

2. Observaciones basicas de la cosmologia y su interpretaciones

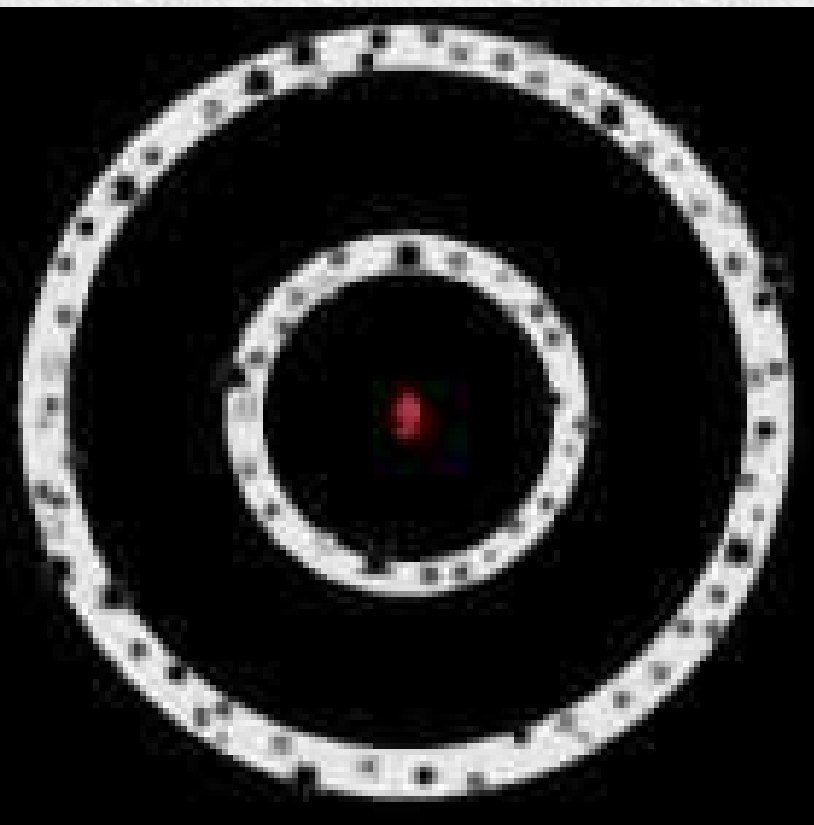
El Universo empezo con un estado de alta densidad y alta temperatura (Big Bang). Fundamental son los siguientes observaciones

- > la oscuridad del cielo nocturno
 - > finidad del Universo
- > enrojecimiento de los espectros de las galaxias
 - > expansion del Universo
- > las abundancias de los elementos ligeros
 - > nucleosintesis en el Universo temprano
- > radiacion del fondo
 - > el “echo” del Big Bang

2.1 La oscuridad del cielo nocturno – el primer problema cosmologico

en la edad medieval: Universo infinito y llenado con estrellas

- consecuencia: el cielo deberia ser infinitamente brillante
- prueba: el principio cosmologico requiere una densidad const. de estrellas



divide el Universo en cascaras

con radio r , espesor d

-> numero de estrellas en una cascara

$N = \text{densidad} \times \text{volumen}$

$$= n \cdot 4\pi \cdot r^2 \cdot d$$

--> brillo de una cascara $\sim r^2$

para un observador en el centro: r^{-2}

cada cascara proporciona el mismo
brillo

---> con numero de las cascaras infinito :

--> el cielo es infinitamente brillante!

mas realistico: estrellas son discos muy pequeños

--> cada linea de vista toca a una estrella

--> cielo muy brillante – como superficie de Sol



pero el cielo es oscuro

porque?

en la literatura esta contradicción se llama:

paradojo de Olbers

(por razones históricas, lógicamente no es ningún paradojo)
algunos nombres famosos relacionados :

Cusanus (1401 -1464)

Johannes Kepler (1571-1639) (reconocer como problema)

Halley (1656-1742)

Loy de Chesaux (1718-1751) (primer análisis formal)

Heinrich Olbers (1758-1840)

Edgar Allan Poe (1809-1849)

Olbers: "Las estrellas lejanas no son visibles por una sustancia absorbiendo"

problema: en equilibrio térmico, esta sustancia hipotética tendría la misma temperatura como las superficies estelares

Poe (en su essay “Eureka”) : "No es posible ver todas las estrellas en el mismo instante”

- si el Universo **tenga un comienzo** posiblemente hay estrellas cuyos luz no ha llegado

en el siglo 20: expansion del Universo estaba detectado

- > solucion para el cielo oscuro con la idea que la luz de las galaxias esta diluido debido a la expansion

Wesson et al. (1987, ApJ 317, 601): No!!

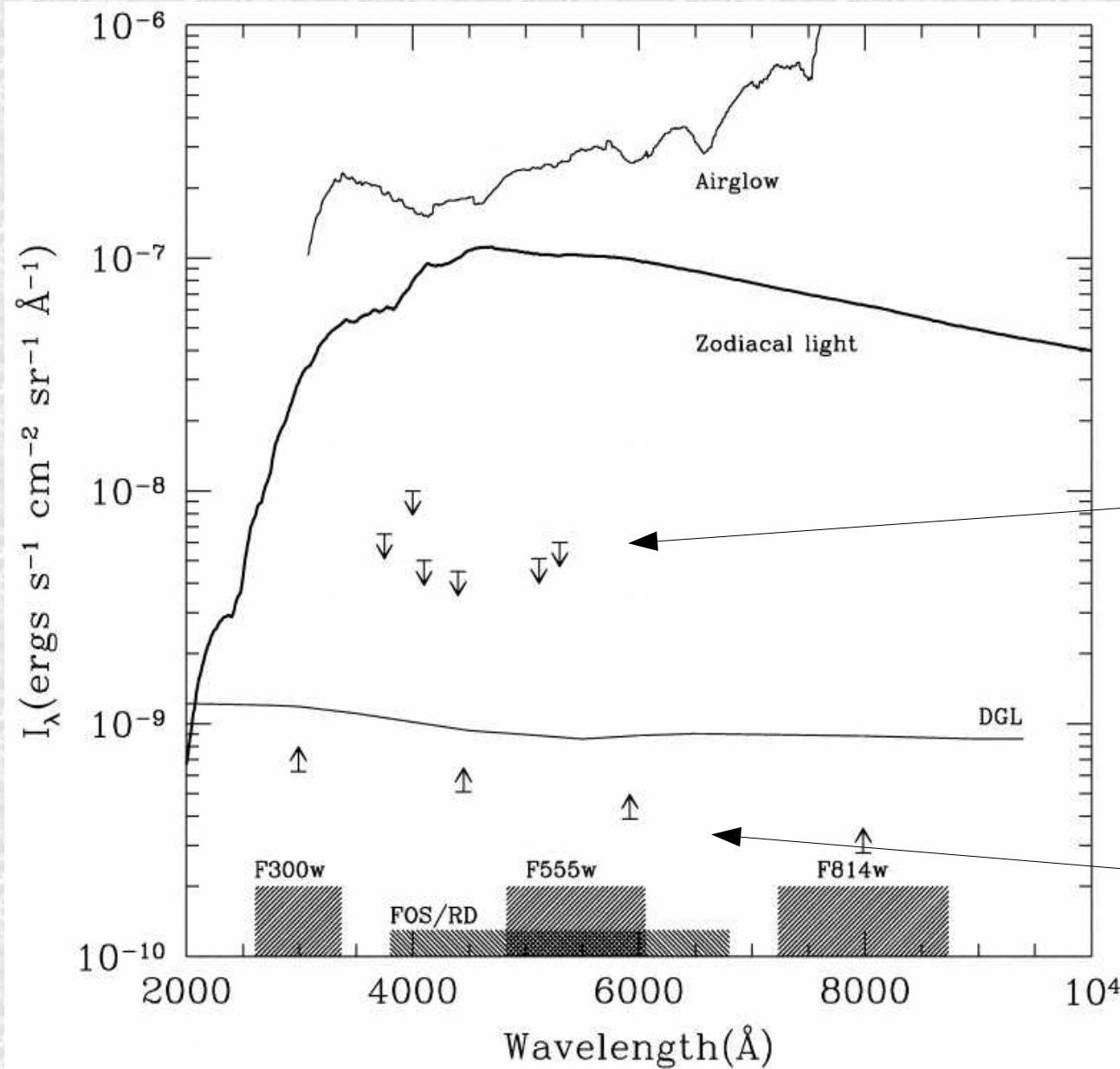
Q: brillo de fondo (bolometrico), n_0 densidad presente de las galaxias, R_0 : escala presente, $L(t)$ luminosidad, t_f =tiempo de formacion de galaxias

