

# *Evolución del Universo*

Roberto A Sussman Livovsky  
Instituto de Ciencias Nucleares,  
UNAM

`Sussman@nucleares.unam.mx`

Universum, 10 de septiembre de 2016

***La evolución del Universo es el  
problema central de la Cosmología  
¿Qué es la Cosmología?***

***... es el estudio del Universo  
como un sistema físico***

Como la gente, el universo TAMBIEN evoluciona ....

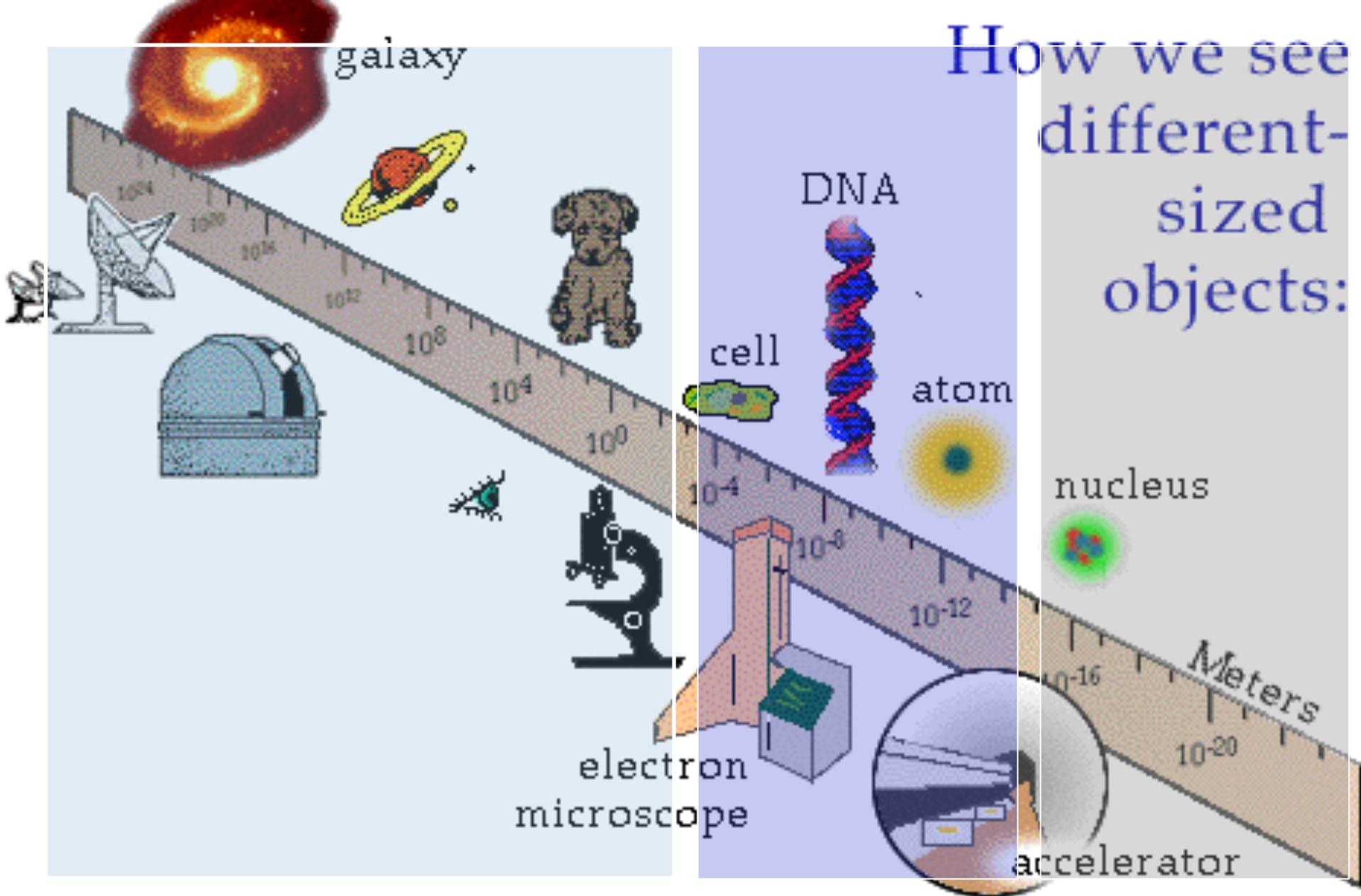


... pasando la película al revés: origen y formación de objetos astronómicos, vemos el pasado cósmico

# Las interacciones fundamentales de la Física son :

- \* Gravitación
- \* Electromagnetismo
- \* Fuerzas nucleares (fuerte y débil)

