

Distancias



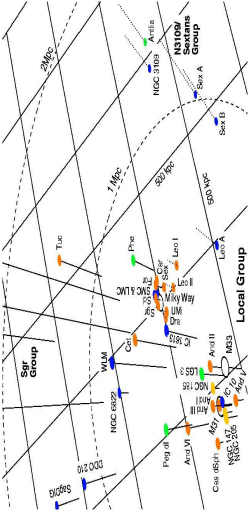
- Distancia a próxima centauri = 4.4 a.l.

Distancias



- Diámetro Via Lactea = 80 000 a. l. !

Distancias

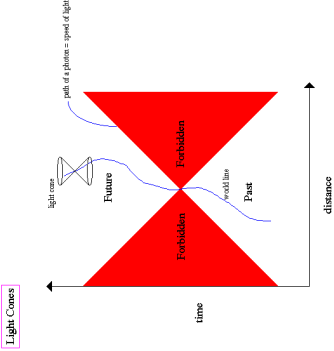


- Grupo Local: Millones de a. l. !

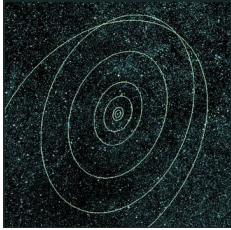
Distancias

- Velocidad de la luz: $c = 300\,000\text{ km/s}$
- 1 año-luz (en km) = $9\,460\,800\,000\,000\text{ km}$

Cono de luz



Distancias



- Distancia al Sol = 8 minutos-luz

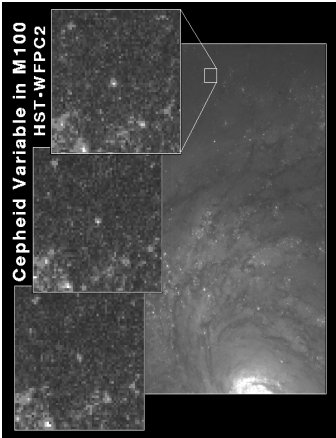
Primeras preguntas...

- ¿ Es el Universo infinito ?
- ¿ Cuál es la edad del Universo ?
- ¿ Cuál es el futuro del Universo ?

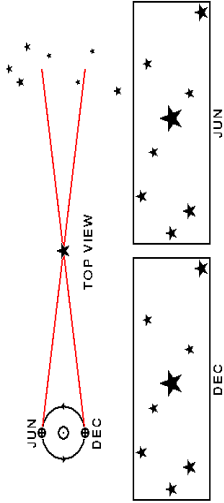
Concepto básico

- Velocidad de la luz es constante para todos los observadores en el Universo y es la máxima velocidad.

Estrellas Cefeidas



Distancias



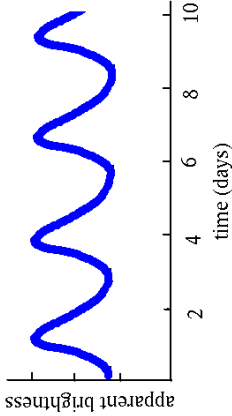
- Paralaje: $d = 1 / p$
– D [pc] ; p ["]

Concepto básico

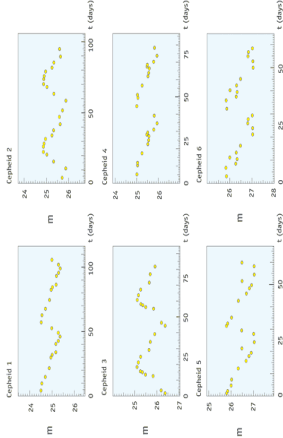
- La energia recibida de una estrella, I , es proporcional a su Luminosidad absoluta L
- Tambien es inversamente proporcional al cuadrado de su distancia, d , i.e.:
- $I = L / 4\pi d^2$

Estrellas Cefeidas

- Estrellas variables en escalas de días



Estrellas Cefeidas

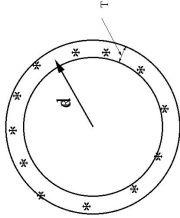


Distancias

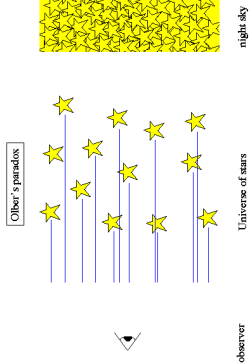
- 1 pc = 3.2 a.l.
- Método de paralaje sólo es aplicable a algunos cientos de [pc]
- Ejemplo: paralaje de Sirio = 0.38 " , i.e., $d = 2.6$ [pc]
- ¿Cómo medir distancias mayores?