$$Q = \frac{c n_0}{R_0} \cdot \int_{t_f}^{t_0} L(t) R(t) dt$$

- > un comienzo del Universo es necesario para garantizar un brillo debil como esta observado

The Extragalactic Background Light (ApJ 2002, 571, 56)

fuentes contaminandas: "airglow", luz de zodiaco,
"diffuse Galactic light"



EBL $\sim 28 \text{ mag}/\square''$

limite alto

diffuse Galactic light

limite bajo

2.2 El diagrama de Hubble

2.2.1 Deteccion y trabajo temprano

estado teorico:

1916: Einstein --> relatividad general y ecuaciones del campo

1917: de Sitter ---> soluciones (incluyendo un Universo en expansion, pero sin materia)

1922, 1924: Friedmann ---> soluciones generales, prediccion de la expansion de un Universo con materia

Carl Wirtz 1924: Astronomische Nachrichten, 222, 21

relacion entre la velocidad radial y el diametro aparente de 40 galaxias

distancias desconocidas, pero ya interpretacion como expansion
trabajo olvidado

2.2.2 El diagrama de Hubble

Relacion entre velocidad radial y distancia para 22 galaxias

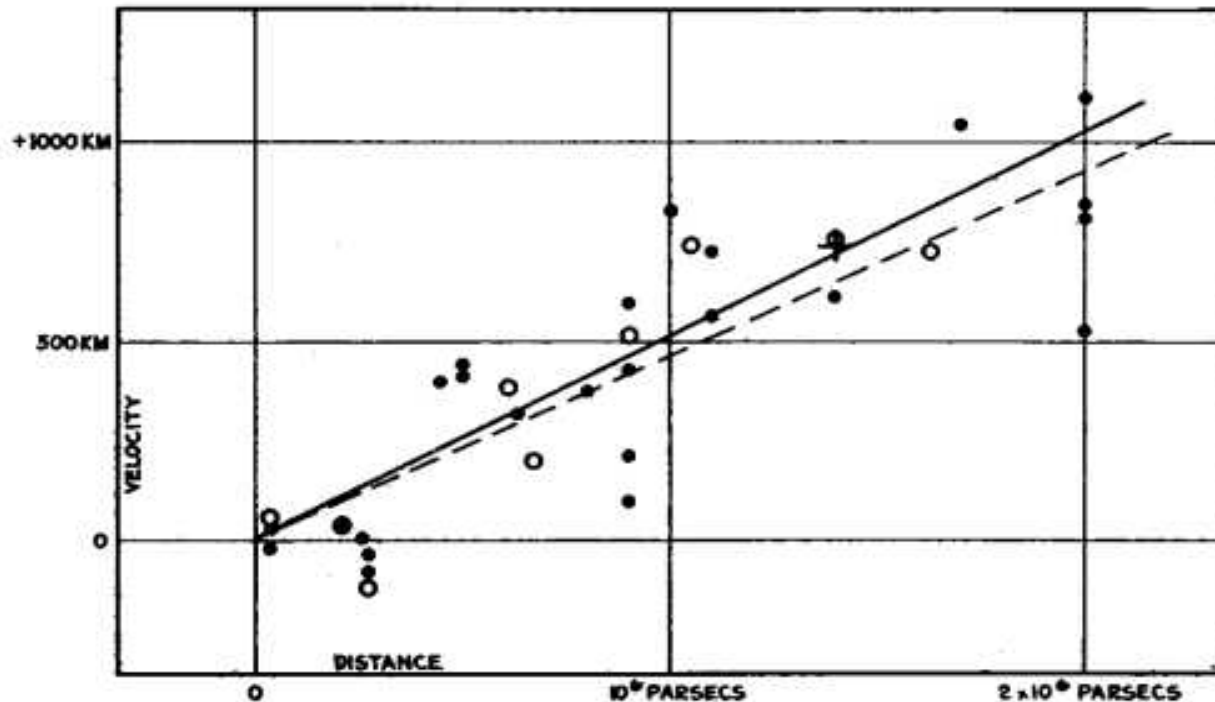


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Radial velocities, corrected for solar motion, are plotted against distances estimated from involved stars and mean luminosities of nebulae in a cluster. The black discs and full line represent the solution for solar motion using the nebulae individually; the circles and broken line represent the solution combining the nebulae into groups; the cross represents the mean velocity corresponding to the mean distance of 22 nebulae whose distances could not be estimated individually.

Hubble 1929, PNAS 15,
168

pendiente: ???

de toda manera:
bastante incorrecto!!

pendiente de este diagrama: **la constante de Hubble H_0**

medida moderna:
$$H_0 = 72 \pm 8 \frac{km}{s \text{ Mpc}}$$

Porque la diferencia al valor historica y porque el scatter en el diagrama historico? Expansion debe ser estrictamente lineal!

dificultades en ambos ejes: distancia y velocidad !