Estas interacciones son dominantes a diferentes escalas de longitud y energía



Gravitación

Electro-Magnetismo    Fuerzas Nucleares

# Escala Cosmológica 100-300 millones de años luz

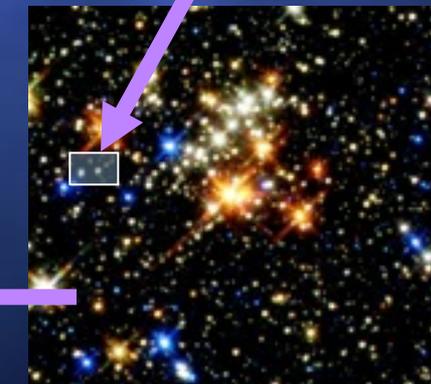


La tierra y la luna

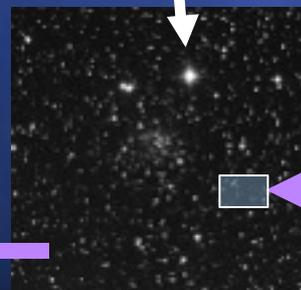
1 segundo-luz



Sistema solar  
1 día-luz



Estrellas vecinas  
50 años luz



Campo de la via lactea  
1000 años luz



Via lactea, nuestra galaxia  
100 mil años luz



Galaxias vecinas  
10 millones de  
años luz

Galaxias distantes

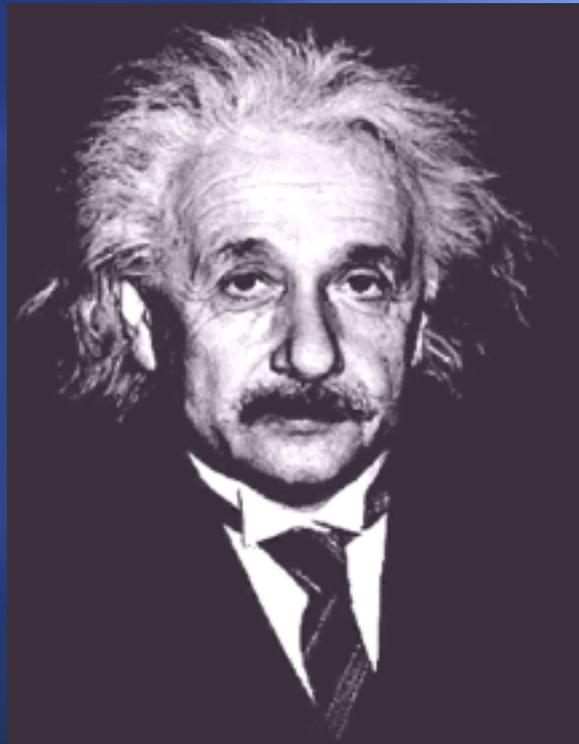


Galaxias distantes



LA **INTERACCION FUNDAMENTAL** relevante en la escala cosmológica es la **GRAVITACION**

*La mejor teoría de la Gravitación disponible fue desarrollada por ....*



*Albert Einstein*

*1879-1955*

# ¿Qué dijo Einstein?

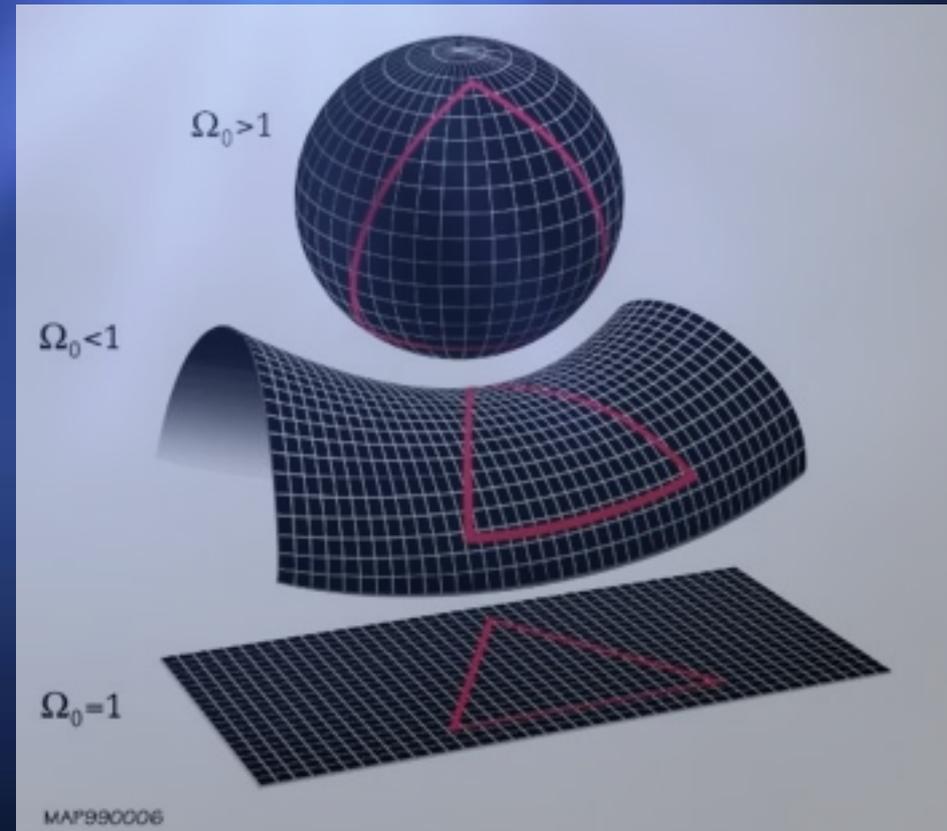
- ❖ El “espacio” y “tiempo” son relativos: la *NETA* = espacio-tiempo

