

ASPECTOS COSMOLÓGICOS



ASPECTOS COSMOLÓGICOS

El Universo está lleno de **radiación difusa** conocida como *radiación extragaláctica difusa (RED)*.

La distribución de esta RED es **isotrópica**

pero ...

en sus **inhomogeneidades** y en su **espectro**

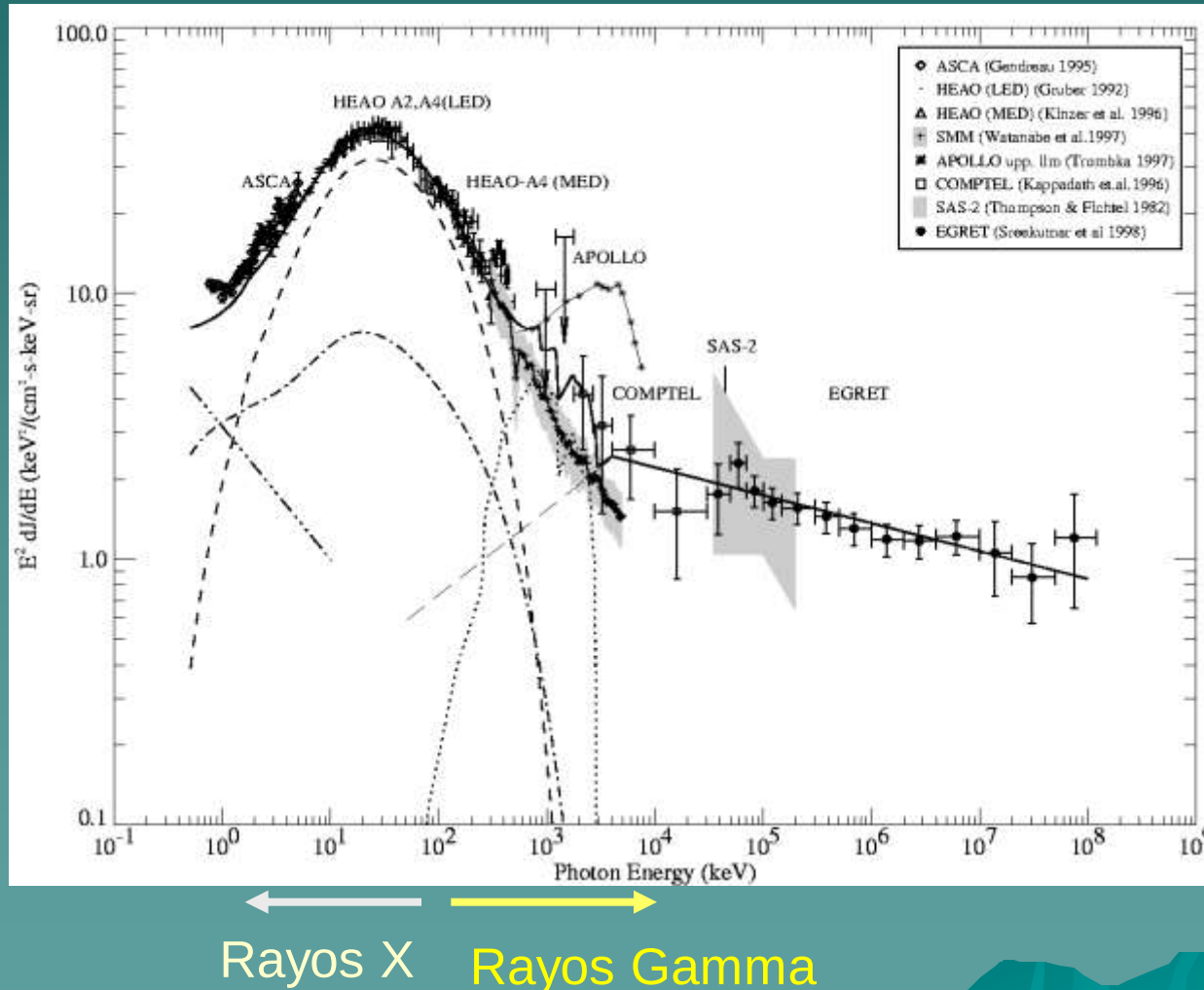
guarda **información sobre la composición y evolución** del Universo.

Hay tres posibilidades sobre el **origen de la RED**:

- 1) Se debe a la **superposición de fuentes discretas** no resueltas por los instrumentos.
 - 2) Es originada por **mecanismos difusos** que operan a gran escala en el Universo.
 - 3) Se debe a una **mezcla de los casos anteriores**.
- 
- A stylized, dark teal silhouette of a mountain range is positioned in the bottom right corner of the slide, extending from the right edge towards the center.

ASPECTOS COSMOLÓGICOS

La multitud de objetos y procesos que pueden manifestarse en la RED sólo pueden desentrañarse si se poseen determinaciones precisas de cómo se distribuye la radiación a lo largo del espectro electromagnético.

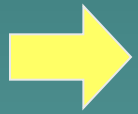


**ESPECTRO
DE LA RED**

ASPECTOS COSMOLÓGICOS

La emisión difusa en micro-ondas, infrarrojo, óptico y ultravioleta está casi con seguridad determinada por **procesos térmicos**.

La radiación de fondo de micro-ondas es única en el sentido de que tiene un origen cosmológico claro: es la radiación que escapó durante el período de **RECOMBINACIÓN** del Universo, cuando la temperatura cayó, debido a la expansión, a niveles tales que **los electrones pudieron ser captados por los núcleos**



cambió la opacidad súbitamente y el Universo se hizo transparente a los fotones.



DESACOPLE:
Los fotones viajan libremente
hasta el presente y
son observados como CMB
(Cosmic Microwave Background)

RECOMBINACIÓN

Fotones cósmicos escapan de la interacción con la materia y viajan a través del Universo

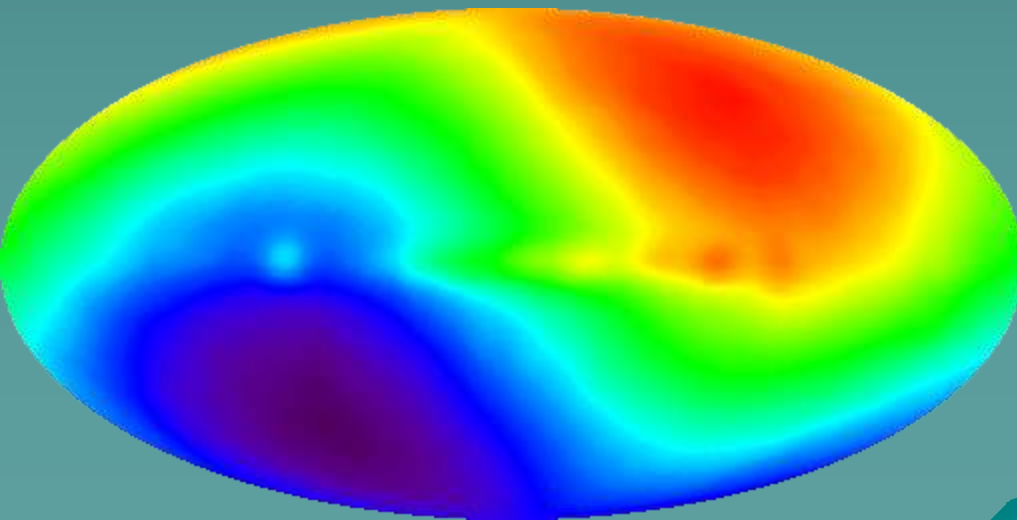
Universo continúa expandiéndose:
Los fotones también se “expanden”:
aumentan su long. de onda