2.2.3 Distancias

historicamente: radio angular de las galaxias

--> muy mal: galaxias tienen radios intrinsicos muy diferentes

mejor: "candelas estandard" --> objetos con magnitud absoluta conocidos

Formula fundamental: $m - M = 5 \cdot \log r - 5$ (r in parsec)

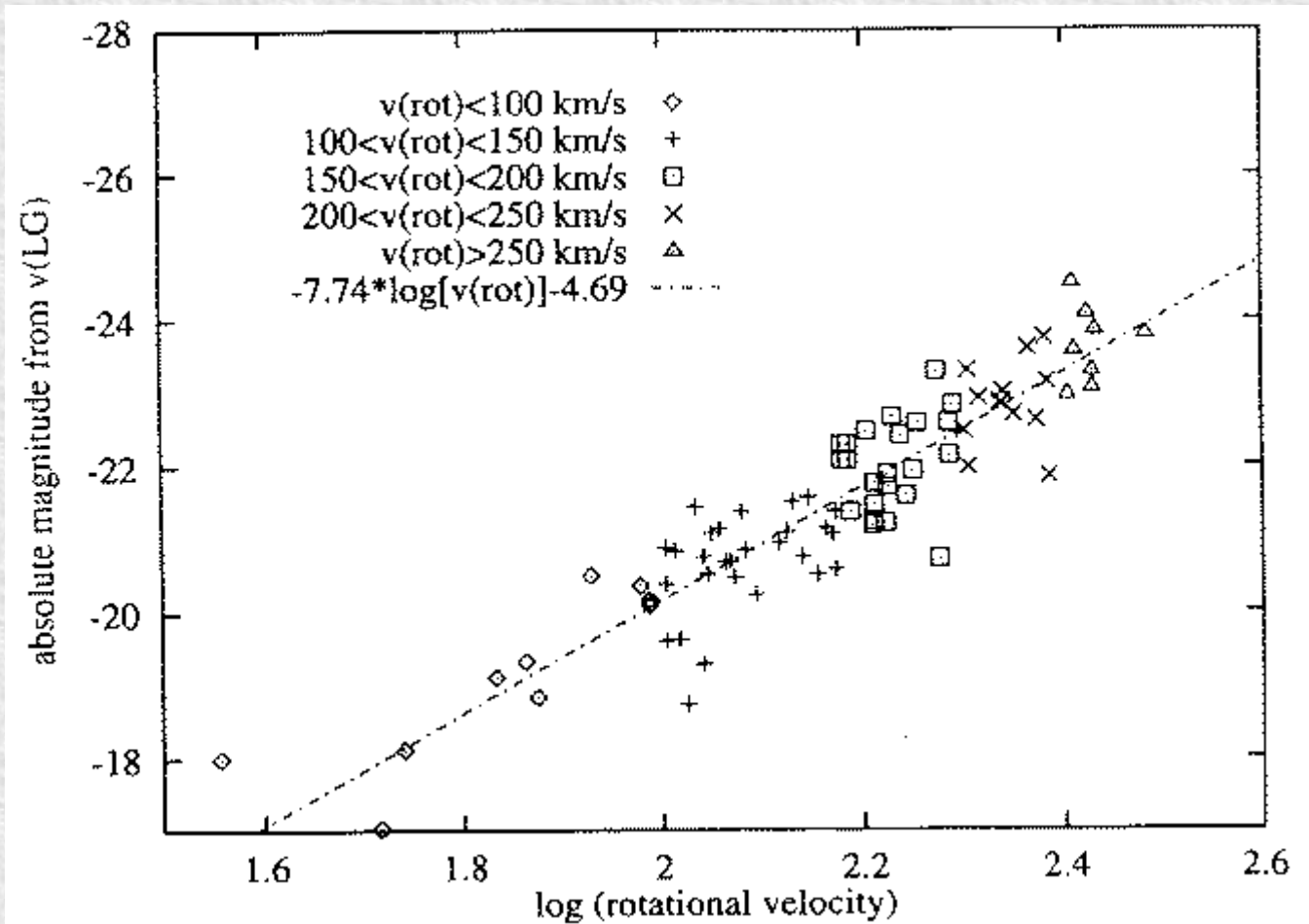
por ejemplo: Cefeidas

1930: Cefeidas identificable en nubes de Magellan, Andromeda
M33 ...

problemas:

- a) galaxias demasiado cerca
- b) calibracion de Cefeidas incorrecta

candela importante: galaxias espirales por la relacion
de Tully-Fisher
---> relacion entre la luminosidad y la velocidad de rotacion



Federspiel et al. 1994
ApJ 430, 29

88 galaxias espirales
dispersion 0.6 mag

origin de relacion TF?

problemas: selection de los samples, todas galaxias en una
relacion? distancias de calibradores??

menção lateral --- el origen de la relación Tully-Fisher?