La gravedad “*curvea*” al espacio-tiempo

- ❖ La materia (*GALAXIAS*) sigue las “carreteras” de ese espacio-tiempo curvo

- ❖ La luz *TAMBIEN* sigue a estas “carreteras” en otras trayectorias

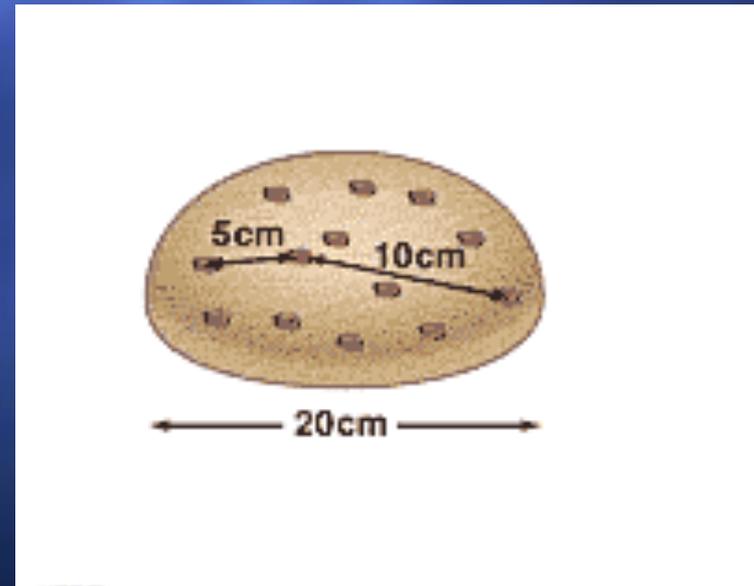
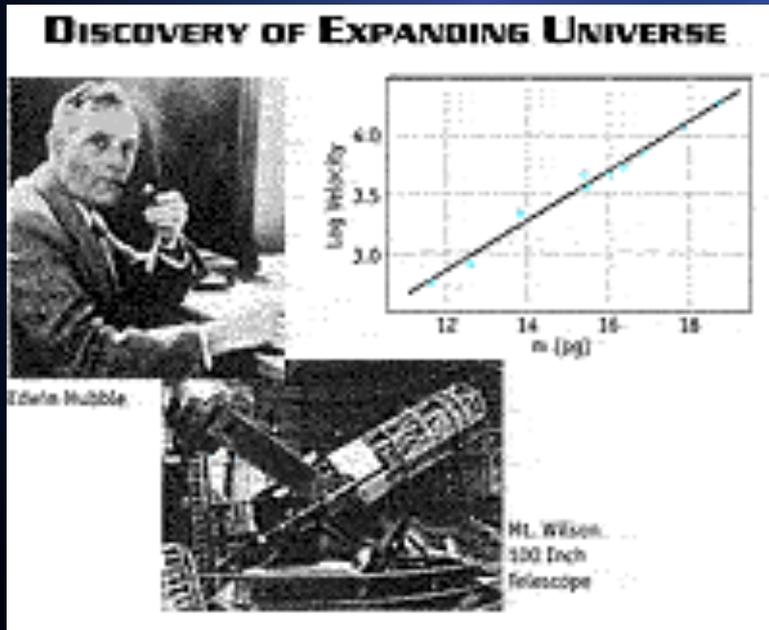
◆ Con los rayos de luz sondeamos y medimos al espacio-tiempo (el cosmos)



Einstein creía que el Universo era aproximadamente estático, pero ....

# El universo se expande !!

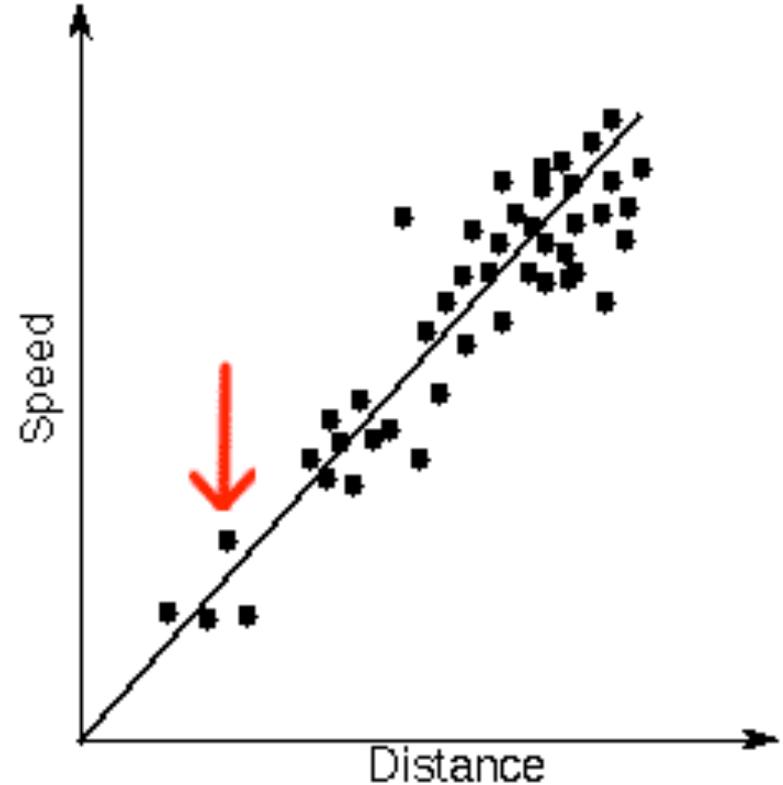
(Hubble 1924-1927)



¿Como se detecta esta Expansion? por el corrimiento al rojo (efecto Doppler) de galaxias distantes



