

Materia Oscura, Energía Oscura, Inflación y Otros Bichos.

Jorge Mastache
jhmastache@mctp.mx

Mesoamerican Centre for Theoretical Physics

Seminario Facultad de Ciencias, UNACH, 2017



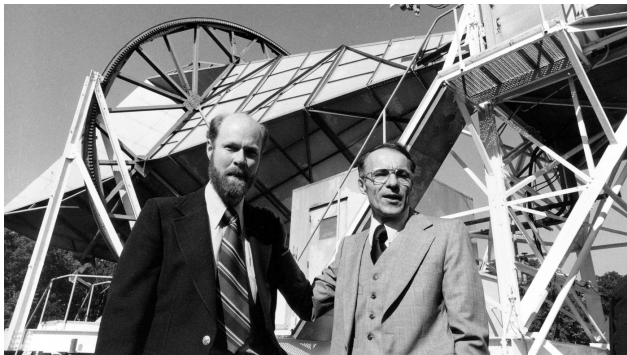
- ➊ Observaciones Cosmológicas.
 - ▶ Radación de Fondo de Micro-ondas (CMB)
 - ▶ SN Ia
- ➋ Cronología del Universo.
- ➌ El modelo Λ CDM
- ➍ Física más allá de Λ CDM
 - ▶ Materia Oscura
 - ▶ Energía Oscura
 - ▶ Inflación
- ➎ Conclusiones.

Observaciones Cosmológicas

► Radiación de Fondo de Microondas (CMB)

En 1956 en los laboratorios Bell, NJ, EUA. Penzias y Wilson construyeron un radiómetro para utilizarlo en radio astronomía y comunicación satelital.

Resultado: Su instrumental tenía un exceso de ruido equivalente a la radiación de 3.5 K con el que no podían explicar.



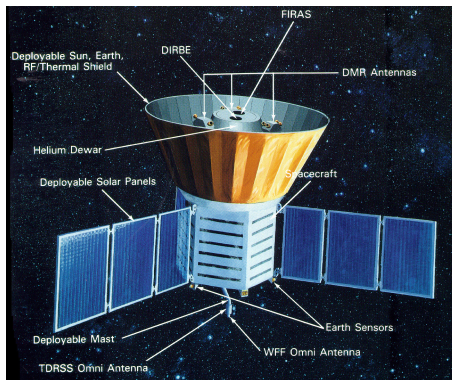
(1978)

Observaciones Cosmológicas

COBE (Cosmic Background Explorer) fue el primer satélite para hacer mediciones cosmológicas.

Resultados:

- ▶ Espectro del cuerpo negro de CMB con una temp de 2.7 K
- ▶ Midio las anisotropías del CMB con una resolución de 10^{-5} .

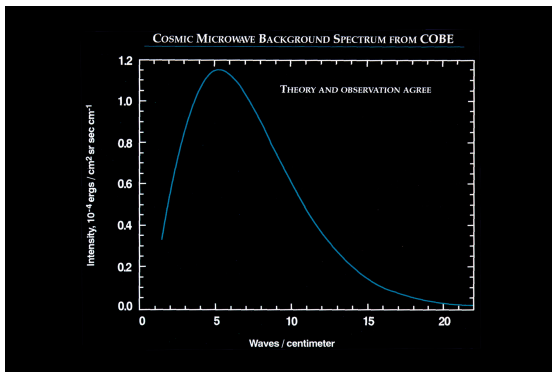


Observaciones Cosmológicas

COBE (Cosmic Background Explorer) fue el primer satélite para hacer mediciones cosmológicas.

Resultados:

- ▶ Espectro del cuerpo negro de CMB con una temp de 2.7 K
- ▶ Midio las anisotropías del CMB con una resolución de 10^{-5} .

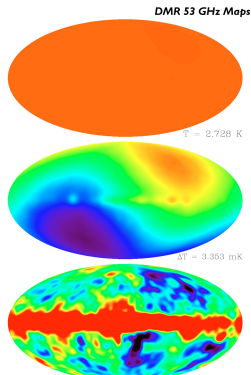


Observaciones Cosmológicas

COBE (Cosmic Background Explorer) fue el primer satélite para hacer mediciones cosmológicas.

Resultados:

- ▶ Espectro del cuerpo negro de CMB con una temp de 2.7 K
- ▶ Midio las anisotropías del CMB con una resolución de 10^{-5} .



Observaciones Cosmológicas

COBE (Cosmic Background Explorer) fue el primer satélite para hacer mediciones cosmológicas.

Resultados:

- ▶ Espectro del cuerpo negro de CMB con una temp de 2.7 K
- ▶ Midio las anisotropías del CMB con una resolución de 10^{-5} .
- ▶ Cosmology on the Beach - Instituto Avanzado de Cosmología



Observaciones Cosmológicas

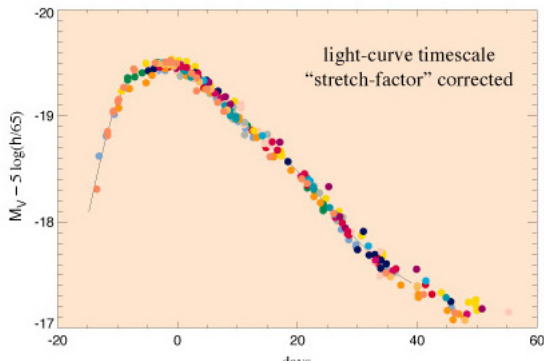
► Supernovas Ia

Las supernovas tipo Ia es un sistema binario formado por una enana blanca y otra estrella. Calcularon el aceleramiento de la expansión del Universo descrita por una constante cosmológica Λ , usando datos del corrimiento al rojo de las supernova de tipo Ia.