relación existe sobre un intervalo de 8 mag

= factor 1500 en luminosidad

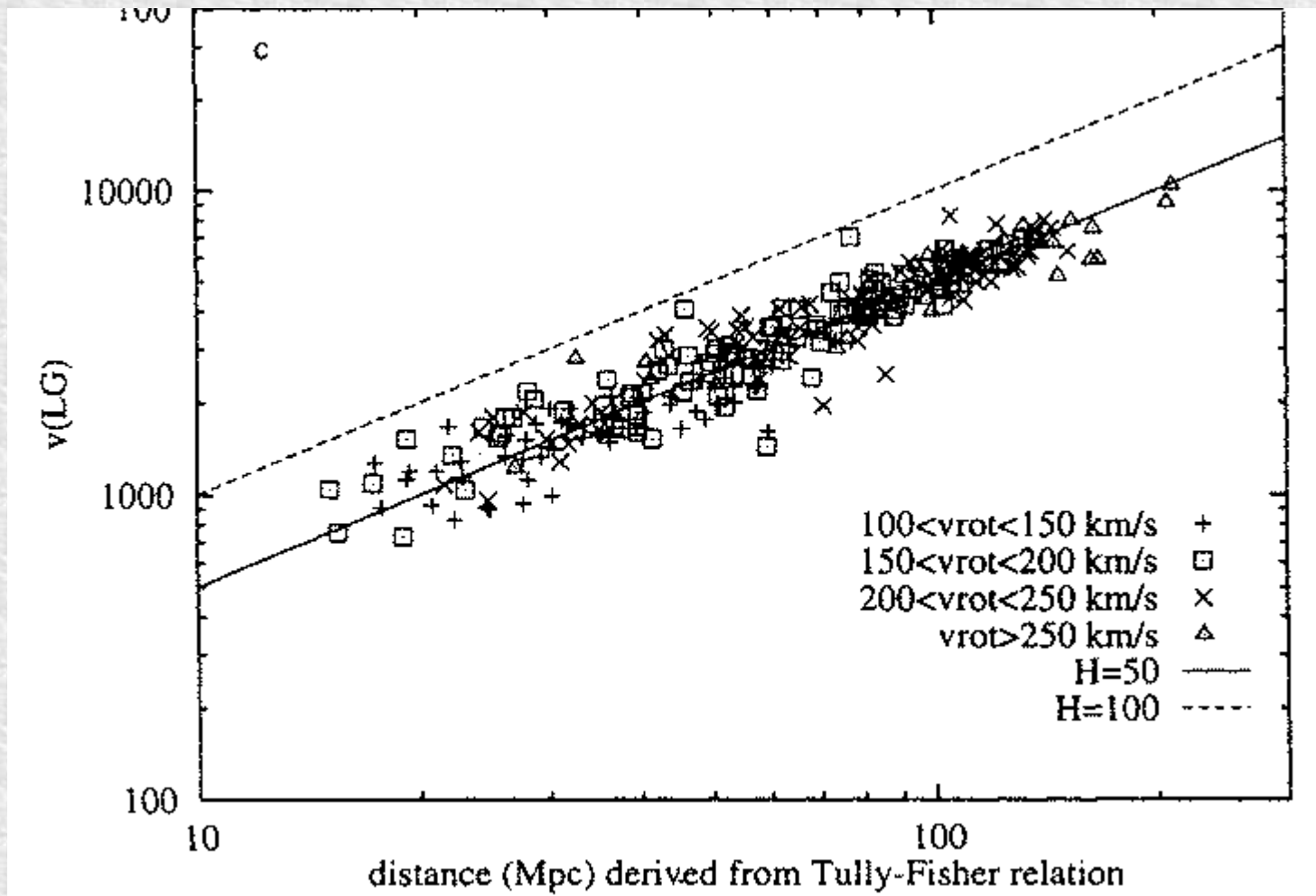
brillo de una galaxia espiral --> propiedad de materia bariónica

pero: velocidad de rotación --> propiedad de la masa total,
mayor parte es materia oscura!

----> porque esta comunicación fuerte entre materia
bariónica y materia oscura??

km/s

$H_0 = 50 \text{ km/s/Mpc} ??$



Federspiel et al.

Mpc

derivacion de constante de Hubble muy problematico

--> monton de literatura sobre la aplicacion de Tully-Fisher

---> necesitamos candelas de estandar mejores !

2.2.4 El concepto de velocidades

medida: el corrido de las lineas espectrales (enrojecimiento)

interpretacion como efecto Doppler da (relatividad especial)

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}} \approx \frac{v}{c} (v \ll c)$$

problema: observamos galaxias y quasares con $\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \approx 6$
---> relativistamente $v = 283\,000 \text{ km/s}$ ---> posible ???

movimiento relativista es movimiento a traves el espacio

$$F = m a \quad !!$$

--> necesitaríamos una fuerza capaz de acelerar galaxias al
 $v = 283\,000 \text{ km/s}$

no hay ! ---> ningun efecto Doppler!

velocidades por aceleracion (= "velocidades peculiares") mas grandes en cumulos masivas de galaxias

velocidad tipica: $v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{R}}$ siendo R,M el radio y masa del cumulo

con $M = 10^{14}$ masas solares , $v < 1000$ km/s

---> necesitamos otra interpretacion!

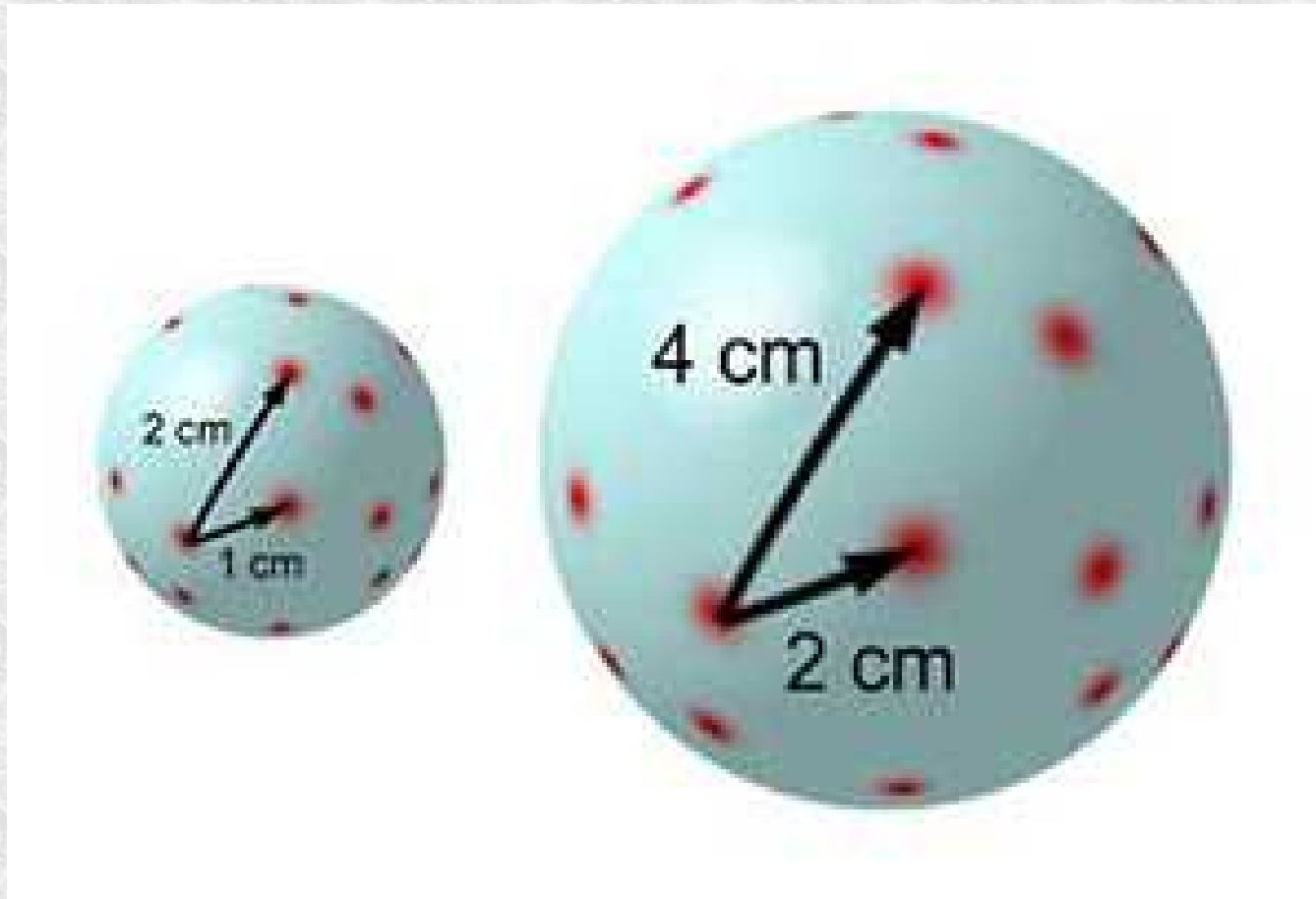
interpretacion como " espacio en expansion"