Mapas de CMB tienen que atravesar tres etapas de análisis:

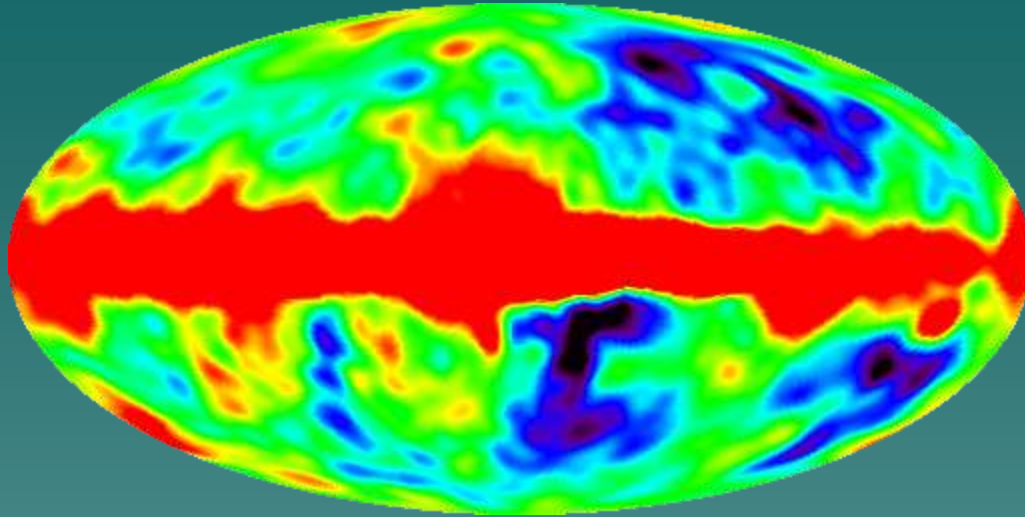
Imagen cruda: apariencia de dipolo por movimiento de la galaxia

Radiación de micro-ondas que vemos hoy

Los que sufren mayor redshift tienen longitud de onda mayor: son más fríos y se ven azules en el diagrama

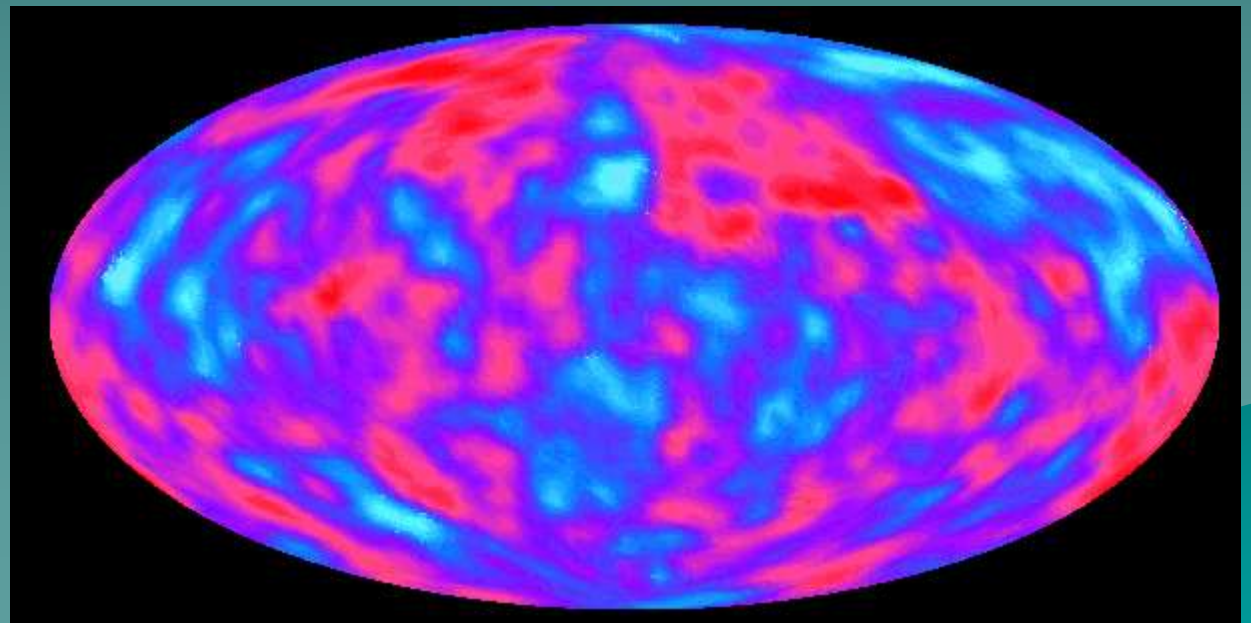


Luego de remover el movimiento de la galaxia:
Dominado por la emisión IR del gas en nuestra galaxia



Al remover la emisión del gas
a partir de suposiciones sobre
la distribución de materia
en nuestra galaxia:

**Imagen de la pared
de recombinación:**
momento en que
fotones y materia
se desacoplan;
las épocas anteriores
a esta barrera
son invisibles

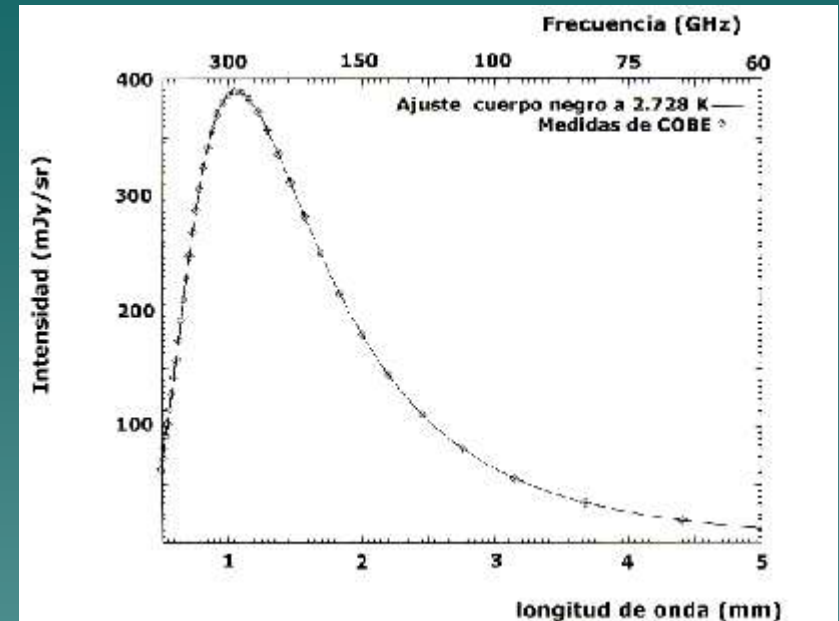


ASPECTOS COSMOLÓGICOS

La **radiación CMB** es el más perfecto ejemplo de espectro de cuerpo negro conocido. Esta radiación fue predicha por George Gamow, Ralph Alpher y Robert Hermann en 1948.