Observaciones Cosmológicas

► Supernovas Ia

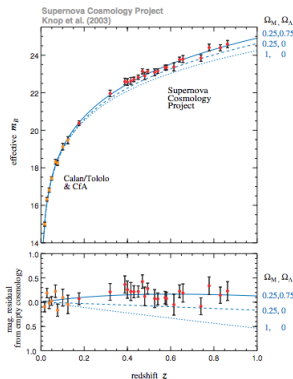
Las supernovas tipo Ia es un sistema binario formado por una enana blanca y otra estrella. Calcularon el aceleramiento de la expansión del Universo descrita por una constante cosmológica Λ , usando datos del corrimiento al rojo de las supernova de tipo Ia.



Observaciones Cosmológicas

► Supernovas Ia

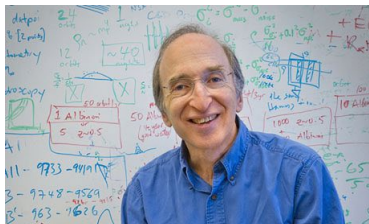
Las supernovas tipo Ia es un sistema binario formado por una enana blanca y otra estrella. Calcularon el aceleramiento de la expansión del Universo descrita por una constante cosmológica Λ , usando datos del corrimiento al rojo de las supernova de tipo Ia.



Observaciones Cosmológicas

► Supernovas Ia

Las supernovas tipo Ia es un sistema binario formado por una enana blanca y otra estrella. Calcularon el aceleramiento de la expansión del Universo descrita por una constante cosmológica Λ , usando datos del corrimiento al rojo de las supernova de tipo Ia.

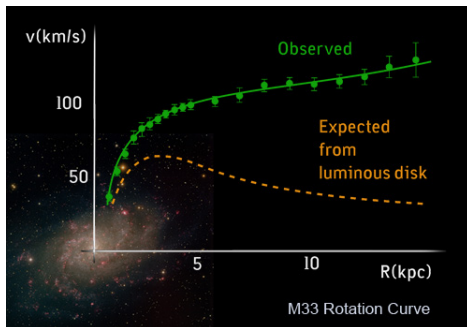


(20011)

Observaciones Cosmológicas

► Curvas de Rotación de Galaxias

Es una gráfica de la velocidad circular de las estrellas visibles + gas en una galaxia contra la distancia radial desde el centro de esa galaxia.



Observaciones Cosmológicas

► Curvas de Rotación de Galaxias

Es una gráfica de la velocidad circular de las estrellas visibles + gas en una galaxia contra la distancia radial desde el centro de esa galaxia.

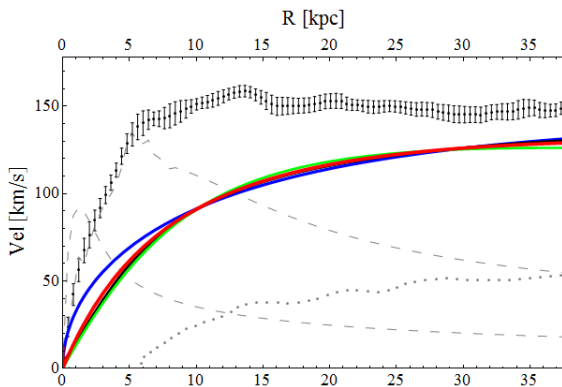
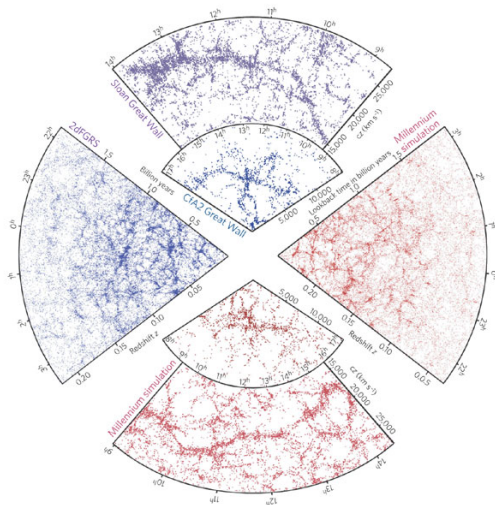


Figure: Galaxy NGC 3198.

- Formación de estructura a gran escala

Observaciones Cosmológicas

► Formación de estructura a gran escala



Observaciones Cosmológicas

Lista de observaciones cosmológicas:

- ▶ Radiación de fondo cósmico.
- ▶ Supernovas Ia.
- ▶ Curvas de rotación de galaxias.
- ▶ Formación de estructura a gran escala.
- ▶ Oscilación acústica de bariones.
- ▶ Clústers de galaxias.
- ▶ Lentes gravitacionales.
- ▶ Lyman alpha forest.
- ▶ Dinámica en la colisión de galaxias.