nombramos el efecto de enrojecimiento: " **efecto cosmologico**"

fuentes de confusion: $v \ll c \rightarrow$ para ambos efectos es valido

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

Una analogía 2-dimensional de la expansión



- 1) galaxias estan en reposo relativistamente
- 2) $v = \text{const. distancia}$
- 3) velocidad de luz ningun limite

para galaxias en la "cercania" (< 50 Mpc):

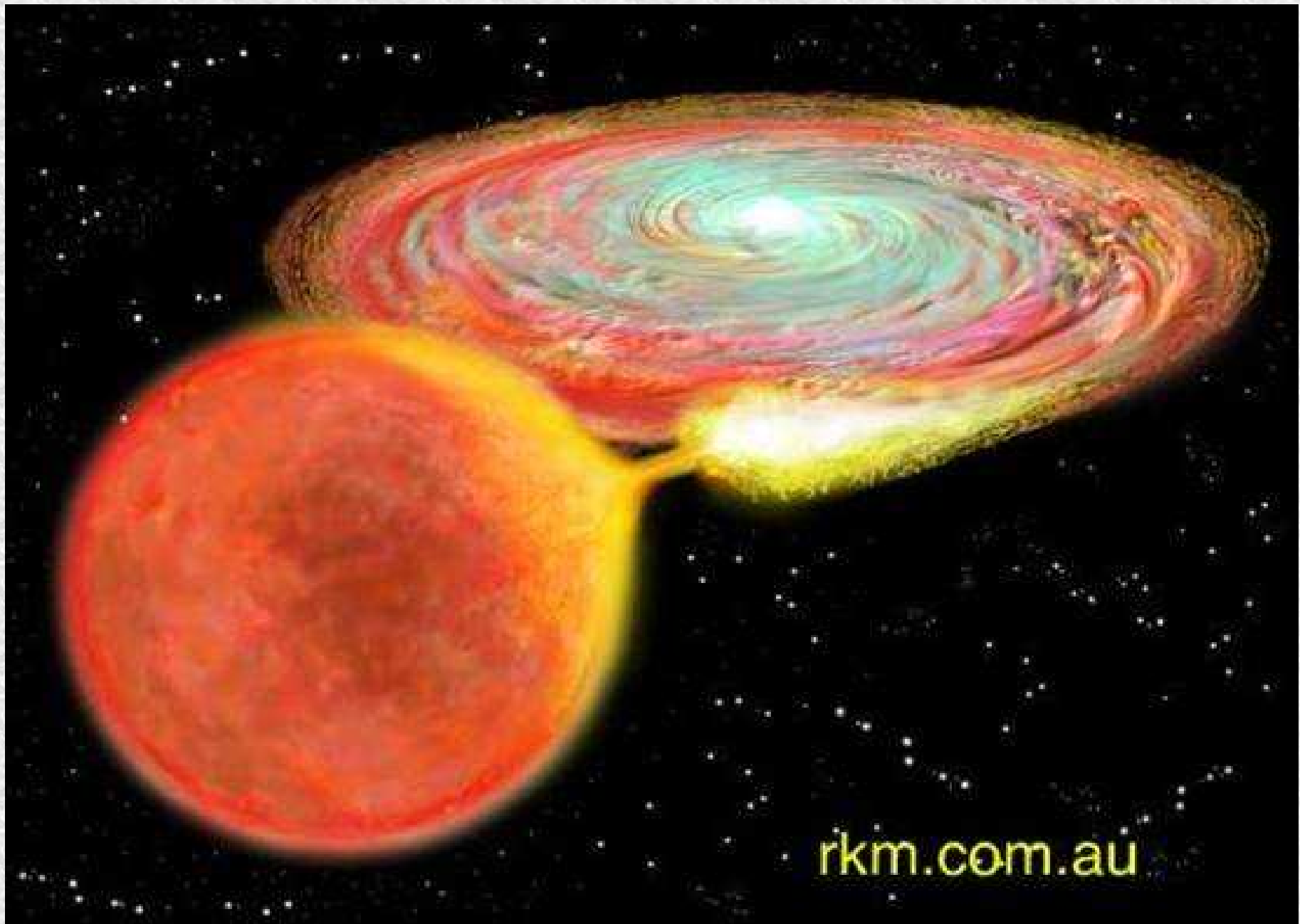
- > ambos efectos contribuyen al enrojecimiento
- > diagrama de Hubble con scatter grande en la cercania

star en---> para derivar el constante de Hubble confiablemente necesitamos candelas de estandard en distancias grandes

precision y alto brillo para e el "flujo de Hubble"

---> **Supernovas de tipo Ia**

2.2.5 Supernovas como indicadores de distancia



Repetición breve: mecanismo de una SN Ia

enana blanca en un sistema binaria con masa bajo de la masa de Chandrasekhar, composición: C y O, acreción

equilibrio por el gas de electrones degenerada no relativista

ecuación del estado $P \sim \rho^{5/3}$ $\longrightarrow$ radio bajando con masa
aumentando