Corresponde a un cuerpo negro con temperatura de $T=2.73\text{ K}$.



Variación de la intensidad del fondo cósmico de microondas para diferentes frecuencias. El trazado continuo representa el mejor ajuste de una distribución debida a un cuerpo negro a 2.728 K.

Las barras de error no pueden ser apreciadas por ser muy pequeñas en comparación con la escala de la representación.

El acuerdo es espectacular.

Los datos fueron obtenidos por el instrumento FIRAS (Far Infrared Spectrometer] del satélite de la NASA COBE (Cosmic Background Explorer).

ASPECTOS COSMOLÓGICOS

COBE:

Misión planificada para un período de alrededor de 4 años, comenzó el 18 de noviembre de 1989.

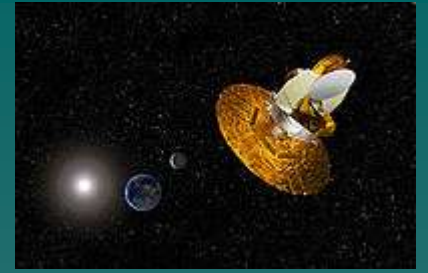
Instrumentos:

- **Radiómetro Diferencial de Microondas (DMR)** - un instrumento de microondas para mapear variaciones (o anisotropías) en la radiación de fondo de microondas
- **Espectrofotómetro Absoluto del Infrarrojo Lejano (FIRAS)** - un espectrofotómetro utilizado para medir el espectro de la radiación de fondo de microondas
- **Experimento Difuso para el Fondo de Infrarrojos (DIRBE)** - un detector de infrarrojo de múltiple longitud de onda utilizado para mapear emisiones de polvo

Un equipo de científicos estadounidenses **anunció el 23 de abril de 1992, que habían encontrado las semillas primigenias (anisotropías del CMB) en datos del COBE.**

ASPECTOS COSMOLÓGICOS

WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe):



El satélite WMAP de la NASA es el sucesor de la misión COBE. Fue lanzado el 30 de junio de 2001.

El objetivo de la misión WMAP es comprobar las teorías sobre el origen y evolución del universo.

ASPECTOS COSMOLÓGICOS

Planck Surveyor:

Es la tercera misión de medio tamaño (M3) del programa científico Horizon 2000 de la Agencia Espacial Europea.

El lanzamiento se produjo el 14 de mayo de 2009.



La Planck Surveyor complementó los datos obtenidos por la WMAP, ya que ésta también se centró en medir fluctuaciones de la radiación de fondo de microondas, pero a una escala angular mucho mayor y menor sensibilidad que Planck.

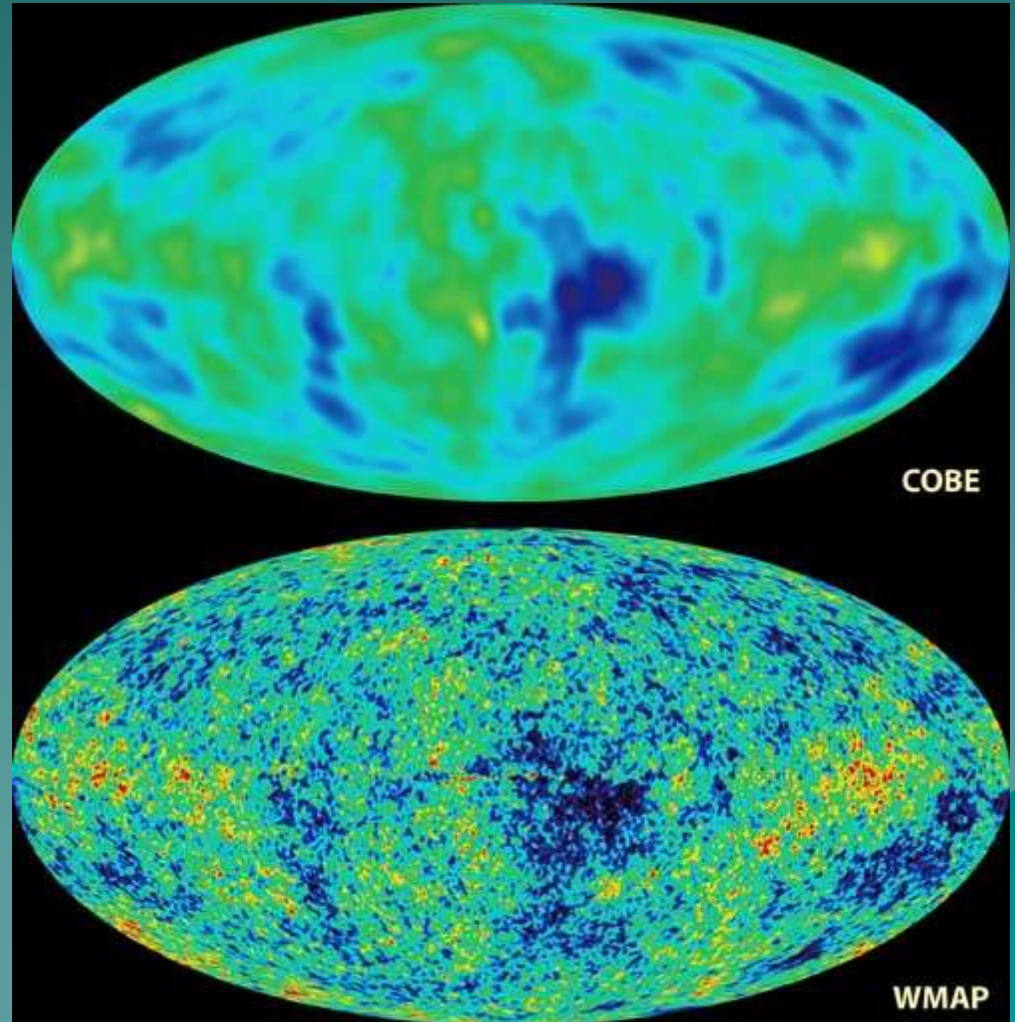
ASPECTOS COSMOLÓGICOS

La *anisotropía* que pudiese haber en la emisión de CMB sirve para establecer las *fluctuaciones originales de densidad* a partir de las cuales se forman las galaxias.