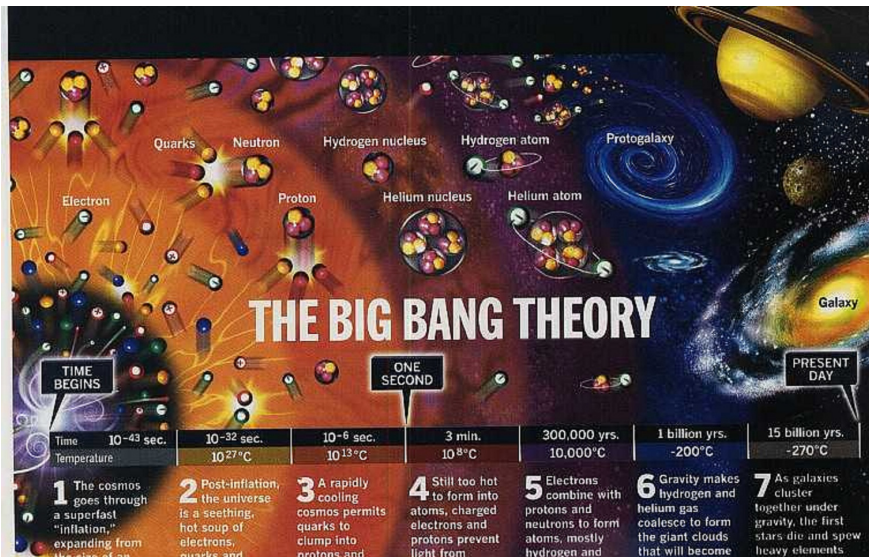
Observaciones Cosmológicas

Lista de observaciones cosmológicas:

- ▶ Radiación de fondo cósmico.
- ▶ Supernovas Ia.
- ▶ Curvas de rotación de galaxias.
- ▶ Formación de estructura a gran escala.
- ▶ Oscilación acústica de bariones.
- ▶ Clústers de galaxias.
- ▶ Lentes gravitacionales.
- ▶ Lyman alpha forest.
- ▶ Dinámica en la colisión de galaxias.