densidad aumentando $\longrightarrow$ degeneración relativista

$\longrightarrow$ llega la masa de Chandrasekhar

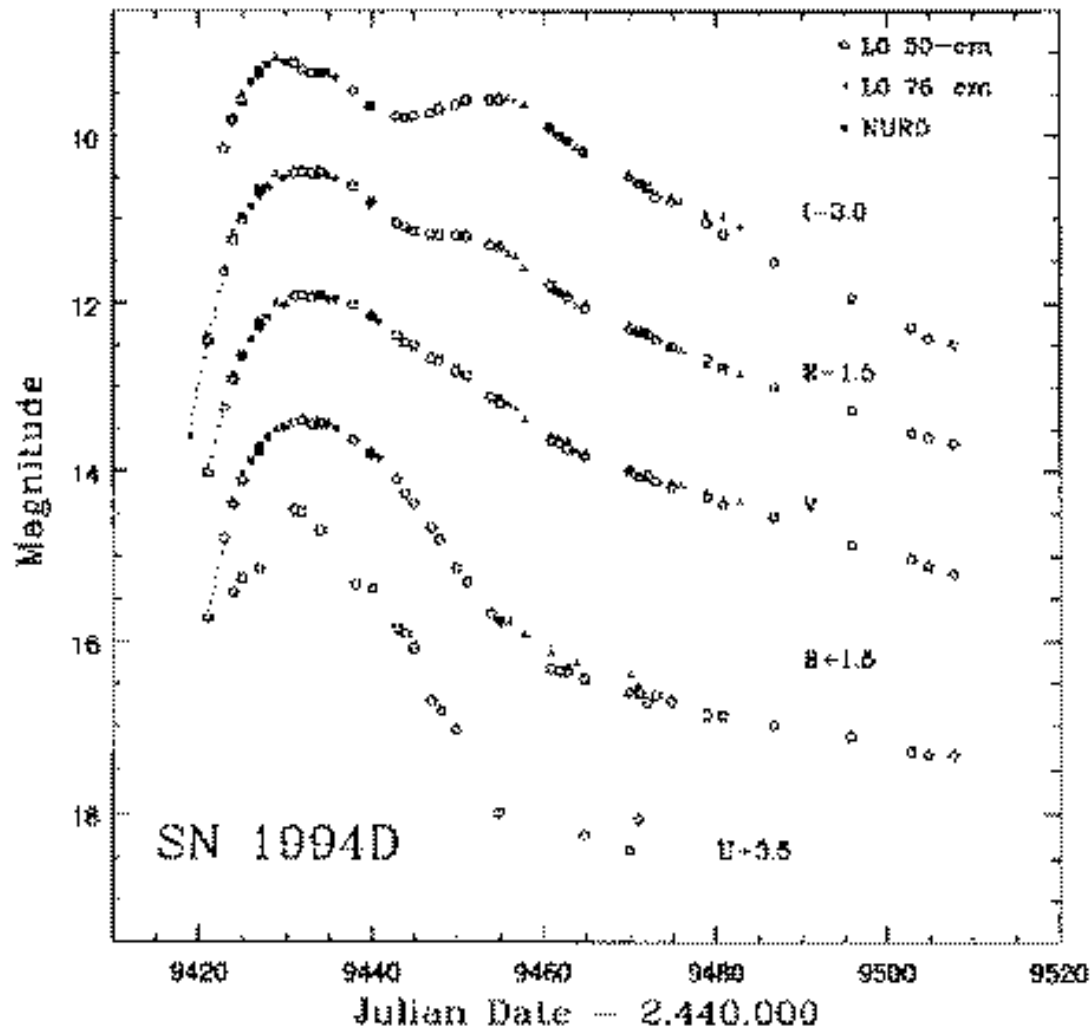
$\longrightarrow$ cambio a $P \sim \rho^{4/3}$

$\longrightarrow$ pérdida de equilibrio $\longrightarrow$ colapso

$\longrightarrow$ ignición de O $\longrightarrow$ deflagración

$\longrightarrow$ explosión nuclear de casi exacta una masa de Chandrasekhar
1.4 masas solares

ejemplo: curva de luz de la SN 1994D en varias bandas



magnitud maxima
depende de la tasa de
decaimiento

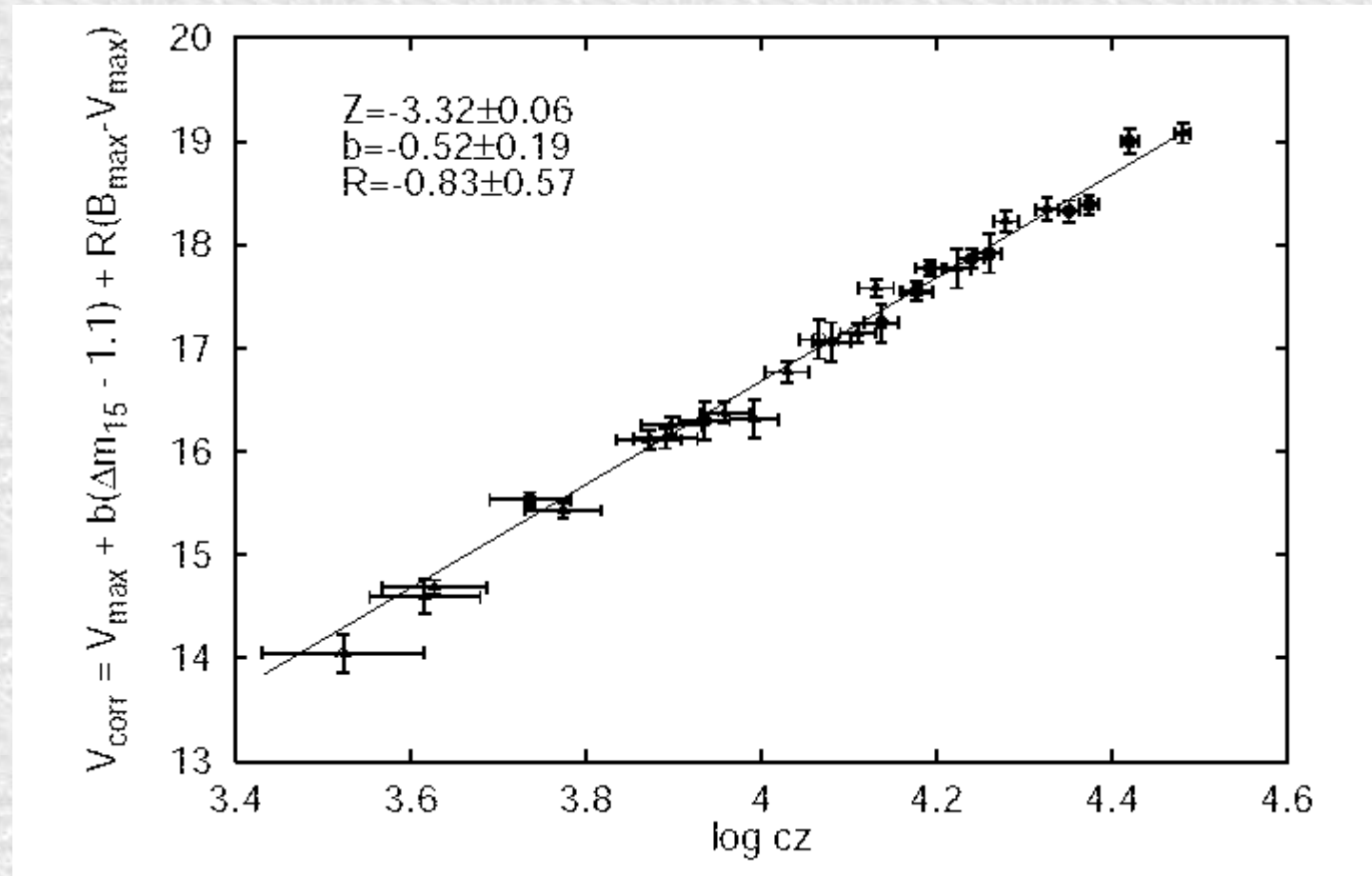
--> correcion

--> calibracion por SNs
en galaxias con Cefeidas

magnitud corregido:

$$M(V) = -19.0$$

diagrama de Hubble de supernovas la depues correcciones
residuales debido al color



$$H_0 = 72 \pm 6 \text{ km/s/Mpc}$$

2.3 Abundancias de elementos ligeros

Que origin tienen los elementos ligeros:

deuterio, helio-3, helio-4, litio-7?