Paradoja de Olbers (1826)

- $L_{est} = L / (4\pi d^2)$
- $L_{casc}(d) = L_{est} \times N(d)$
- $N(d) = \rho \times V(d)$
- $V(d) = T \times 4\pi d^2$
- $L_{casc}(R) = Cte !$
- $L_{tot} = \infty !$

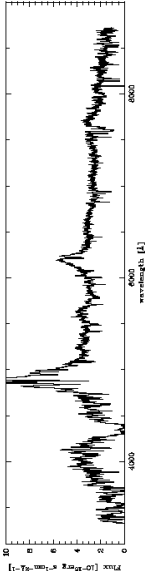


Paradoja de Olbers (1826)



Efecto Doppler

- El espectro de un cuasar



Efecto Doppler

- Se define el corrimiento al rojo ("redshift") como
- Para velocidades "pequeñas":

$$1+z \equiv \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_0}$$

$$z \approx \frac{v_r}{c}$$

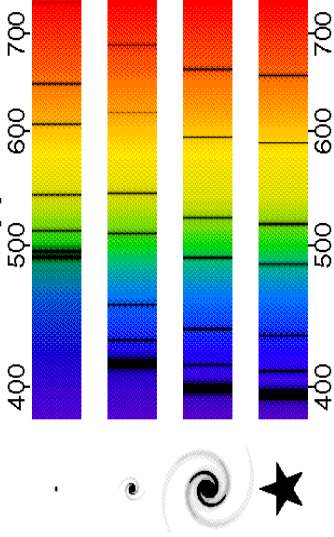
Efecto Doppler

- Se define el corrimiento al rojo ("redshift") como
- Para velocidades "pequeñas":

$$1+z \equiv \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_0} = \sqrt{\frac{1+v_r/c}{1-v_r/c}}$$

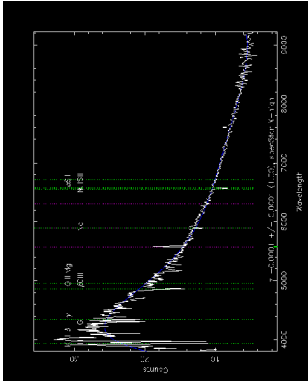
$$z \approx \frac{v_r}{c}$$

Efecto Doppler



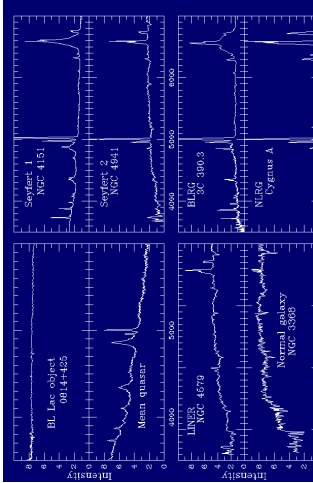
Efecto Doppler

- El espectro de una estrella



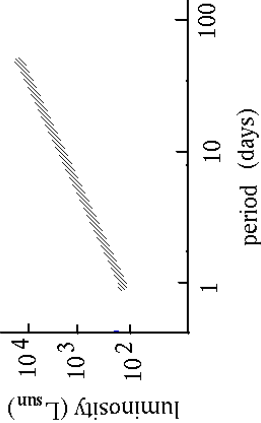
Efecto Doppler

- El espectro de galaxias activas



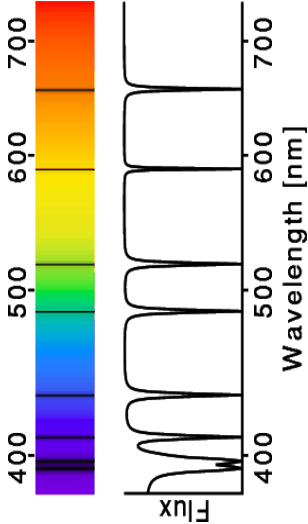
Estrellas Cefeidas

- Su período es mayor si su luminosidad intrínseca es mayor



Efecto Doppler

- Espectro:



Efecto Doppler

- Características espectroscópicas de un objeto que se aleja (acerca) aparecen desplazadas hacia longitudes de onda mayores (menores)