**Hubble Law**  
recession speed =  $H_0 \times \text{distance}$



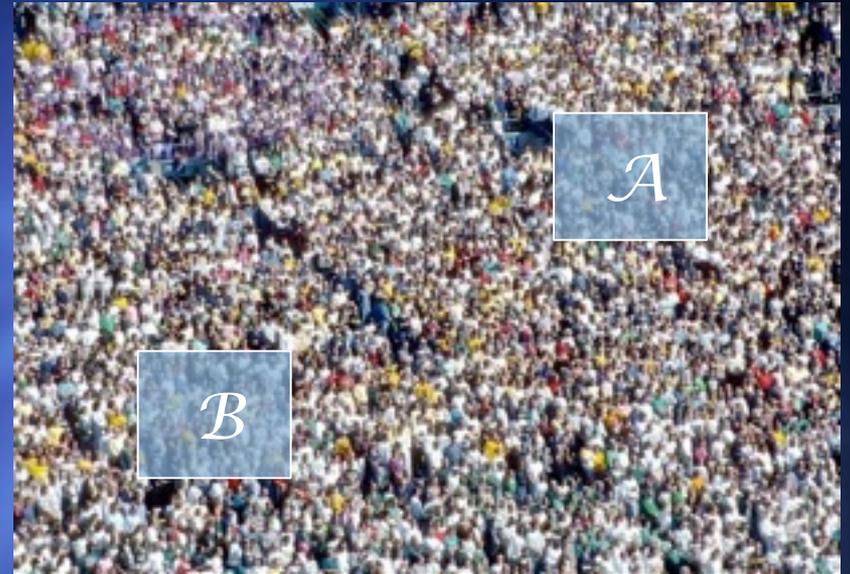
**¿Como se describe esta  
dínamica ?**

**Mediante las ecuaciones  
de campo de Einstein**

# Principio Cosmológico

- ★ Escogemos dos regiones  $A$  y  $B$  al azar
- ★ Suponemos que las condiciones en  $A$  y  $B$  son aproximadamente iguales

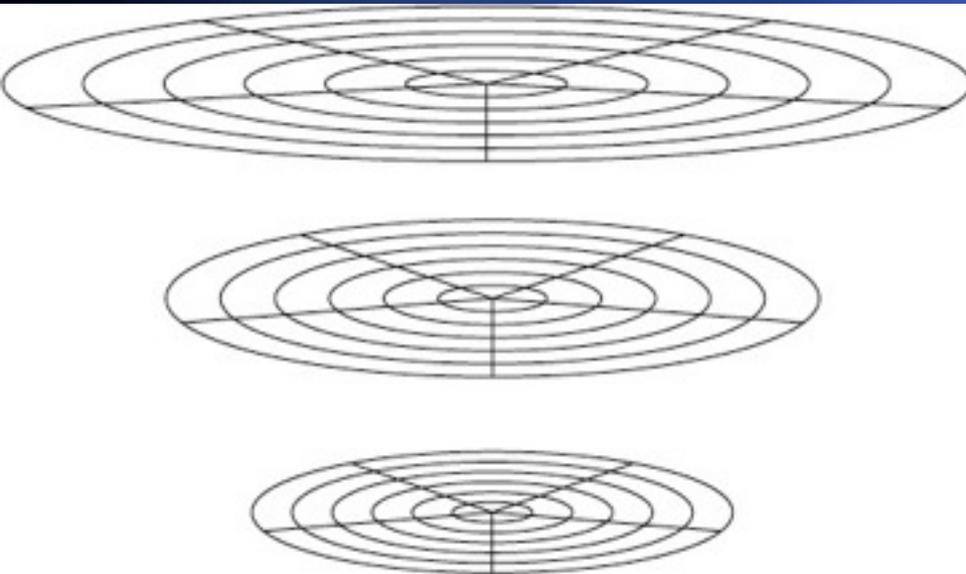
*No hay observadores privilegiados a grandes distancias*