Comparación entre los mapas de COBE y WMAP.

La resolución angular de WMAP es unas 20 veces mejor (unos 20 minutos de arco) con respecto a COBE (7 grados).

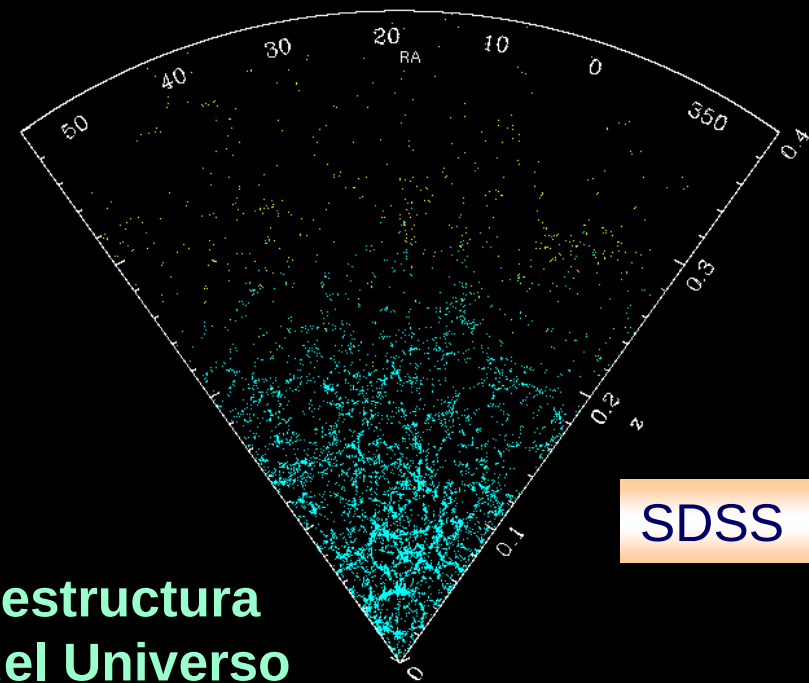
El azul más oscuro corresponde a temperaturas de unos 200 microKelvin por debajo de la media de 2,728 Kelvin. El color varía gradualmente por el espectro visible hasta el rojo más oscuro que representa temperaturas de 200 microkelvin por encima de la media



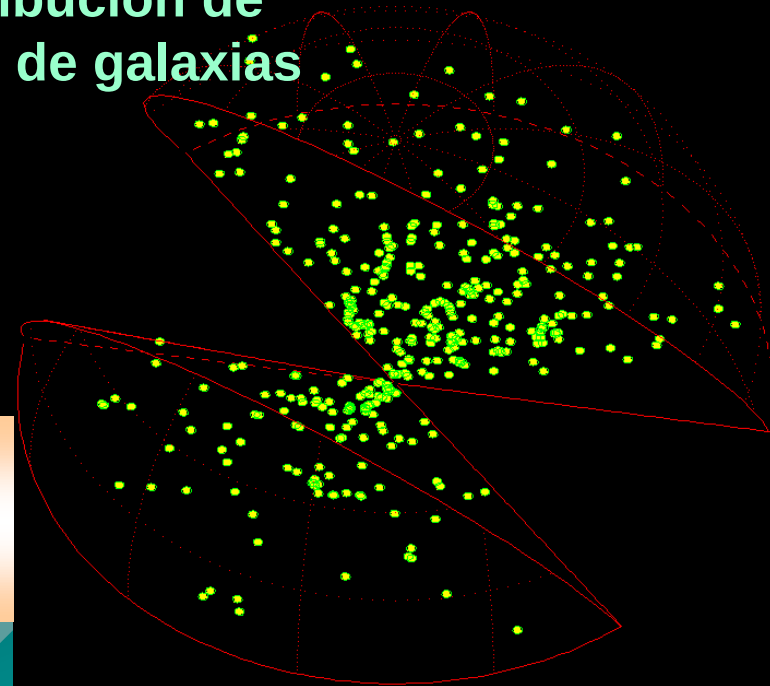
26000 gx en LCRS hasta $600 h^{-1} \text{ Mpc}$

Trazado de la estructura
a gran escala del Universo
a partir de la distribución de
galaxias y cúmulos de galaxias

REFLEX survey
(ROSAT-ESO flux limited X-ray)
de Cúmulos de galaxias



SDSS



**Apariencia de la distribución actual de galaxias
resultado de:**



**crecimiento gravitacional de las fluctuaciones iniciales
en el campo de densidad**
que surgen en el Universo primitivo durante el período de inflación

Uno de los mayores logros
de la cosmología actual
durante las últimas
dos décadas:

**DESARROLLO DE PARADIGMA PARA
LA FORMACIÓN DE ESTRUCTURA**

MODELO DE MATERIA OSCURA FRÍA (CDM)

Notable éxito en la descripción de:

- ✓ la distribución de materia en grandes escalas
- ✓ formación de galaxias

Modelo de Big Bang:

- Universo inicialmente caliente
- Densidad de energía **dominada por radiación**

$$\rho \propto R^{-4}$$

$$z_{eq} \approx 10^4$$

transición a



- Densidad de energía **dominada por materia**

$$\rho \propto R^{-3}$$

Universo permanece caliente:
gas ionizado



Materia y Radiación acopladas
por dispersión electrón-protón
(Scattering de Thomson)