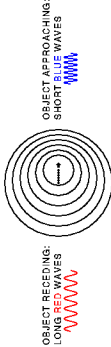


Gráfico original de Hubble

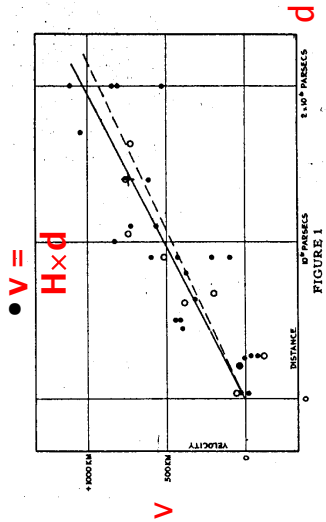


Tabla del paper original de Hubble (1929)

- Se puede apreciar que objetos a mayores distancias tienen mayores velocidades de recesión
- También se aprecia una dispersión importante, producto de
 - Velocidades peculiares de las galaxias
 - Errores de medición en las distancias

Tabla del paper original de Hubble (1929)

Cluster nebula in group	Distance in light years	Redshifts H-K
1	75,000,000	11.1
2	1,000,000,000	11.1
3	1,400,000,000	11.1
4	2,500,000,000	11.1
5	3,860,000,000	11.1

Tabla del paper original de Hubble (1929)

object	ms	r	v	mt	Mt
S. Mag.	..	0.032	+170	1.5	-16.0
L. Mag.	..	0.034	+290	0.5	17.2
N.G.C. 6822	..	0.214	-130	9.0	12.7
298	..	0.263	-70	7.0	15.1
299	..	0.263	-70	7.0	15.1
224	..	0.275	-220	5.0	17.2
5457	17.0	0.45	+200	9.9	13.3
4736	17.3	0.5	+290	8.4	15.1
5194	17.3	0.5	+270	7.4	16.1
4449	17.8	0.63	+200	9.5	14.5
4214	18.3	0.8	+300	11.3	13.2

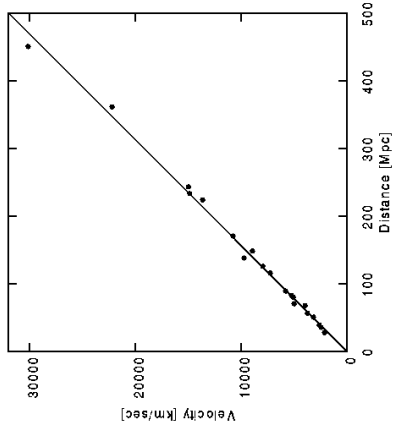
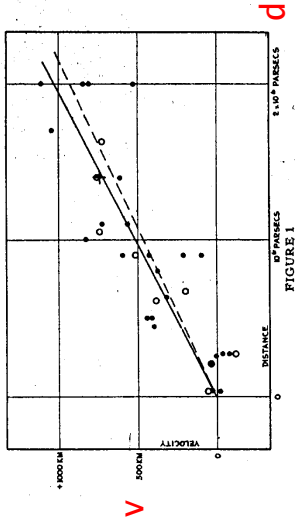


Gráfico original de Hubble



Efecto Doppler

- Se define el corrimiento al rojo ("redshift") como $1+z \equiv \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_0}$
- Para velocidades "pequeñas": $z \approx \frac{v_r}{c}$
- Para velocidades "grandes": $\frac{v_r}{c} = \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z) + 1}$

La Ley de Hubble

- Leavitt: En 1908 descubrió que las Cefeidas en las Nubes de Magallanes son más brillantes si su período es mayor
- Slipher: En 1917 midió redshifts de 25 espirales cercanas. 21 se están alejando



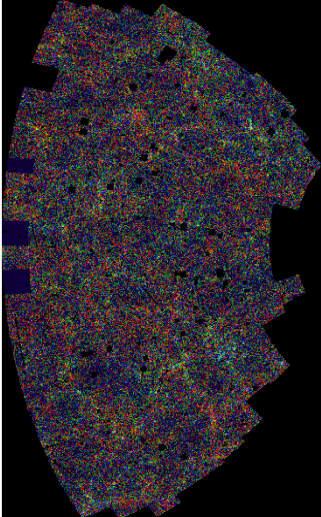
La Ley de Hubble

- Hubble: En 1929 efectúa nuevas mediciones de galaxias desde Monte Wilson (2.5m) y encuentra que....