# Dinámica del cosmos con la teoría de Einstein

★ Principio cosmológico IMPLICA homogeneidad e isotropía

Todo depende del  
tiempo cósmico  $t$



$t = t_3$

$t = t_2$

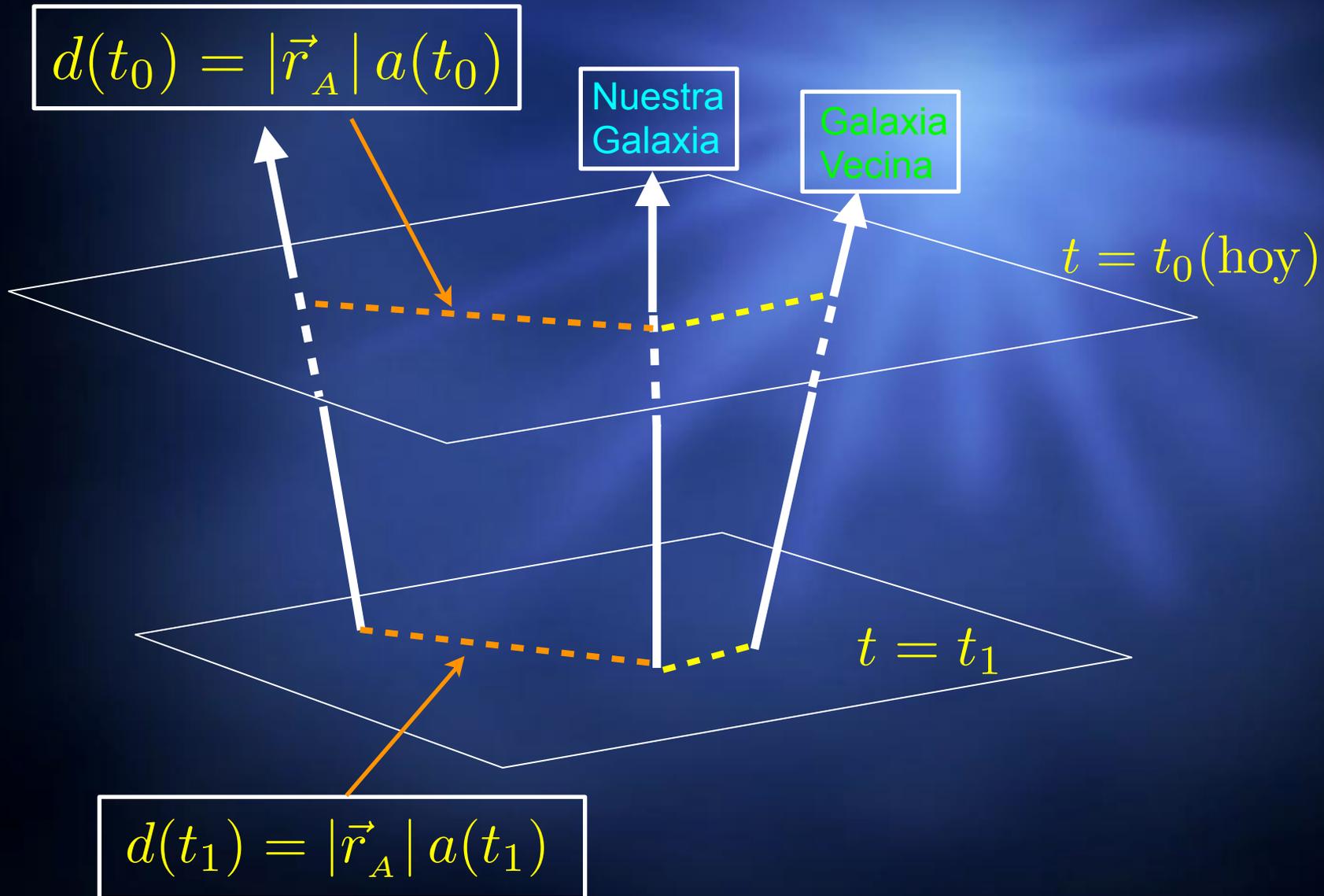
$t = t_1$

*Hipersuperficies  
3-dimensionales*

*expandiéndose  
en el tiempo  
cósmico*

*cada una  
con curvatura  
constante*

# Factor de escala cósmico $a(t)$ Distancias Relativas



# Las ecuaciones de Einstein:

evolución del  
factor de escala



propiedades del  
“fluido” cósmico

$$\dot{a}^2 = \frac{8\pi G}{c^4} \rho a^2 - k_0$$

$$\dot{\rho} = -3(\rho + p) \frac{\dot{a}}{a}$$

Ecuación de Friedman

Ecuación de balance

$$\dot{a} = \frac{da}{dt}$$

Velocidad de expansión cósmica

$$\rho \text{ \& } p$$

Densidad & presión del fluido cósmico

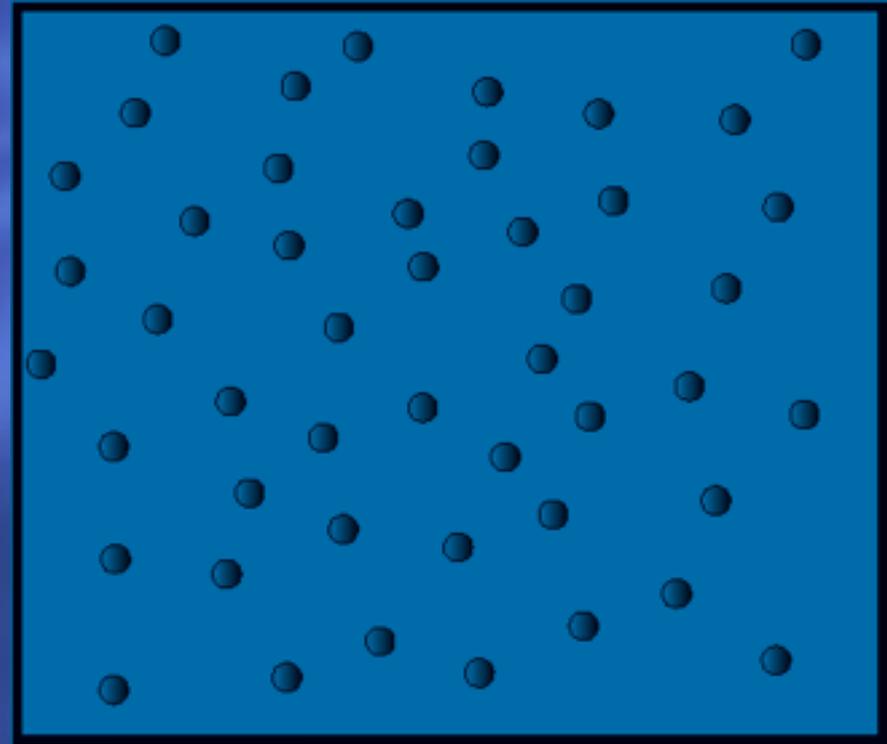
$$p = p(\rho)$$

Ecuación de estado cósmica

$$k_0 = 0, \pm 1$$

Curvatura de superficies  $t = \text{const.}$

# Así vemos al universo actual



Gas de galaxias:  
Interacción = Gravedad  
Largo Alcance

--Comparar --

Gas de moléculas de la habitación  
Interacción = Electromagnética  
Corto Alcance

# Gas de galaxias ~ Polvo ( $p = 0$ )

Velocidad típica de una galaxia en un cúmulo de galaxias

$$v \approx 1000 \text{ km/seg} \ll c$$

Densidad de energía en reposo

$$\rho \approx \frac{m c^2 N}{V}$$

Presión

$$p \approx \frac{m \langle v^2 \rangle N}{V} = \rho \frac{\langle v^2 \rangle}{c^2} \ll \rho$$