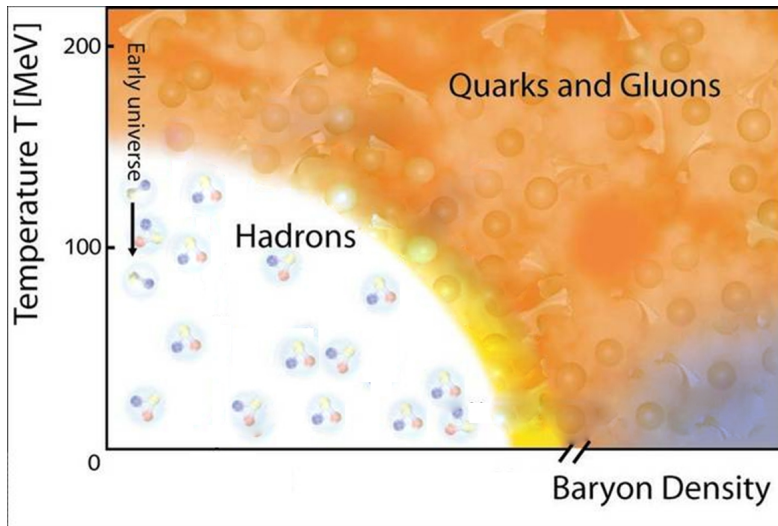
Modelo Λ CDM

► Modelo Λ CDM



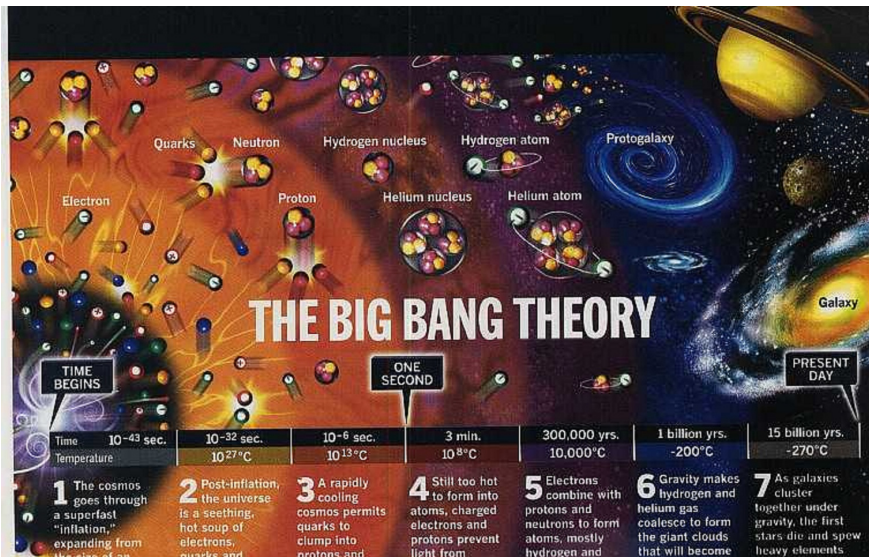
Modelo Λ CDM

► Modelo Λ CDM



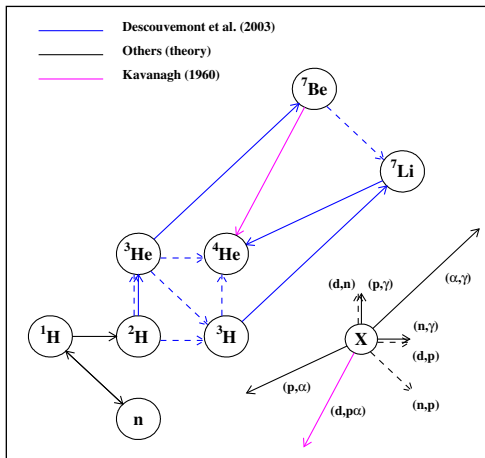
Modelo Λ CDM

► Modelo Λ CDM



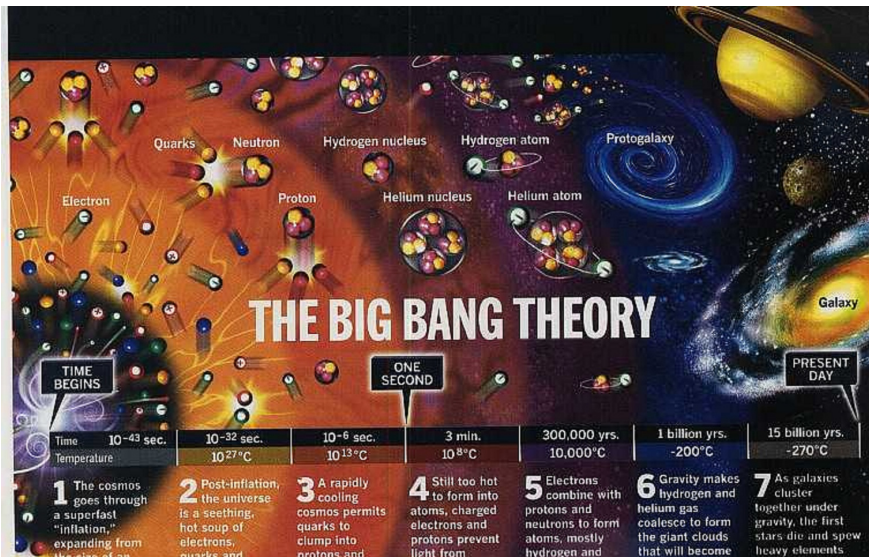
Modelo Λ CDM

► Modelo Λ CDM



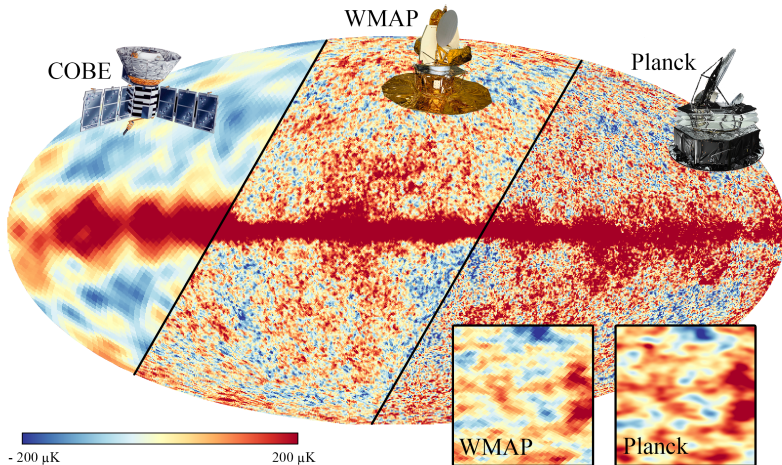
Modelo Λ CDM

► Modelo Λ CDM



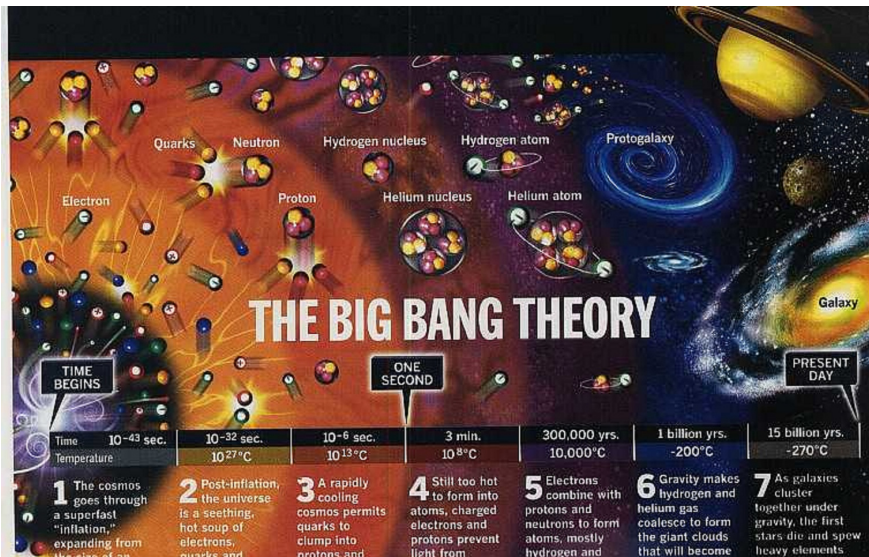
Modelo Λ CDM

► Modelo Λ CDM



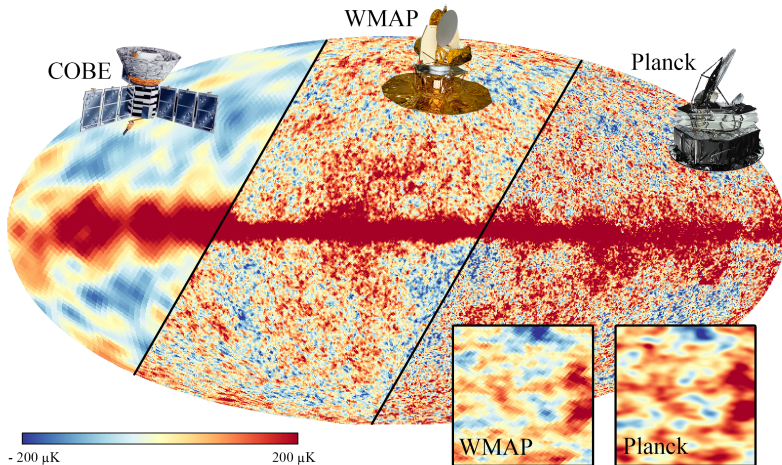
Modelo Λ CDM

► Modelo Λ CDM



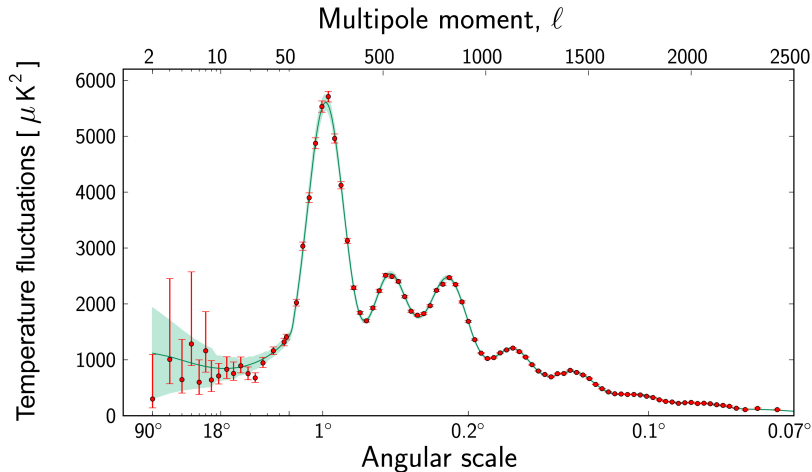
Modelo Λ CDM

► Modelo Λ CDM



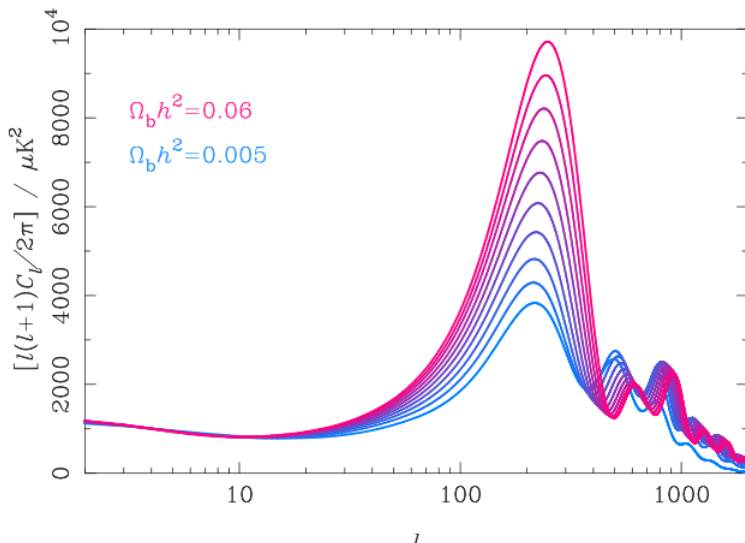
Modelo Λ CDM

► Modelo Λ CDM



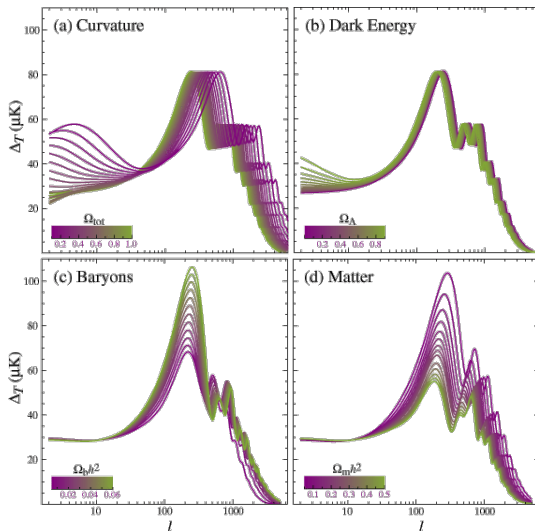
Modelo Λ CDM

► Modelo Λ CDM



Modelo Λ CDM

► Modelo Λ CDM



► Modelo Λ CDM:

- Bariones.
- Materia oscura fría.
- Constante cosmológica Λ .
- Neutrinos.
- Parámetro de Hubble.
- Camino óptico hasta reionización
- Amplitud de las fluctuaciones escalares
- Índice espectral escalar
- Curvatura espacial

► Modelo Λ CDM:

- Bariones.
- Materia oscura fría.
- Constante cosmológica Λ .
- Neutrinos.
- Parámetro de Hubble.
- Camino óptico hasta reionización
- Amplitud de las fluctuaciones escalares
- Índice espectral escalar
- Curvatura espacial

Modelo Λ CDM

► Modelo Λ CDM:

Las ecuaciones de Einstein son:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Modelo Λ CDM

► Modelo Λ CDM:

Las ecuaciones de Einstein son:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

$$R_{\alpha\beta} = R^{\rho}{}_{\alpha\rho\beta} = \partial_{\rho}\Gamma^{\rho}{}_{\beta\alpha} - \partial_{\beta}\Gamma^{\rho}{}_{\rho\alpha} + \Gamma^{\rho}{}_{\rho\lambda}\Gamma^{\lambda}{}_{\beta\alpha} - \Gamma^{\rho}{}_{\beta\lambda}\Gamma^{\lambda}{}_{\rho\alpha}$$