Principio cosmológico

- El Universo es homogéneo a grandes escalas
 - No hay lugares especiales
 - La densidad media es uniforme
- El Universo es isotrópico a grandes escalas
 - No hay direcciones especiales
 - El Universo se ve igual en todas direcciones



Principio cosmológico

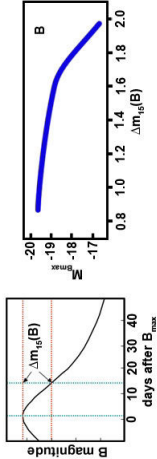
Algunos indicadores extragalácticos de distancias

- Locales:
 - Cefeidas (hasta 10 Millones de a.l.)
 - Novas
 - RR Lyras
- Globales:
 - Relación Fischer-Tully
 - **Supernovas**
 - Diámetros de galaxias brillantes

Algunos indicadores extragalácticos de distancias



Algunos indicadores extragalácticos de distancias



Edad del Universo ?

- Imaginemos que una gran explosión ocurrió hace un tiempo “T” (la edad del Universo)
- Las galaxias que partieron más rápido se encuentran más lejos...a una distancia $r = v \times T$ (ó equivalentemente: $v = r / T$)
- Es decir, $1/T = H_0$, o bien $T = 1/H_0$

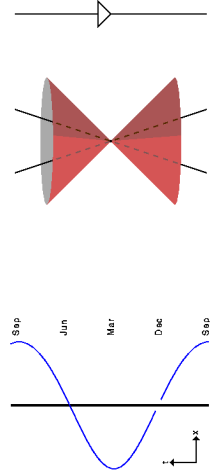
Tarea 1

- Calcular la distancia de una galaxia con un redshift observado de $z = 0.02$ y usando una constante de Hubble de 20 km/s por Millón de a.l.
- Es ésta la distancia cuando la luz salió de la galaxia o cuando llegó al telescopio?
- Que incertezas hay en la medición de esta distancia?

Tarea 2

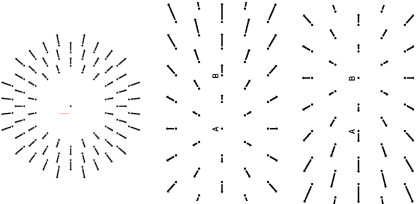
- Tarea 2: calcular la Edad del Universo usando $T = 1/H_0$ y $H_0 = 20$ km/s por millón de a. l.
- **Y si se usa H_0 derivada por Hubble?**

Diagrama espacio-tiempo



- Se expande el Universo ?
- Universo “Steady-state” aún sostenible a principios del siglo XX:
 - Constante de Hubble original incompatible con edad de estrellas más viejas en nuestra galaxia
 - Pero: $F = GMm/r^2$!!
 - implica introducir “constante cosmológica”

- El Universo se expande
- Poniendo la película hacia atrás en el tiempo...
- ...el Universo se achica manteniendo la misma energía...
- ... se pone más denso y eleva su temperatura ...
- ...alcanzando a ser un punto en algun instante.



Factor de escala

$D_G(t) = a(t) * D_G(t_0)$

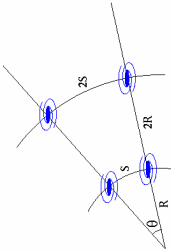
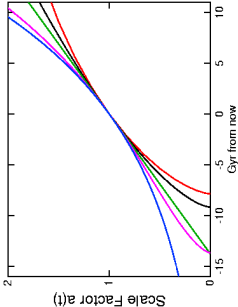
Principio cosmológico



Principio cosmológico

- Homogeneidad no se aplica localmente
 - Cúmulos, galaxias y estrellas son “grumosos”
- Isotropía no se aplica localmente
 - La Vía Láctea bloquea nuestra visión en una dirección
 - Fuera de nuestra galaxia hay menos estrellas

Edad del Universo ?



Evidencias?

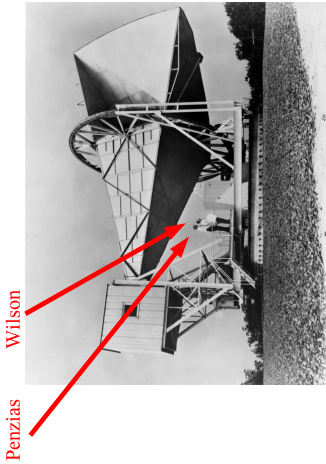
- Peebles en 1963 concluye que tal radiación debe estar en el rango de las microondas, correspondiente a una temperatura de 4 K



Evidencias?

- Trabajando en una antena de comunicaciones, Penzias y Wilson descubren tal radiación por casualidad
- La “radiación de fondo cósmico” es la misma adonde sea se apunte la antena!

Evidencias?