$$z_{rec} \approx 1200$$

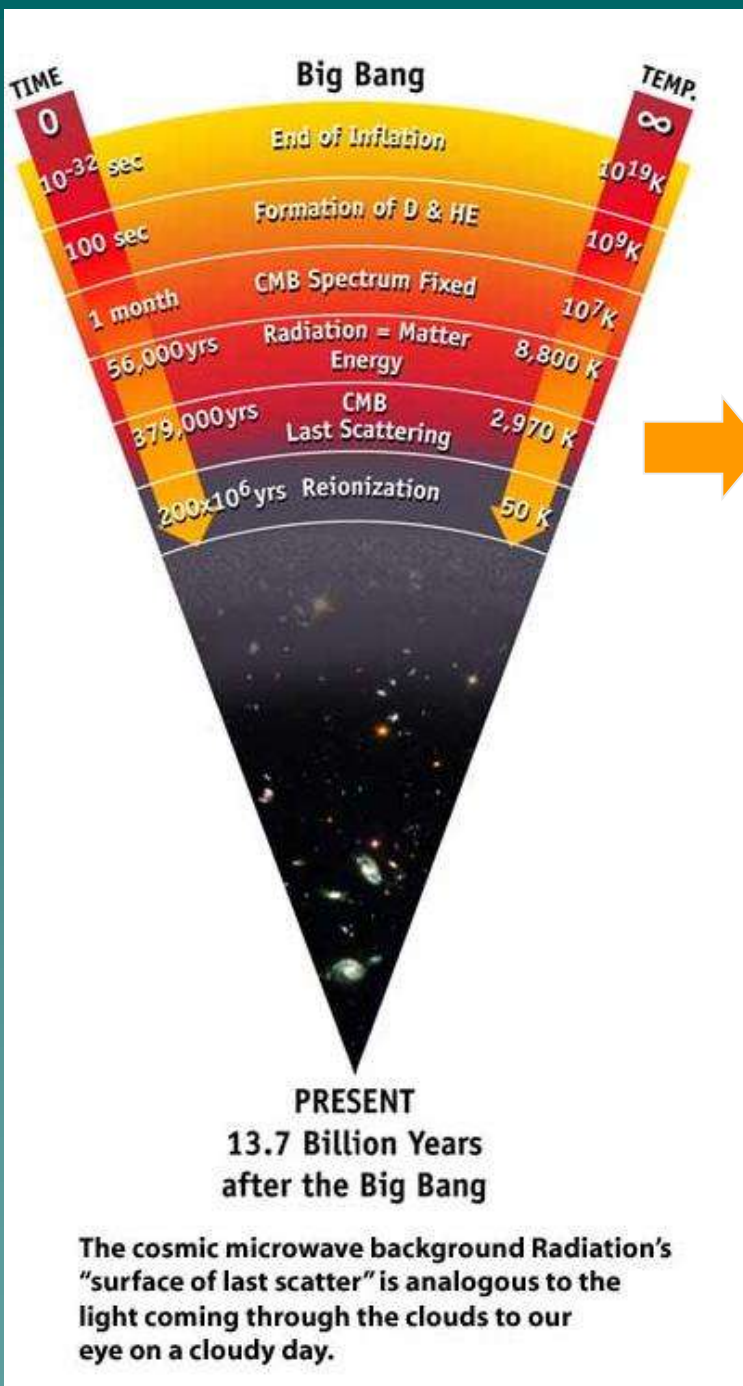
temperatura cae por
debajo de 3300 K



RECOMBINACIÓN
entre electrones y protones:
forman H neutro



DESACOPLE:
Los fotones viajan libremente
hasta el presente y
son observados como CMB



Recombinación:
"last scattering"

fluctuaciones con
pequeña amplitud

$$\delta(\mathbf{x}, t) = \rho(\mathbf{x}, t) / \bar{\rho}(t) - 1 \ll 1$$

son aún **lineales**:
se pueden estudiar
analíticamente

Eventualmente crecen:
los **efectos no-lineales**
son importantes

$z = 20.0$

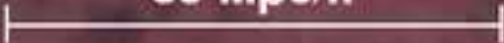
SIMULACIONES NUMÉRICAS

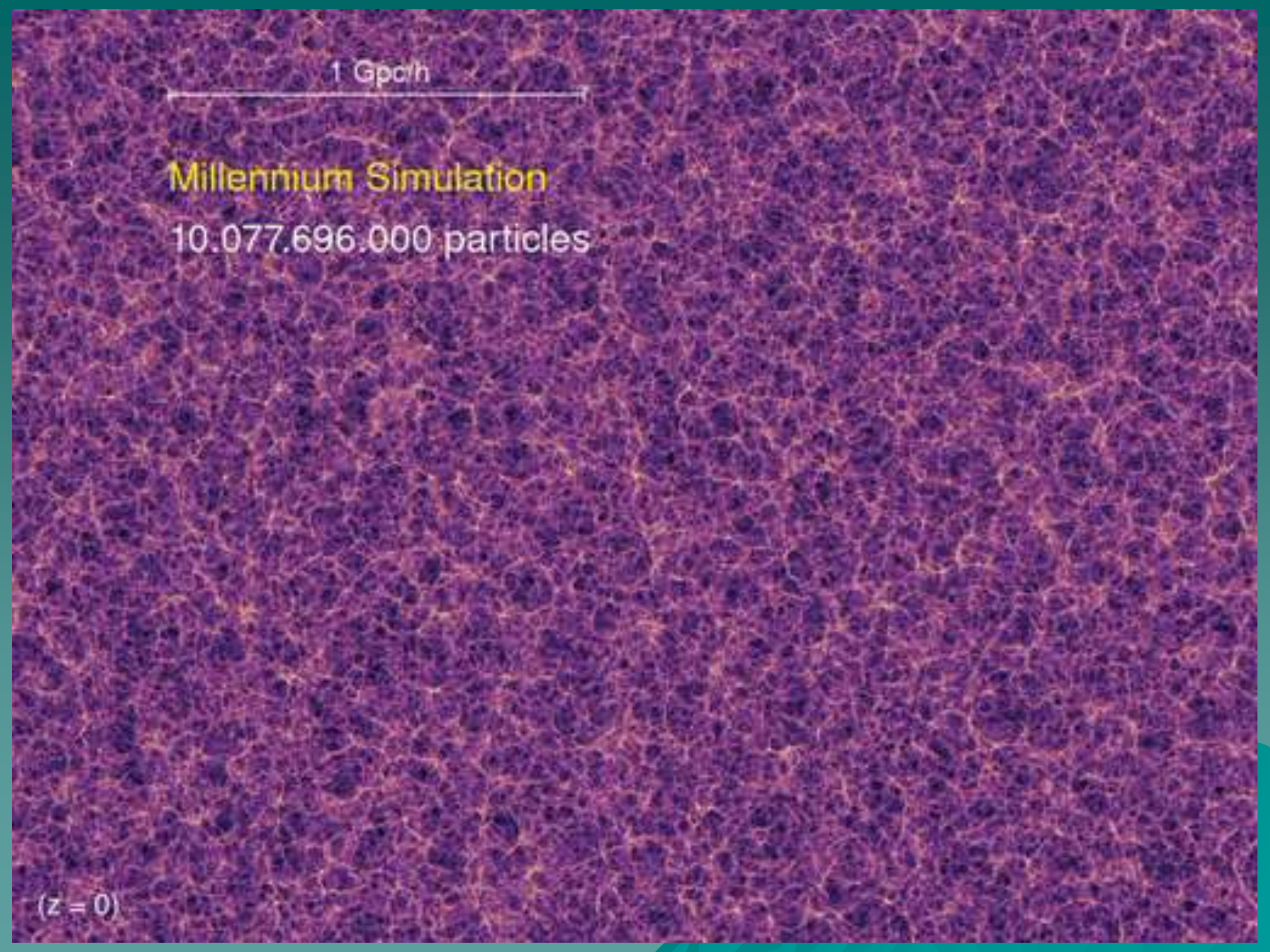
tratamiento no-lineal completo
de la formación de estructura



a medida que se produce
el colapso gravitatorio
la materia es colectada en la
RED CÓSMICA