Ecuaciones de Einstein con  $p \ll \rho$ ,  $p \approx 0$

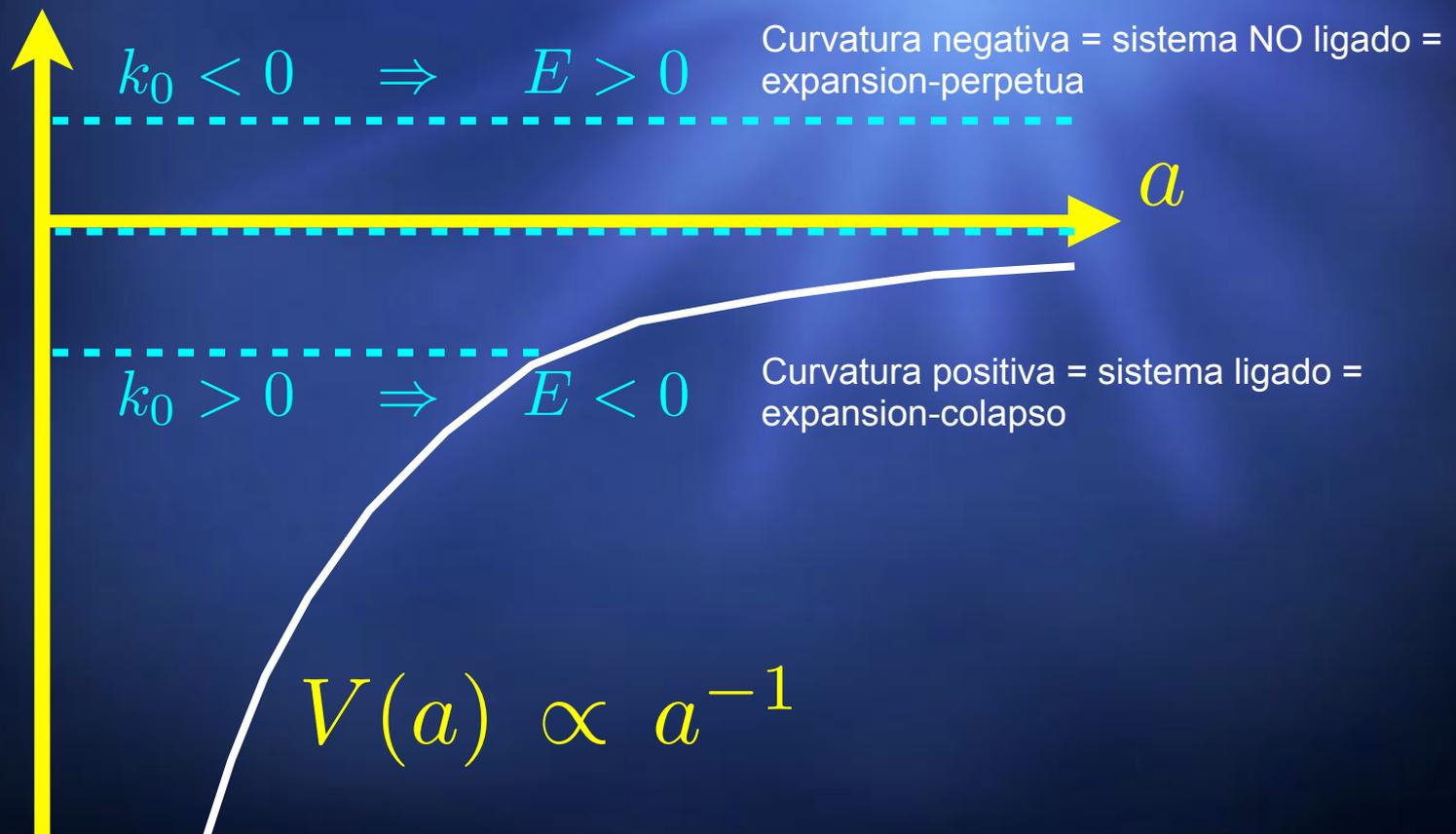
$$\frac{\dot{\rho}}{\rho+p} \approx \frac{\dot{\rho}}{\rho} = -\frac{3\dot{a}}{a} \longrightarrow \rho \propto a^{-3}$$

Ecuación de Friedman = Ecuación de energía

$$\frac{1}{2}\dot{a}^2 + V(a) = E, \quad V(a) = -\frac{4\pi G}{c^4} \frac{\rho_0}{a}, \quad E = -k_0$$

$$\frac{1}{2}\dot{a}^2 + V(a) = E, \quad V(a) = -\frac{4\pi G}{c^4} \frac{\rho_0}{a}, \quad E = -k_0$$