Funcion de Plank

$$E(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

$$h = 6.625 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sec} \quad (\text{Planck Constant})$$

$$k = 1.38 \times 10^{-16} \text{ erg/K} \quad (\text{Boltzmann Constant})$$

$$c = 3 \times 10^{10} \text{ cm/sec} \quad (\text{Speed of Light})$$

Ley de Wien

- La longitud de onda peak en la radiación de cuerpo negro es inversamente proporcional a su temperatura :
- $\lambda_{\text{max}} \times T = 0.3 \text{ [cm K]}$

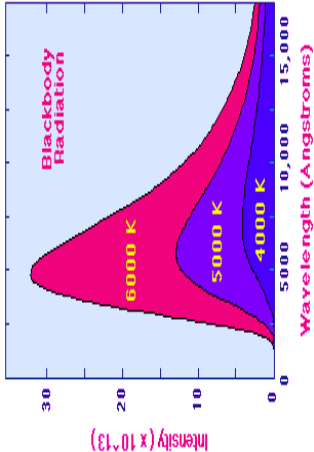
Evidencias?

- La radiación de esos orígenes debe encontrarse en todas partes
- A qué longitud de onda?

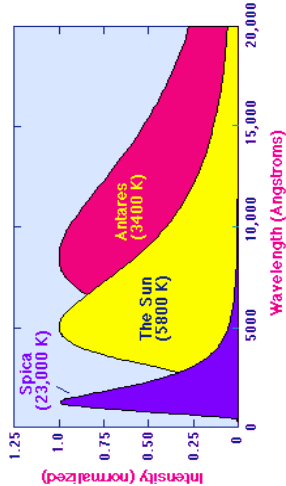
Evidencias?

- Si el Universo se ha estado expandiendo, entonces se ha ido enfriando
- Si se ha ido enfriando su radiación debe sufrir un corrimiento a longitudes de onda más largas (“corrimiento al rojo”)
- (Comparar con un hierro incandescente)

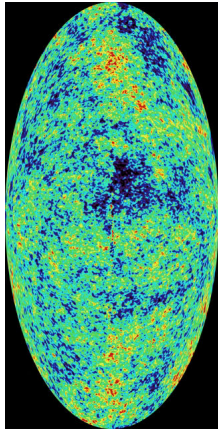
Radiacion de cuerpo negro



Radiacion de cuerpo negro

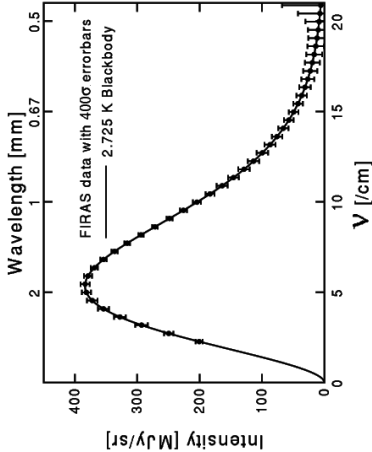


Radiacion de fondo
cósmica

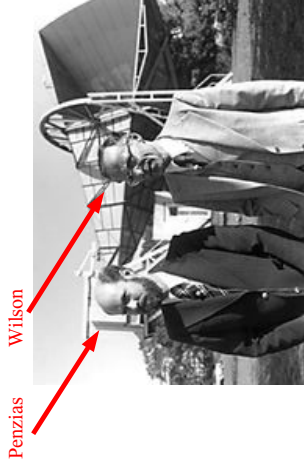


$$\frac{\Delta T}{T} = 0.00001$$

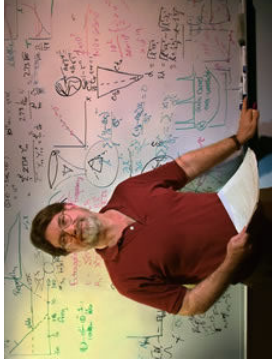
Radiacion de fondo cósmica



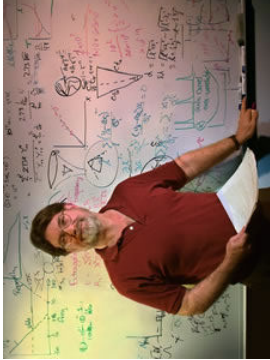
Evidencias?