por ejemplo helio: Helio esta sintetizado en estrellas, pero no participo (o muy poco) en el ciclo de enriquecimiento galactico:

- > Supernovas II: helio sintetizado ---> elementos mas pesados
- > Supernovas Ia: origin por una enana blanca --> oxigeno, carbono
muy poco helio
- > Novas: nucleosintesis de hidrogeno en la superficie de una
enana blanca --> helio sintetizado --> poca masa
- > estrellas: AGB solo expulsan helio de sus atmosferas
poco helio sintetizado

solo 7% del helio observable en estrellas juvenes es explicable por nucleosintesis estelar! El mayor parte debe tener su origen en el Universo temprano

definicion de abundancias (fraccion de masa): $X + Y + Z = 1$

abundancia de helio en la atmosfera solar:

$$Y = 0.24 \quad (\text{Lodders 2003, ApJ 501, 1220})$$

en el Sol entero

$$Y = 0.3$$

objetos donde se espera observar una abundancia "primordial"

galaxias con pocos metales, estrellas Galacticas con casi zero metales,
nubes de $\text{H}\alpha$ en los espectros de quasares

determinacion de abundancias de helio de galaxias enanas con pocos metales

fuentes: lineas de helio en las regiones HII

$$Y = 0.24 \quad (\text{Thuan, Izotov 1999, ApJ 500,188})$$

----> deberia ser la abundancia primordial

----> la atmosfera del Sol tiene la abundancia primordial!

Teoreticamente:

synthesis de elementos en los primeros minutos despues del Big Bang

particulas relevantes: protones, neutrones

neutrones son inestables ---> decaido despues de 11 minutos

$n \rightarrow p + e + \text{antineutrino}$ (no se queda mucho tiempo)

Asumimos que todos los neutrones disponibles despues de formacion de helio estan ligados en helio-4

---> para la fraccion de masa:

$$Y = \frac{2(n_n/n_p)}{1 + (n_n/n_p)} \quad \text{ejercicio!}$$

---> el parametro mas importante es el cuociente densidad de neutrones / densidad de protones

la teoria de "Big Bang Nucleosintesis (BBN)" dice

$$\frac{n_n}{n_p} \approx \frac{1}{7}$$

entonces $Y \approx 0.25$ como observado!!

2.4 Historia breve de la radiacion de fondo

en 1930: la constante de Hubble ha sido medido de ser

$$H_0 = 500 \text{ km/s/Mpc}$$

--> la edad maxima de Universo $t_{max} = \frac{1}{H_0} \approx 10^9 \text{ años}$

pero: radioactividad de piedras --> edad por lo menos $4 \cdot 10^9$ años

ademas: Gamov (1946) propuso nucleosintesis en el Universo temprano, explicando todas las abundancias de los elementos

Alpher, Hermann: no funciona --> helio-4 es el elemento mas pesado posible

Que alternativa hay al "Big Bang"?

Bondi, Herman, Hoyle (1946): un principio cosmologico extendido:

homogenidad tambien temporal --> siempre la misma apariencia

---> tambien siempre la misma densidad

---> junto con la expansion: materia se debe ser creado

modelo de "Steady-state Universe"

tambien una solucion para la abundancia de los elementos:

Burbidge, Burbidge, Fowler, Hoyle (1957):

el origen de los elementos esta en las estrellas !

(premio de Nobel 1983 a W. Fowler)

Como se puede distinguir entre "Steady State" y "Big Bang"?

Alpher, Herman (1948): en un Universo muy caliente, el camino libre de fotones es muy corto (interacciones con partículas libres)

---> situación de un cuerpo negro!

---> espectro de un cuerpo negro sobrevive después de recombinación

Que pasa con el espectro de fotones durante la expansión?

densidad de energía

$$u_{\lambda} d\lambda = \frac{8\pi h c / \lambda^5}{e^{hc/\lambda kT} - 1} d\lambda$$

describimos la expansión por un "factor de escala R "

R=1 para hoy mas temprano $R < 1$ en el futuro $R > 1$

--> cualquier distancia durante la expansión es la distancia hoy día multiplicado por $R(t)$

imaginamos que es válido también para fotones

$$\lambda(R) = \lambda_0 R$$

---> densidad de energia se baja como R^4 : aumenta del volumen
nos da R^3 , ademas un factor R por enrojecimiento cosmologico
($E = h c/\lambda$)

-----> dependencia de temperatura de un cuerpo negro con R :
 $T_0 = T(R) R$ (ejercicio!)

Alpher, Hermann: $T_0 \approx 5 \text{ K}$

Dicke, Peebles, Roll, Wilkinson (1964): where is that radiation?

--> medidas con radio antenas en 3 cm

---> solo limite alto

Penzias, Wilson (1964): medidas mas sensitivas en 7 cm
pero con otra intencion

---> un señal misterioso?

--> llamada a Dicke por telefono

radiacion del fondo

Penzias, Wilson: descubrimiento --> premio de Nobel 1978

Dicke, Peebles et al.: explicacion --> ningun premio de Nobel

en los proximos años: mas y mas medidas

--> cuerpo negro con $T = 2.73 \text{ K}$

teoreticamente: habia estructura en el Universo temprano

---> por lo menos: materia barionica y no-barionica necesitan
fluctuaciones de densidad en el instante de recombinacion

si no, la expansion no permitiria el desarrollo a galaxias, cumulos
de galaxias

algunos mecanismos para el origen de fluctuaciones en el CMB:

- > enrojecimiento gravitacional de fotones
- > fluctuaciones de densidad causan velocidades peculiares
 - > efecto Doppler
- > adiabaticamente: regiones con alta densidad de materia son mas calientes

bajo la condicion, que solo habia materia barionica

- > fluctuaciones del orden $\Delta T/T \approx 10^{-3}$ K para garantizar inestabilidades gravitacionales

no encontrado --> hay materia no-barionica, que no es visible en las estructuras observadas