50 Mpc/h



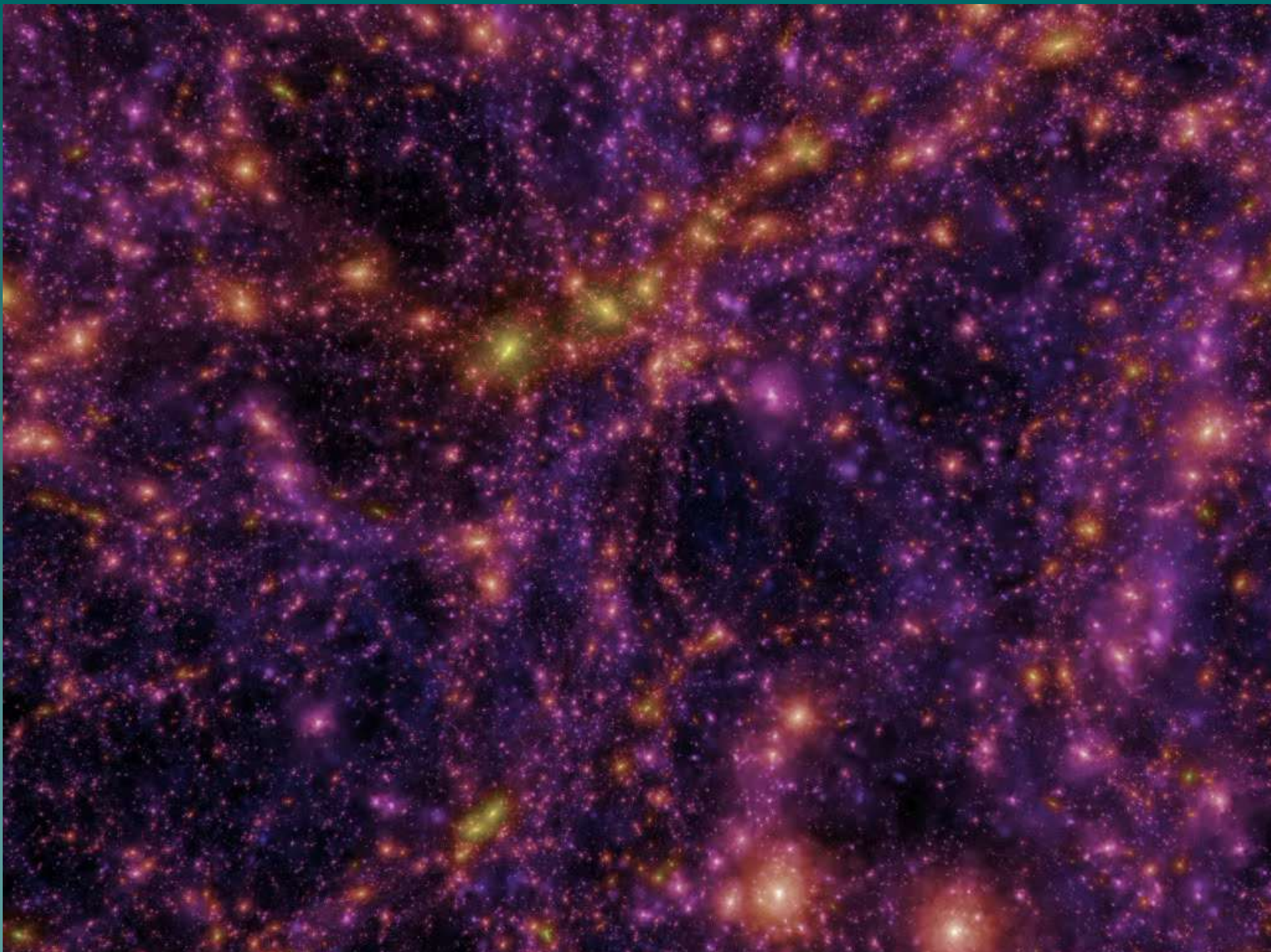
A visualization of the Millennium Simulation, showing a vast, complex network of dark matter filaments and clusters. The structure is rendered in shades of purple and blue, with a dense, interconnected web of matter. A horizontal scale bar at the top left indicates a distance of 1 Gpc/h. The text 'Millennium Simulation' and '10,077,696,000 particles' is overlaid on the upper left. The redshift value '(z = 0)' is in the bottom left corner.

1 Gpc/h

Millennium Simulation

10,077,696,000 particles

($z = 0$)



ASPECTOS COSMOLÓGICOS

En los rangos infrarrojo, óptico y ultravioleta, la **emisión difusa** está dominada por

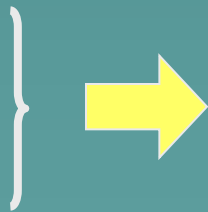
- galaxias
- estrellas individuales
- polvo

La relación entre las intensidades del RED en las distintas bandas depende de los contenidos y la evolución del Universo.

Sin embargo, estos componentes son influenciados más por la evolución de las galaxias que por el modelo cosmológico subyacente, al contrario de lo que sucede con el CMB.

Longitudes de onda de la RED que presentan contribuciones dominantes **no-térmicas**:

- ❖ radio
- ❖ rayos X
- ❖ rayos γ



parece dominar la contribución de diversos tipos de AGNs.