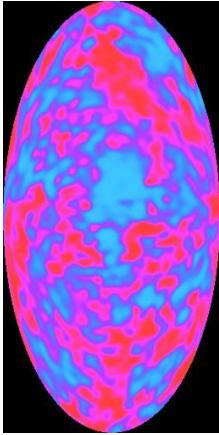
Smoot, premio Nobel de Física 2006



George Smoot

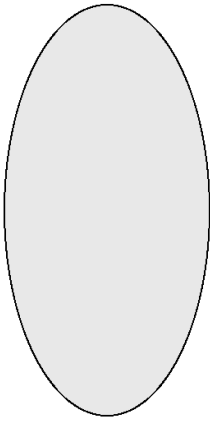


Radiacion de fondo
cósmica



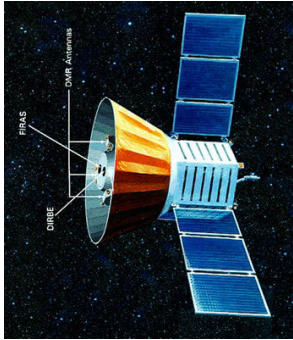
$$\frac{\Delta T}{T} = 0.00001$$

Radiacion de fondo
cósmica



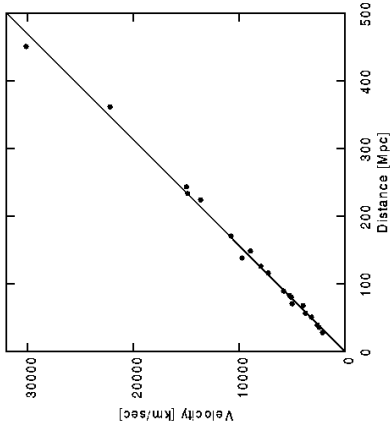
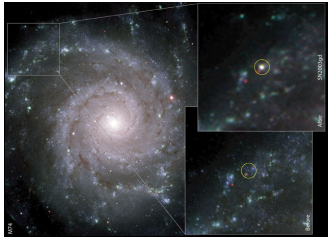
Radiacion de fondo
cósmica

Cosmic microwave Background Explorer (COBE)

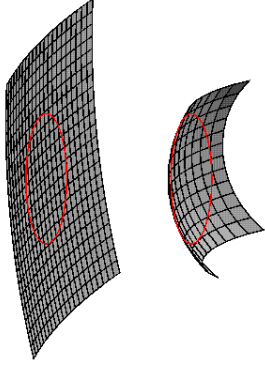


Modelos de Universo • M/V es una densidad. Llamémosla “densidad crítica”: $M/V = \rho_C$ • Entonces: $\rho_C = 3H^2/(8\pi G)$ • decide el destino del Universo $\rho_C = 1.88E-26 \text{ h}^{-2} \text{ [kg/m}^3\text{]}$	Modelos de Universo • La energía cinética de la galaxia es $K = mv^2/2$ • La energía potencial debido a la atracción del Universo es $U = GmM/R$ • donde: m es la masa de la galaxia, M es la masa del Universo y R es el radio del Universo	Gravitación • Si todos los objetos masivos en el Universo se atraen mutuamente – ...entonces deberían colapsar al cabo de un tiempo • Dos posibilidades – Constante cosmológica – Los objetos se alejan unos a otros debido a algún otro evento
Modelos de Universo • M/V es una densidad. Llamémosla “densidad crítica”: $M/V = \rho_C \quad \sim 1 \text{ vía láctea/Mpc}^3$ • Entonces: $\rho_C = 3H^2/(8\pi G)$ • decide el destino del Universo $\rho_C = 1.88E-26 \text{ h}^{-2} \text{ [kg/m}^3\text{]}$	Modelos de Universo • $mv^2/2 = GmM/R$ • Sustituyamos la velocidad de la galaxia por HR (de la Ley de Hubble). Queda: $m(HR)^2/2 = GmM/R$ • m se “cancela” y queda: $H^2/(2G) = M/R^3$	Tres suposiciones • Las leyes de la física han sido y son las mismas en todas partes del Universo • El Universo es homogéneo e isotrópico • La energía del vacío es, o bien nula, o bien muy pequeña
Modelos de Universo • Universo denso (cerrado): $M/V > \rho_C$ • La expansión se frena hasta llegar a un máximo • Luego el Universo comienza un colapso (“Big Crunch”)	Modelos de Universo • Sustituyamos R^3 usando el volumen de una esfera $V = 4\pi R^3/3$ • Entonces $K = U$ queda: $3H^2/(8\pi G) = M/V$	Modelos de Universo • Consideremos una galaxia en el extremo del Universo • cuya energía cinética alcanza exactamente a balancear la atracción gravitacional del Universo • $K = U$

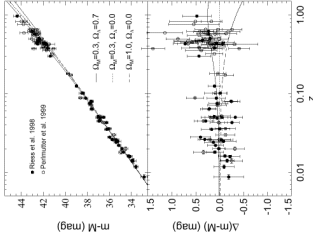
Expansion acelerada?