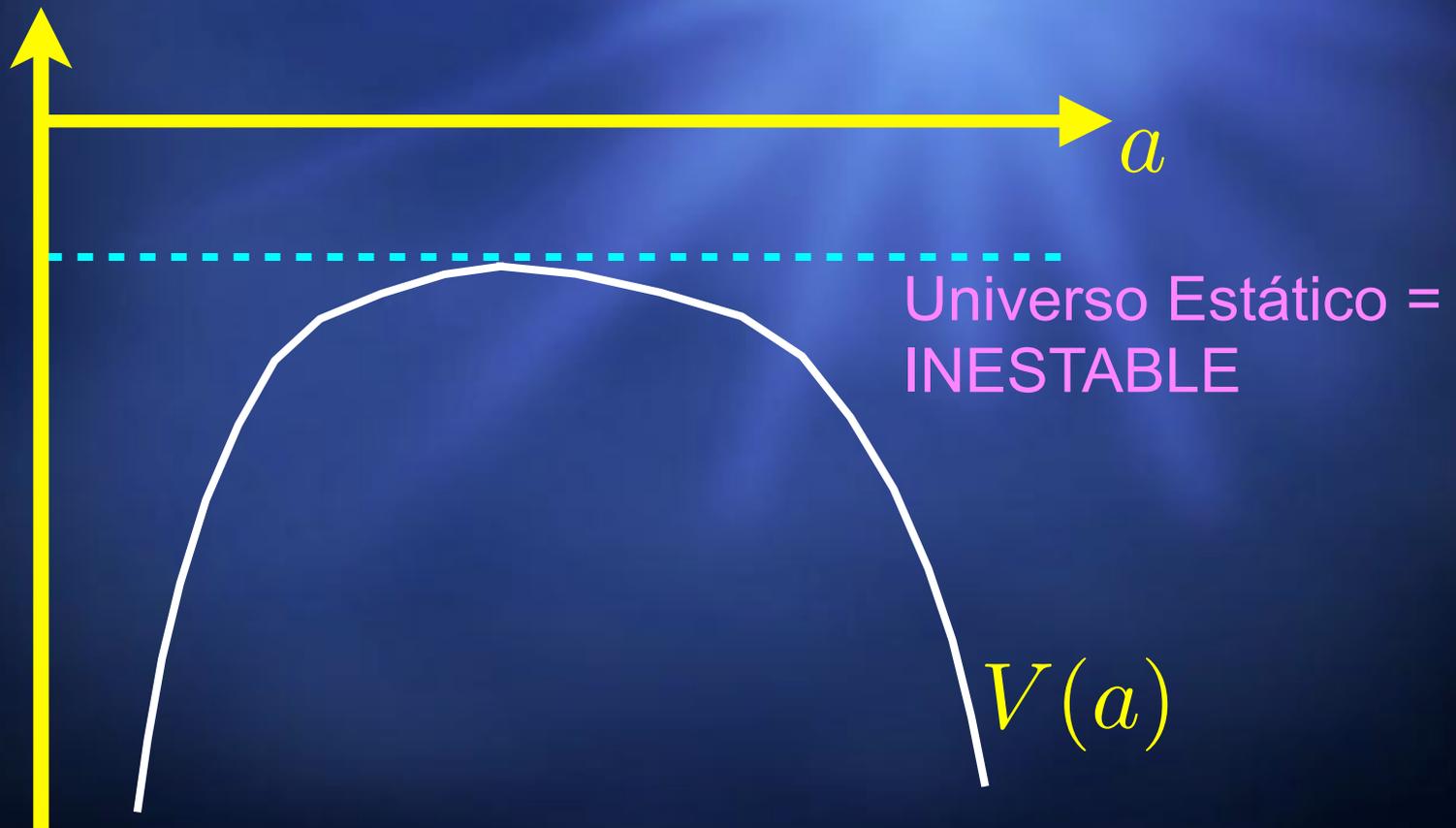
Ecuación de Friedman = Ecuación de energía



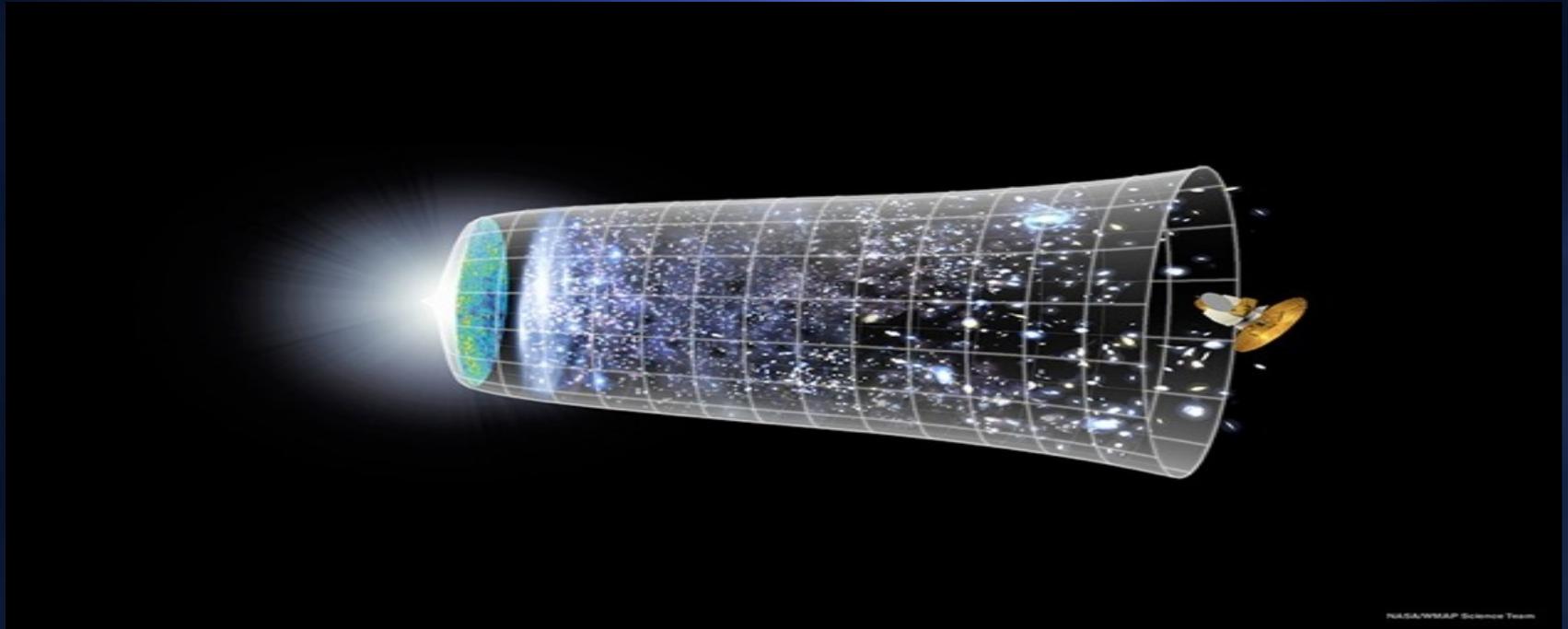
Antes de 1924-27 NO se sabia que el Universo se expande  
Einstein buscó una solución cosmológica estática

$$\frac{1}{2}\dot{a}^2 + V(a) = E \quad \longrightarrow \quad V(a) \propto -\frac{1}{a} - \Lambda a^2$$