► Modelo Λ CDM:

Las ecuaciones de Einstein son:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

$$R_{\alpha\beta} = R^\rho{}_{\alpha\rho\beta} = \partial_\rho \Gamma^\rho{}_{\beta\alpha} - \partial_\beta \Gamma^\rho{}_{\rho\alpha} + \Gamma^\rho{}_{\rho\lambda} \Gamma^\lambda{}_{\beta\alpha} - \Gamma^\rho{}_{\beta\lambda} \Gamma^\lambda{}_{\rho\alpha}$$

$$\Gamma^i{}_{kl} = \frac{1}{2}g^{im} \left(\frac{\partial g_{mk}}{\partial x^l} + \frac{\partial g_{ml}}{\partial x^k} - \frac{\partial g_{kl}}{\partial x^m} \right)$$

► Modelo Λ CDM:

Las ecuaciones de Einstein son:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

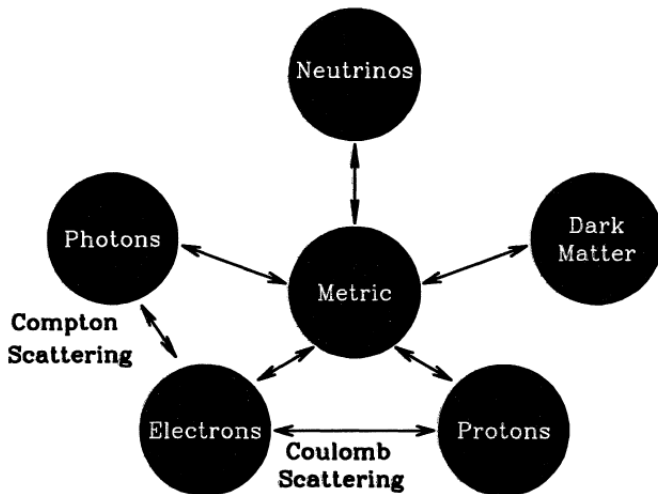
$$R_{\alpha\beta} = R^{\rho}{}_{\alpha\rho\beta} = \partial_{\rho}\Gamma^{\rho}{}_{\beta\alpha} - \partial_{\beta}\Gamma^{\rho}{}_{\rho\alpha} + \Gamma^{\rho}{}_{\rho\lambda}\Gamma^{\lambda}{}_{\beta\alpha} - \Gamma^{\rho}{}_{\beta\lambda}\Gamma^{\lambda}{}_{\rho\alpha}$$

$$\Gamma^i{}_{kl} = \frac{1}{2}g^{im} \left(\frac{\partial g_{mk}}{\partial x^l} + \frac{\partial g_{ml}}{\partial x^k} - \frac{\partial g_{kl}}{\partial x^m} \right)$$

$$ds^2 = -dt^2 + a(t)^2 \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right)$$

Modelo Λ CDM

► Modelo Λ CDM



► Modelo Λ CDM

CDM:

$$\dot{\delta}_c = -\theta_c + 3\dot{\phi}, \quad \dot{\theta}_c = -\frac{\dot{a}}{a} \theta_c + k^2 \psi$$

Baryons:

$$\dot{\delta}_b = -\theta_b + 3\dot{\phi},$$

Photons:

$$\dot{\theta}_b = -\frac{\dot{a}}{a} \theta_b + c_s^2 k^2 \delta_b + \frac{4\bar{\rho}_\gamma}{3\bar{\rho}_b} a n_e \sigma_T (\theta_\gamma - \theta_b) + k^2 \psi.$$

$$\dot{\delta}_\gamma = -\frac{4}{3} \theta_\gamma + 4\dot{\phi},$$

$$\dot{\theta}_\gamma = k^2 \left(\frac{1}{4} \delta_\gamma - \sigma_\gamma \right) + k^2 \psi + a n_e \sigma_T (\theta_b - \theta_\gamma),$$

$$\dot{F}_{\gamma 2} = 2\dot{\sigma}_\gamma = \frac{8}{15} \theta_\gamma - \frac{3}{5} k F_{\gamma 3} - \frac{9}{5} a n_e \sigma_T \sigma_\gamma + \frac{1}{10} a n_e \sigma_T (G_{\gamma 0} + G_{\gamma 2}),$$

$$\dot{F}_{\gamma l} = \frac{k}{2l+1} [l F_{\gamma(l-1)} - (l+1) F_{\gamma(l+1)}] - a n_e \sigma_T F_{\gamma l}, \quad l \geq 3$$

$$\dot{G}_{\gamma l} = \frac{k}{2l+1} [l G_{\gamma(l-1)} - (l+1) G_{\gamma(l+1)}] + a n_e \sigma_T \left[-G_{\gamma l} + \frac{1}{2} (F_{\gamma 2} + G_{\gamma 0} + G_{\gamma 2}) \left(\delta_{l0} + \frac{\delta_{l2}}{5} \right) \right]$$

Neutrinos:

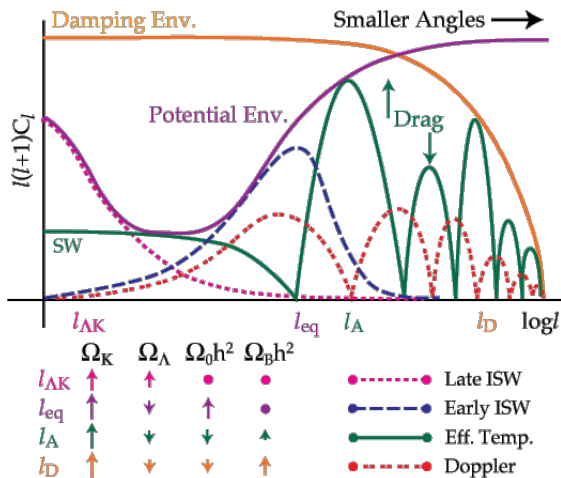
$$\dot{\delta}_\nu = -\frac{4}{3} \theta_\nu + 4\dot{\phi},$$

$$\dot{\theta}_\nu = k^2 \left(\frac{1}{4} \delta_\nu - \sigma_\nu \right) + k^2 \psi,$$

$$\dot{F}_{\nu l} = \frac{k}{2l+1} [l F_{\nu(l-1)} - (l+1) F_{\nu(l+1)}], \quad l \geq 2$$

Modelo Λ CDM

► Modelo Λ CDM

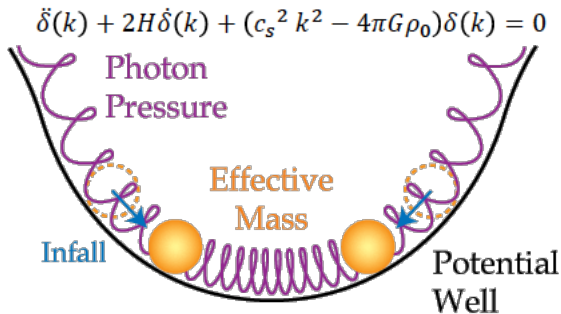


► Modelo Λ CDM

$$\ddot{\delta}(k) + 2H\dot{\delta}(k) + (c_s^2 k^2 - 4\pi G\rho_0)\delta(k) = 0$$

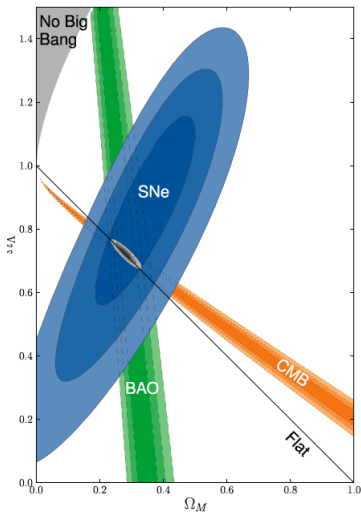
Modelo Λ CDM

► Modelo Λ CDM



Modelo Λ CDM

► Modelo Λ CDM



► Modelo Λ CDM

Parameter	<i>Planck</i>		<i>Planck+lensing</i>		<i>Planck+WP</i>	
	Best fit	68% limits	Best fit	68% limits	Best fit	68% limits
$\Omega_b h^2$	0.022068	0.02207 ± 0.00033	0.022242	0.02217 ± 0.00033	0.022032	0.02205 ± 0.00028
$\Omega_c h^2$	0.12029	0.1196 ± 0.0031	0.11805	0.1186 ± 0.0031	0.12038	0.1199 ± 0.0027
$100\theta_{MC}$	1.04122	1.04132 ± 0.00068	1.04150	1.04141 ± 0.00067	1.04119	1.04131 ± 0.00063
τ	0.0925	0.097 ± 0.038	0.0949	0.089 ± 0.032	0.0925	$0.089^{+0.012}_{-0.014}$
n_s	0.9624	0.9616 ± 0.0094	0.9675	0.9635 ± 0.0094	0.9619	0.9603 ± 0.0073
$\ln(10^{10} A_s)$	3.098	3.103 ± 0.072	3.098	3.085 ± 0.057	3.0980	$3.089^{+0.024}_{-0.027}$
Ω_Λ	0.6825	0.686 ± 0.020	0.6964	0.693 ± 0.019	0.6817	$0.685^{+0.018}_{-0.016}$
Ω_m	0.3175	0.314 ± 0.020	0.3036	0.307 ± 0.019	0.3183	$0.315^{+0.016}_{-0.018}$
σ_8	0.8344	0.834 ± 0.027	0.8285	0.823 ± 0.018	0.8347	0.829 ± 0.012
z_{re}	11.35	$11.4^{+4.0}_{-2.8}$	11.45	$10.8^{+3.1}_{-2.5}$	11.37	11.1 ± 1.1
H_0	67.11	67.4 ± 1.4	68.14	67.9 ± 1.5	67.04	67.3 ± 1.2

- ▶ Trabajo por hacer...
 - ▶ Energía oscura ó teorías alternas a RG
 - ▶ Materia oscura
 - ▶ Reionización
 - ▶ Inflación
 - ▶ Condiciones iniciales primordiales
 - ▶ Neutrino
 - ▶ Abundancia primordial del He

Bound Dark Matter

► Bound Dark Matter

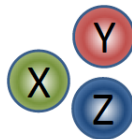
$$\alpha(E) \ll 1$$

$$E > E_c$$

$$m = 0$$

$$v \rightarrow c$$

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{a}{a_0} \right)^{-4}$$



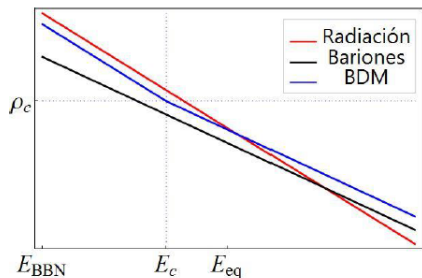
$$\alpha(E) \geq 1$$

$$E < E_c$$

$$m \neq 0$$

$$v \rightarrow 0$$

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{a}{a_0} \right)^{-3}$$



$$\alpha_s(Q^2)$$

Confinement
(Non-perturbative QCD)