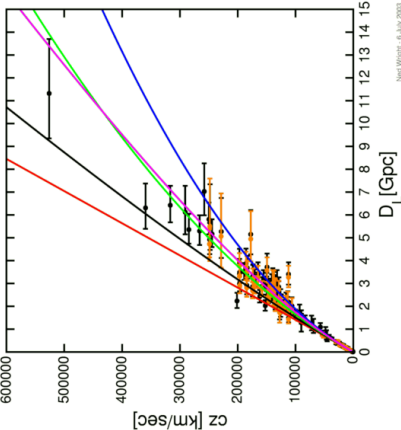
Problema del “horizonte”



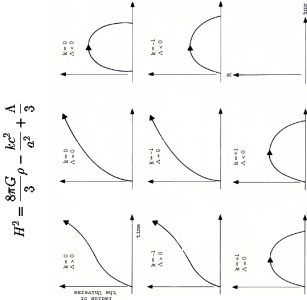
Supernovas



Expansion acelerada?

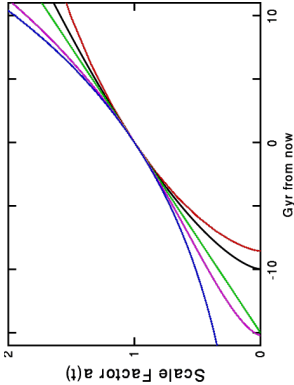


Energía oscura



$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{\Lambda}{a^2} + \frac{\dot{a}^2}{a^2}$$

Expansion acelerada?



Constante cosmológica

- Einstein encontró que un valor no nulo de la constante cosmológica (Λ) significaba que el Universo se expandía o contraía
- Siendo que la teoría de ese entonces (1917) sostenía un Universo estático, Einstein decidió darle el valor cero a Λ

Constante cosmológica

- Einstein consideró ésto como “uno de los grandes errores” de su vida
- Sin embargo, los últimos resultados usando supernovas a alto redshift (parecen estar más lejos que lo que se supone deben estar) apoyan un Universo “acelerado”
- Esto es equivalente a Λ no nula

Retrocediendo en el tiempo...

- Podemos usar estos conocimientos aplicándolos al Universo (modelado como un gas)
- y usando: $T / 2.7 \text{ [K]} = 1+z$
- z nos da una idea del tiempo al que vamos retrocediendo (pero los números exactos dependen del modelo cosmológico que usemos!)

Retrocediendo en el tiempo...

- Usando la Ley de Wien
 $\lambda_{\text{max}} \times T = 0.3 \text{ [cm K]}$
- y el efecto Doppler
- Encontramos que
 $T / 2.7 \text{ [K]} = 1+z$

$$1+z \equiv \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_0}$$

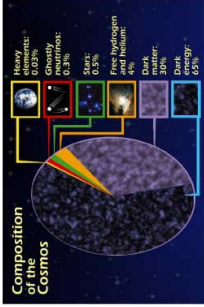
Retrocediendo en el tiempo...

- A una temperatura menor que unos 3000 K nucleones y electrones permanecen ligados formando átomos.
- El periodo de **recombinación**, por lo tanto, sucedió cuando el Universo se enfrió hasta llegar a esta temperatura
- Esto debe haber sucedido a redshift $z \sim 1000$ (~300 000 años después del BB)

Retrocediendo en el tiempo...

- Cuando la recombinación se completa, la radiación (fotones) puede fluir libremente
- Antes de ésto, cada fotón era desviado por algún electrón libre
- Decimos que el Universo se hace **transparente**. La radiación de fondo cósmica está compuesta por fotones que han viajado desde estos orígenes.

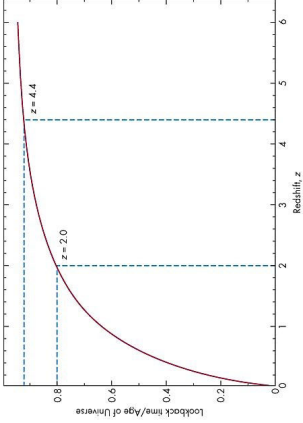
Modelos de Universo



This diagram shows the ingredients that make up the universe. Astronomers now realize that the universe's main ingredient is "dark energy," a mysterious form of energy that exists between galaxies. The next most important ingredient is dark matter, which is an unknown form of matter. The rest of the universe consists of ordinary matter. Most of it is locked up in stars and clouds of gas. A tiny fraction of the matter is composed of heavier elements, the stuff of which humans and planets are made.