ASPECTOS COSMOLÓGICOS

Conocimiento actual de la densidad de energía y de fotones de la RED

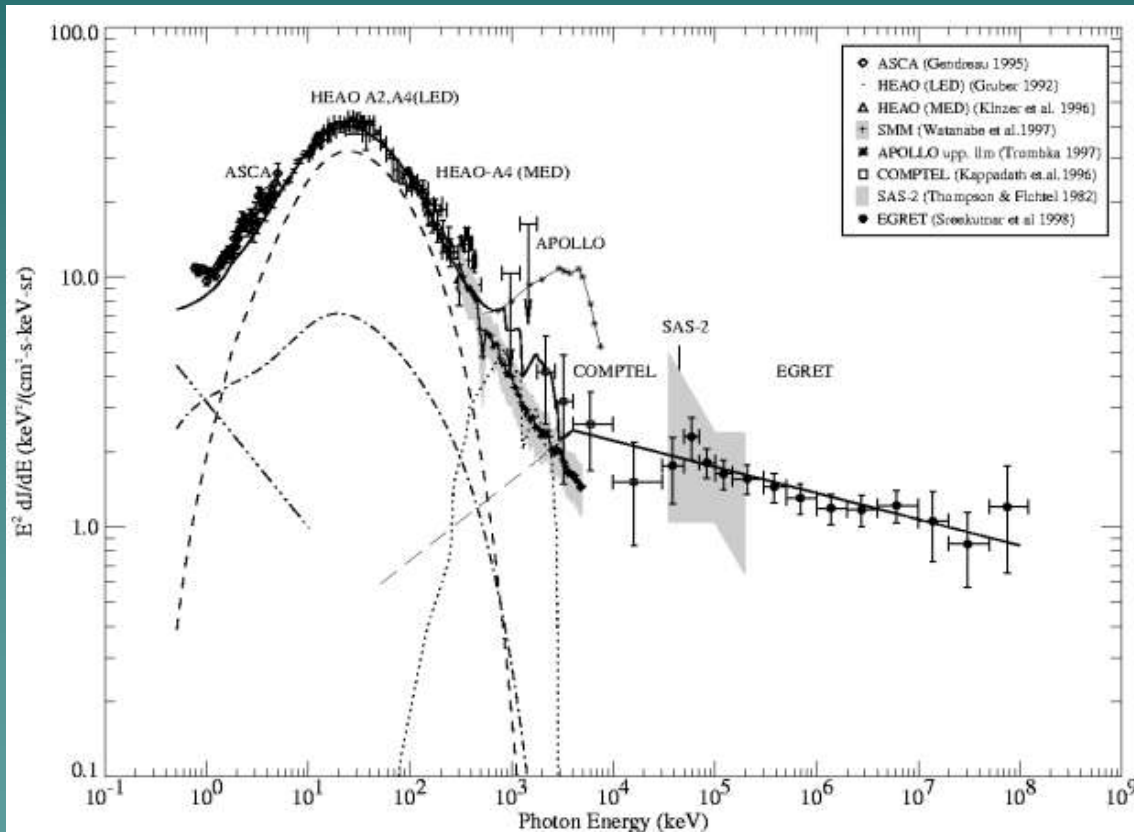
Longitud de onda	Densidad de energía de la radiación (eV m^{-3})	Densidad de fotones (m^{-3})
Radio	$\sim 5 \times 10^{-2}$	$\sim 10^6$
Microondas	3×10^5	5×10^8
Infra-rojo	-	-
Óptico	$\sim 2 \times 10^3$	$\sim 10^3$
Ultravioleta	-	-
Rayos X	75	3×10^{-3}
Rayos γ	8.2	1.3×10^{-6}

Dominados por
la **contribución del CMB**

En la actualidad, nuestro conocimiento de la **radiación de fondo infrarroja y ultravioleta** es demasiado pobre como para arrojar valores confiables de densidad.

ASPECTOS COSMOLÓGICOS

En lo que concierne al fondo difuso gamma, recién con la llegada del satélite Compton y sus instrumentos COMPTEL y EGRET, se ha podido medir con razonable precisión.



A energías mayores de 100 GeV, los rayos γ son absorbidos por el fondo infrarrojo. La detección de fuentes discretas de rayos γ de energías de TeV corresponde a objetos cercanos ($z < 1$). De hecho, los cambios en su distribución espectral con el corrimiento al rojo de las detecciones puede utilizarse para imponer restricciones al fondo infrarrojo.



Espectro determinado sólo por debajo de 100 GeV.
Su forma puede ser ajustada por:

$$I(E) \propto E^{-2.1 \pm 0.03}$$

ASPECTOS COSMOLÓGICOS

Los objetos *discretos* que contribuyen a la RED en rayos γ son:

➤ Galaxias normales:

Esta contribución es difícil de establecer ya que no se conoce la función de luminosidad γ de las galaxias normales.

Su emisión en estas energías depende de su contenido de polvo y gas, así como de la población de rayos cósmicos que haya en ellos.

ASPECTOS COSMOLÓGICOS

Los objetos *discretos* que contribuyen a la RED en rayos γ son:

➤ AGNs:

Estos constituyen probablemente la contribución dominante.

Como los principales AGNs que emiten en γ son fuentes intensas en radio, debería haber correlación entre los fondos difusos en ambas bandas.

Sin embargo, aún no es posible cuantificar la contribución γ de AGNs radio-silenciosos (radio-quiet) y débiles.

El espectro promedio en rayos γ de los AGNs detectados es:

$$I(E) \propto E^{-2.16 \pm 0.31}$$

lo que los convierte en firmes candidatos para explicar el fondo de radiación.

$$I(E) \propto E^{-2.1 \pm 0.03}$$

ASPECTOS COSMOLÓGICOS

Los objetos *discretos* que contribuyen a la RED en rayos γ son:

➤ Galaxias ultra-luminosas:

Son galaxias con mucho gas y formación estelar, por lo que se espera también que sean ricas en explosiones de supernovas y, por lo tanto, en rayos cósmicos.

Este hecho las hace candidatas atractivas para la producción de rayos γ , y podrían contribuir al fondo difuso.

Aún no hay información adicional sobre su espectro γ .

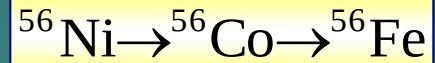
Fermi ha detectado varias de estas galaxias, dando así apoyo adicional a esta hipótesis.

ASPECTOS COSMOLÓGICOS

Los objetos *discretos* que contribuyen a la RED en rayos γ son:

➤ Supernovas:

Las supernovas extragalácticas pueden contribuir a la RED en energías γ bajas debido a las des-excitaciones nucleares a las que dan lugar, como ser:



Esta cadena produce líneas de emisión entre 0.85 MeV y 3.25 MeV. Pérdidas por dispersión Compton de estos fotones pueden resultar en una distribución continua.

ASPECTOS COSMOLÓGICOS

Los objetos *discretos* que contribuyen a la RED en rayos γ son:

➤ Agujeros negros primordiales:

Se ha sugerido que agujeros negros de baja masa ($<10^{15}$ g) podrían haberse formado en el Big Bang. Estos agujeros se enfrían por radiación Hawking y se desintegran liberando rayos γ

Se ha mostrado, sin embargo, que el espectro esperado de la desintegración de una población primordial de agujeros negros es una ley de potencia quebrada:

$$I(E) \propto \begin{cases} E^{-1}, & E < 100 \text{ Mev} \\ E^{-3}, & E \geq 100 \text{ Mev} \end{cases}$$

la cual entra en conflicto con las determinaciones de la RED realizadas por EGRET. Por lo tanto, queda descartado que haya habido una formación masiva de agujeros negros primordiales de baja masa en el Big Bang.

ASPECTOS COSMOLÓGICOS

Además de las contribuciones a la RED de fuentes discretas no resueltas, Se han sugerido también **fuentes intrínsecamente difusas**, entre las cuales encontramos:

➤ Aniquilación materia-antimateria:

Si el Universo está lleno de antimateria uniformemente distribuida, entonces las aniquilaciones:

$$p + \bar{p} \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$$



$$2\gamma$$

producen emisión difusa de rayos γ .