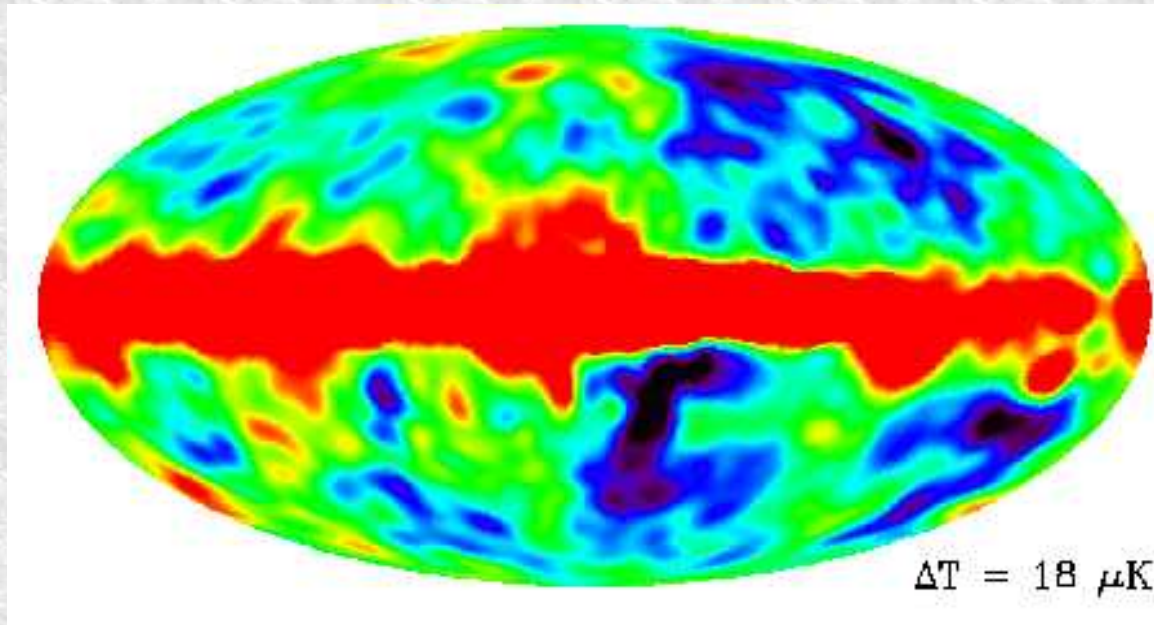
= materia oscura

pero: medidas son difícil de la Tierra en el rango de cm

1989: un satélite "Cosmic Background Explorer (COBE)"

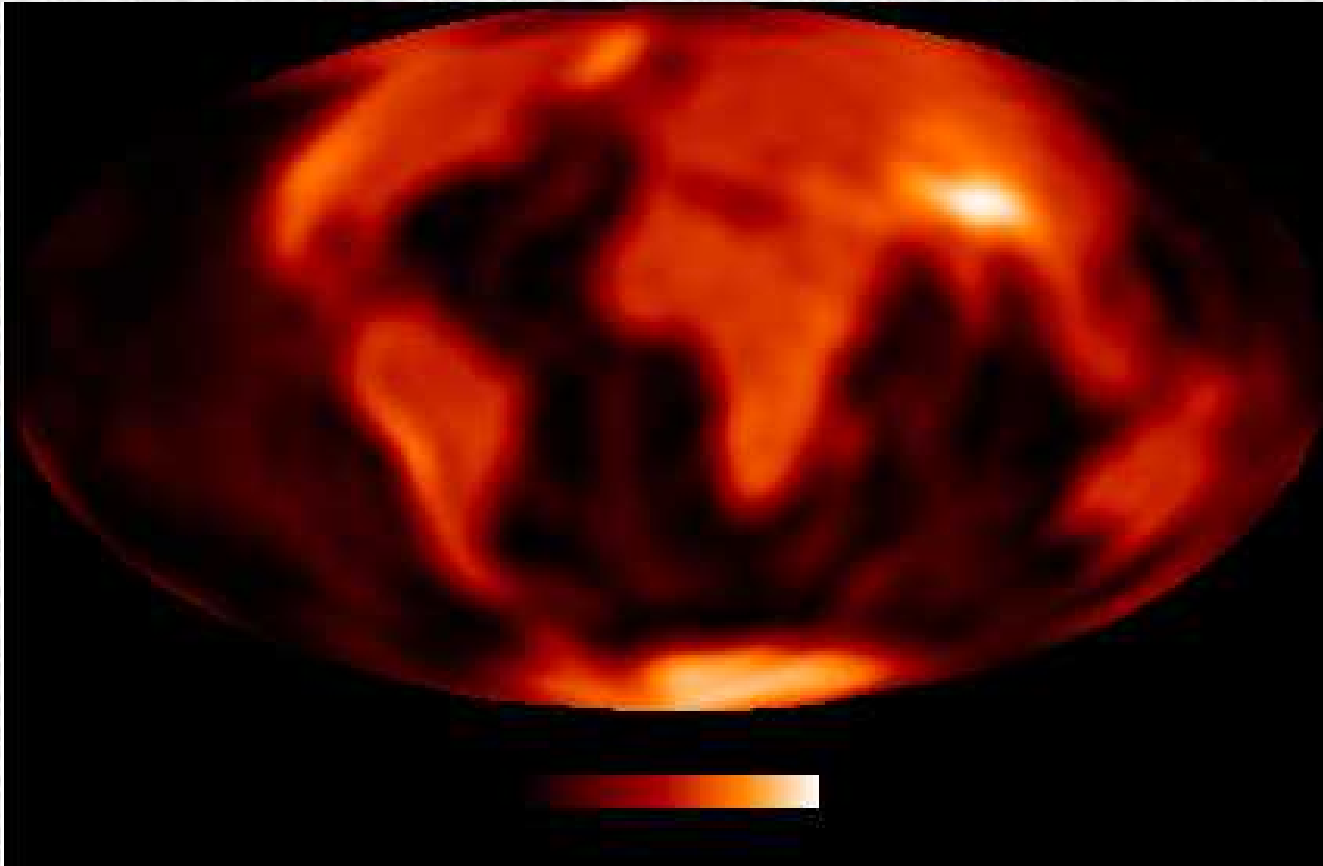
resolución angular ~ 7 grados

----> descubrimiento de fluctuaciones ! 2. premio de Nobel 2006
(J. Mather, G. Smoot)



$$\Delta T/T \approx 10^{-5} \text{ K}$$

Una vista a la Tierra con la resolucion angular de COBE



COBE solo detecto las fluctuaciones mas grandes

Mas experimentos por globos y satelites:
MAXIMA, BOOMERANG, WMAP