High energy

(Perturbative QCD)
Asymptotic Freedom



Bound Dark Matter

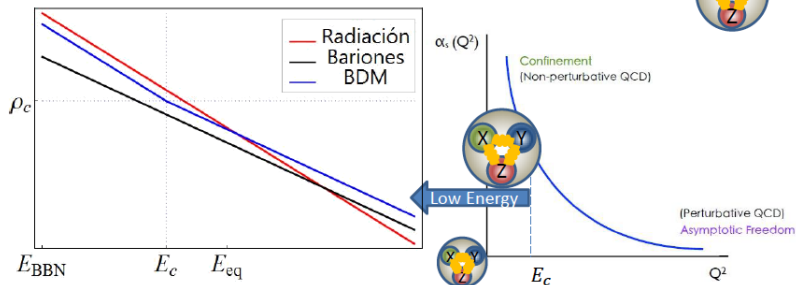
► Bound Dark Matter

$$\alpha(E) \ll 1 \quad E > E_c \quad m = 0 \quad \rho = \rho_0 \left(\frac{a}{a_0} \right)^{-4}$$

$$v \rightarrow c$$

$$\alpha(E) \geq 1 \quad E < E_c \quad m \neq 0 \quad \rho = \rho_0 \left(\frac{a}{a_0} \right)^{-3}$$

$$v \rightarrow 0$$



Dispersión inversa: el enfoque

Las ecuaciones de evolución de las perturbaciones inflacionarias se describen por la ecuación de Mukhanov-Sasaki

$$\phi_k'' + \left[k^2 - \frac{z''}{z} \right] = 0$$

Considere hacer la siguiente sustitución en la expresión anterior:

$$r = -\eta \quad \text{and} \quad \frac{z''}{z} = V(r) + \frac{\ell(\ell+1)}{r^2}.$$

El resultado es:

$$\phi''(k, r) + \left[k^2 - \frac{\ell(\ell+1)}{r^2} - V(r) \right] \phi(k, r) = 0,$$

Dispersión inversa: el enfoque

Las ecuaciones de evolución de las perturbaciones inflacionarias se describen por la ecuación de Mukhanov-Sasaki

$$\phi_k'' + \left[k^2 - \frac{z''}{z} \right] = 0$$

Considere hacer la siguiente sustitución en la expresión anterior:

$$r = -\eta \quad \text{and} \quad \frac{z''}{z} = V(r) + \frac{\ell(\ell+1)}{r^2}.$$

El resultado es:

$$\phi''(k, r) + \left[k^2 - \frac{\ell(\ell+1)}{r^2} - V(r) \right] \phi(k, r) = 0,$$

Dispersión inversa: el enfoque

Las ecuaciones de evolución de las perturbaciones inflacionarias se describen por la ecuación de Mukhanov-Sasaki

$$\phi_k'' + \left[k^2 - \frac{z''}{z} \right] = 0$$

Considere hacer la siguiente sustitución en la expresión anterior:

$$r = -\eta \quad \text{and} \quad \frac{z''}{z} = V(r) + \frac{\ell(\ell+1)}{r^2}.$$

El resultado es:

$$\phi''(k, r) + \left[k^2 - \frac{\ell(\ell+1)}{r^2} - V(r) \right] \phi(k, r) = 0,$$

Equación radial de Schrödinger independiente del tiempo

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \left(k^2 - \frac{\ell(\ell+1)}{r^2} - V(r) \right) u = 0 \quad \text{donde} \quad k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$$

Dispersión inversa: el enfoque

Las ecuaciones de evolución de las perturbaciones inflacionarias se describen por la ecuación de Mukanov-Sasaki

$$\phi_k'' + \left[k^2 - \frac{z''}{z} \right] = 0$$

Considere hacer la siguiente sustitución en la expresión anterior:

$$r = -\eta \quad \text{and} \quad \frac{z''}{z} = V(r) + \frac{\ell(\ell + 1)}{r^2}.$$

El resultado es:

$$\phi''(k, r) + \left[k^2 - \frac{\ell(\ell + 1)}{r^2} - V(r) \right] \phi(k, r) = 0,$$

Por lo tanto, el método de dispersión inversa puede ser aplicada en la ecuación de Mukanov-Sasaki!

Conclusions

- ▶ Hasta este momento el modelo Λ CDM es el más consistente con todas las observaciones.
- ▶ Λ es una constante cosmológica que describe la expansión acelerada del Universo y representa la “naturaleza” de la energía oscura. Ocupa el 67% de la densidad de energía del Universo.
- ▶ La materia oscura es una componente del Universo no bariónica y sin colisiones, ocupa el 29% de densidad de energía del Universo.
- ▶ Inflación es la etapa acelerada del Universo en las primeras fracciones de segundo que resuelve los problemas de la cosmología estándar.
- ▶ Inflación, materia y energía oscura son una prioridad en el desarrollo de la ciencia y en la actualidad existen un gran número de proyectos destinados a desenmarañar su naturaleza.

GRACIAS!