Esto debería producir un espectro que, promediado sobre todos los corrimientos al rojo sería:

$$I(E) \propto E^{-2.8}$$

lo que está en conflicto con las observaciones.

En consecuencia, el universo parece estar formado, al menos en su mayor parte, por materia.

ASPECTOS COSMOLÓGICOS

Entre las fuentes intrínsecamente *difusas* encontramos:

➤ Partículas exóticas:

Observaciones astrofísicas de diversos tipos indican que debe existir materia oscura en el Universo.

Una porción considerable de esta materia parece ser no-bariónica y podría estar formada por neutrinos u otras partículas más exóticas que no aparecen en el modelo estándar.

Partículas exóticas conocidas como **WIMPs**

(Weakly Interactive Massive Particles)

aparecen en extensiones supersimétricas del modelo estándar.

Estas partículas pueden aniquilarse produciendo rayos γ y contribuyendo a la RED.

Hasta la fecha, ningún rasgo particular de la RED ha podido ser asociado a estas supuestas partículas.

ASPECTOS COSMOLÓGICOS

Entre las fuentes intrínsecamente *difusas* encontramos:

➤ Halo galáctico extendido:

Es posible que además de la emisión difusa de nuestra Galaxia, exista una emisión difusa asociada a un halo galáctico.

Partículas relativistas en este halo podrían contribuir al fondo difuso de rayos γ a altas latitudes galácticas.

Sin embargo, no es claro como las partículas se difundirían y acelerarían en el halo, en caso de existir.

ASPECTOS COSMOLÓGICOS

Al presente, la opinión más aceptada es que la contribución dominante a la RED en rayos γ provienen de AGNs no resueltos.

Es muy posible, sin embargo, que haya otras contribuciones significativas.

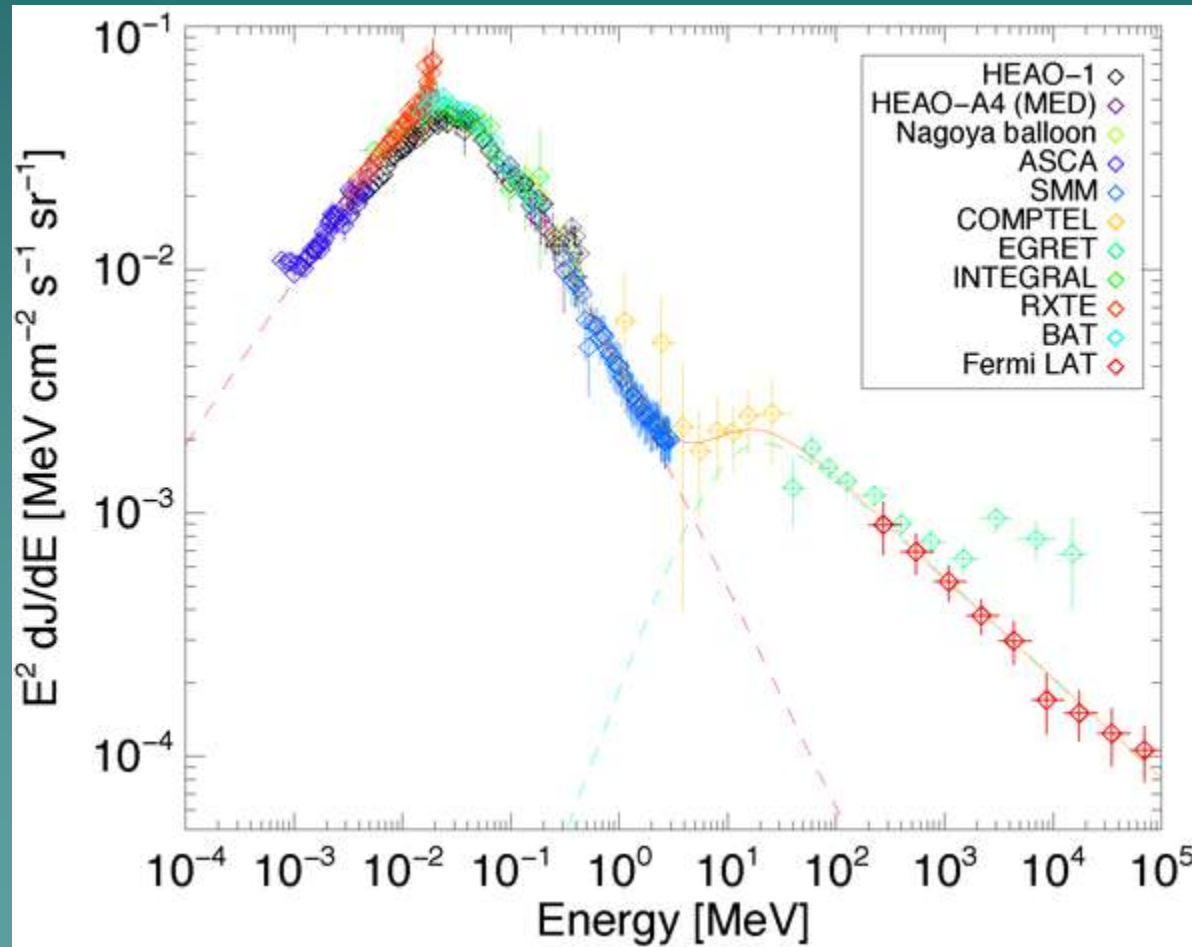
Nuevos instrumentos como FERMI están aportando más información sobre las fuentes discretas de rayos γ , ayudando así a construir funciones de luminosidad y modelos más detallados que permitan explicar la emisión difusa extendida de origen extragaláctico.

ASPECTOS COSMOLÓGICOS

Spectrum of the Isotropic Diffuse Gamma-Ray Emission Derived from First-Year Fermi Large Area Telescope Data

A. A. Abdo et al. (Fermi LAT Collaboration)

Phys. Rev. Lett. 104, 101101 (2010)



ASPECTOS COSMOLÓGICOS

Spectrum of the Isotropic Diffuse Gamma-Ray Emission Derived from First-Year Fermi Large Area Telescope Data

The Fermi LAT Collaboration has their first results on the isotropic diffuse gamma-ray emission measured with the Fermi Large Area Telescope (LAT) in the energy range from 200MeV to 100GeV. The new result, based on the initial ten months of science observations, significantly improves and extends our knowledge of the isotropic diffuse emission at the high-energy end. **The observed emission is softer and lower in intensity than measurements with EGRET had indicated previously.** Fermi's observed spectrum is consistent with a single power-law description over nearly three orders of magnitude in energy, and hence removes an apparent change in spectral shape around $\sim 2\text{--}3\text{GeV}$, observed with EGRET. **The new Fermi measurement, being compatible with a single power law, adds support to the case of a single dominant source class.**

