a Internet.

La página de Ned Wright

<http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm>

Los artículos de Tom Weil en Sky&Telescope

Looking Back Cosmologically Sept 1997

Another Look at Cosmic Distances Aug 2001

El artículo en pdf

<http://www.citebase.org/fulltext?format=application%2Fpdf&identifier=oai%3AarXiv.org%3Aastro-ph%2F9812018>

The angular size-redshift relation ... por L. I. Gurvits, K. I. Kellermann y S. Frey

El efecto Sunyaev Zel'dovich

<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/mthierbach/sz.html>

<http://cfa-www.harvard.edu/~aas/tenmeter/sz.htm>

La nave WMAP

<http://map.gsfc.nasa.gov/>

Scientific American Febrero 2004

Four Keys to Cosmology

y con un buen buscador consultar los sites de

Sloan Digital Sky Survey

2dF Galaxy Redshift Survey

ESO Slice Project

2MASS Redshift Survey