Retrocediendo en el tiempo...

$$1+z \equiv \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_0}$$



Retrocediendo en el tiempo...

$$1+z \equiv \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_0}$$

- Edad estimada del Sol, unos 5000 millones de años, es decir el sol nació cuando el Universo era unas 2.5 veces más joven, o bien a redshift $z \sim 1$
- Los cuasares y galaxias más lejanos (conocidos hasta ahora) se observan a $z \sim 6$

<u>Retrocediendo en el tiempo...</u> • Cuando $T \sim 1000$ GeV (el Universo tiene $1E-11$ segundos de edad) las fuerzas electromagnética y débil se separan • Cuando $T \sim 1E15$ GeV ($1E-35$ segundos) las fuerzas electromagnética, débil y nuclear coexisten en forma unificada
--

<u>Retrocediendo en el tiempo...</u> • Los nucleones (protones y neutrones) de los cuales se formarán los elementos livianos se forman cuando $T \sim 1$ GeV • La edad del Universo era entonces aproximadamente una millonésima de segundo

<u>Retrocediendo en el tiempo...</u> • Con anterioridad a la edad de $1E-43$ segundos las distancias y tiempos son tan pequeños que el Universo ya no puede explicarse con la física actual • Este régimen se llama Era de Planck
--

<u>Retrocediendo en el tiempo...</u> • Sin embargo, se forma sólo 1 protón por cada 100 millones de fotones existentes • Decimos que la energía total del Universo estaba dominada por la radiación • Notar que el Universo actual se ha enfriado tanto (2.7 K) que su energía total se encuentra en forma de materia ($E = mc^2$)

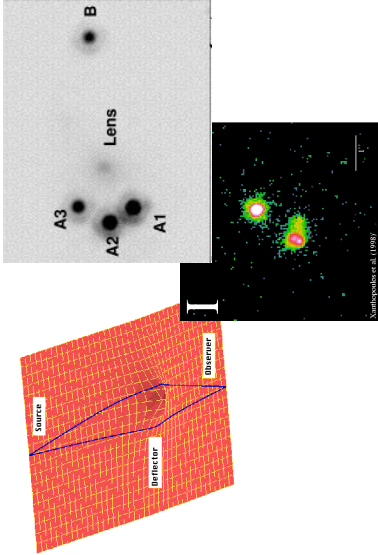
<u>Retrocediendo en el tiempo...</u> • Un poco antes de que el Universo cumpliera 3 minutos de vida su temperatura bordea 1 MeV • Los elementos livianos se acaban de formar: H, D, He, L • H: $\sim 75\%$ He: $\sim 25\%$ • Llamamos a éste período Era de Nucleosíntesis

<u>Resumen: los cuatro pilares de la cosmología</u> • Expansión del Universo • Ley de Hubble • La radiación de fondo cósmico • Fósil del Big bang • Nucleosíntesis de elementos livianos • Helio, Deuterio • Formación de galaxias y estructuras

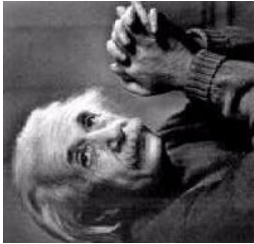
<u>Retrocediendo en el tiempo...</u> • Es razonable suponer que también se deben haber formado anti-partículas (anti-protones, anti-electrones) • Sin embargo, el Universo que observamos esta dominado por materia y no anti-materia • Debe haber existido una asimetría
--

--

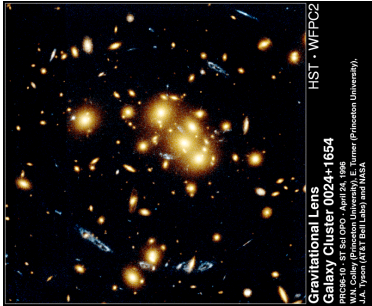
Lentes gravitacionales



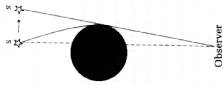
Fin



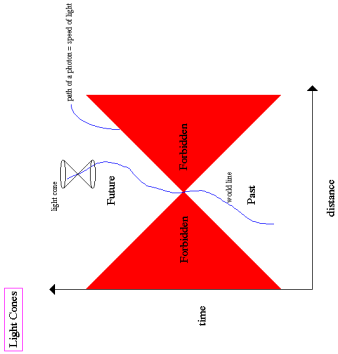
Lentes gravitacionales



Lentes gravitacionales



Cono de luz



Lentes gravitacionales