$\Lambda =$  constante cosmológica



*¿Como era antes? Si el universo se expande ...  
podemos “pasar la película al revés”*



*Tiempo cósmico* →



★ *Conforme vamos hacia el pasado ... Las distancias entre galaxias se reducen ....*

★ *Hasta la época de la formación de estrellas y galaxias*

★ *luego hasta la época la formación de átomos de Hidrógeno y helio (plasma atómico)*

★ *luego hasta la época la formación de partículas elementales (plasma nuclear)*

*El Universo debió haber sido mas caliente y mas denso ...*

*mas caliente y mas denso ...*

*Así seguimos ... hasta llegar al*

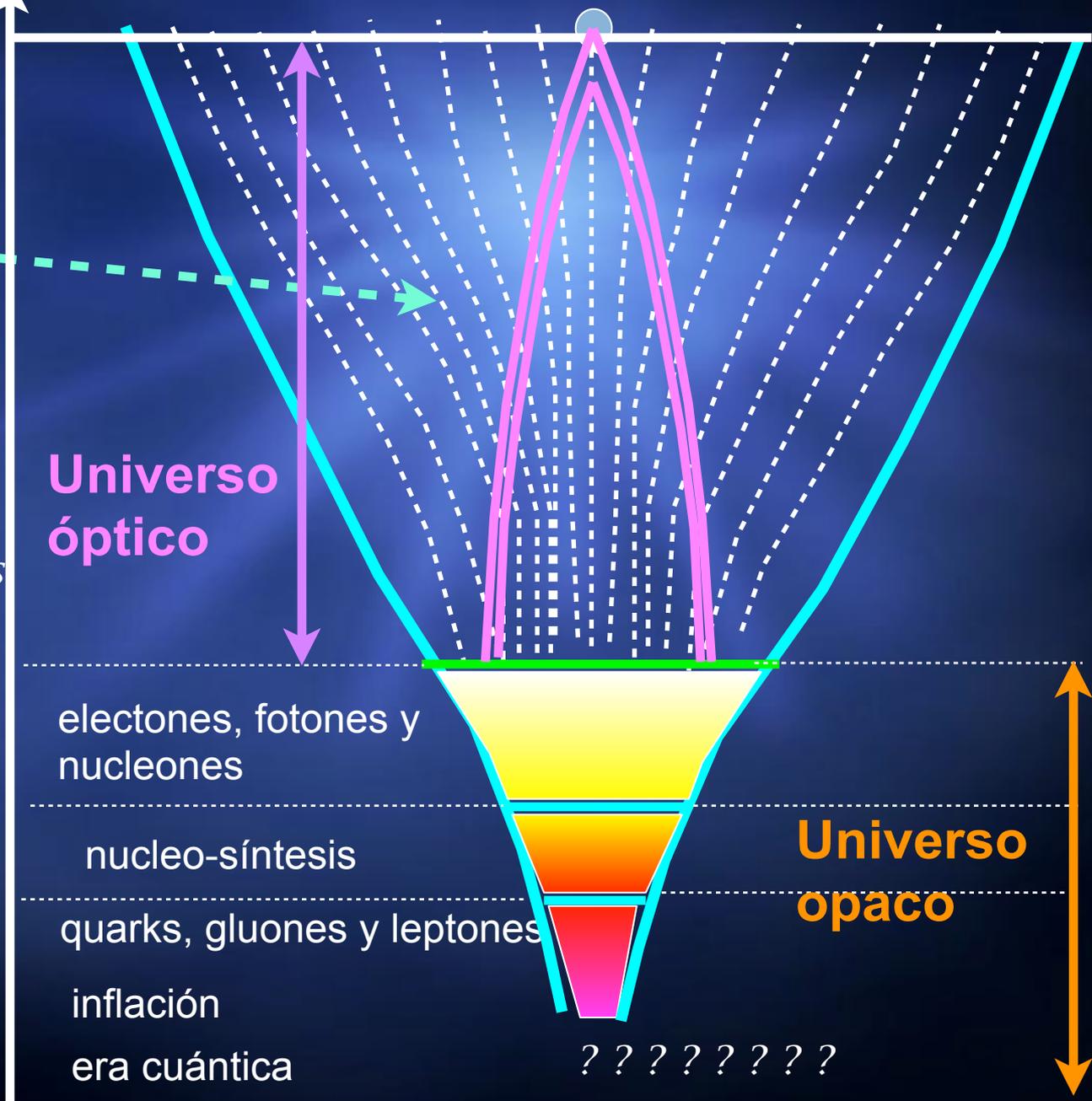
**GRAN  
PUUUM**



Also known  
as “big bang”

t = hoy = 13 mil millones de años

Gas de galaxias



*Formación de estrellas*  
*Formación de galaxias*

*Plasma Radiativo*  
400 mil años

*Plasma Nuclear*  
3 minutos

*Plasmas primordiales*

<< 1 seg

electrones, fotones y nucleones

nucleo-síntesis

quarks, gluones y leptones

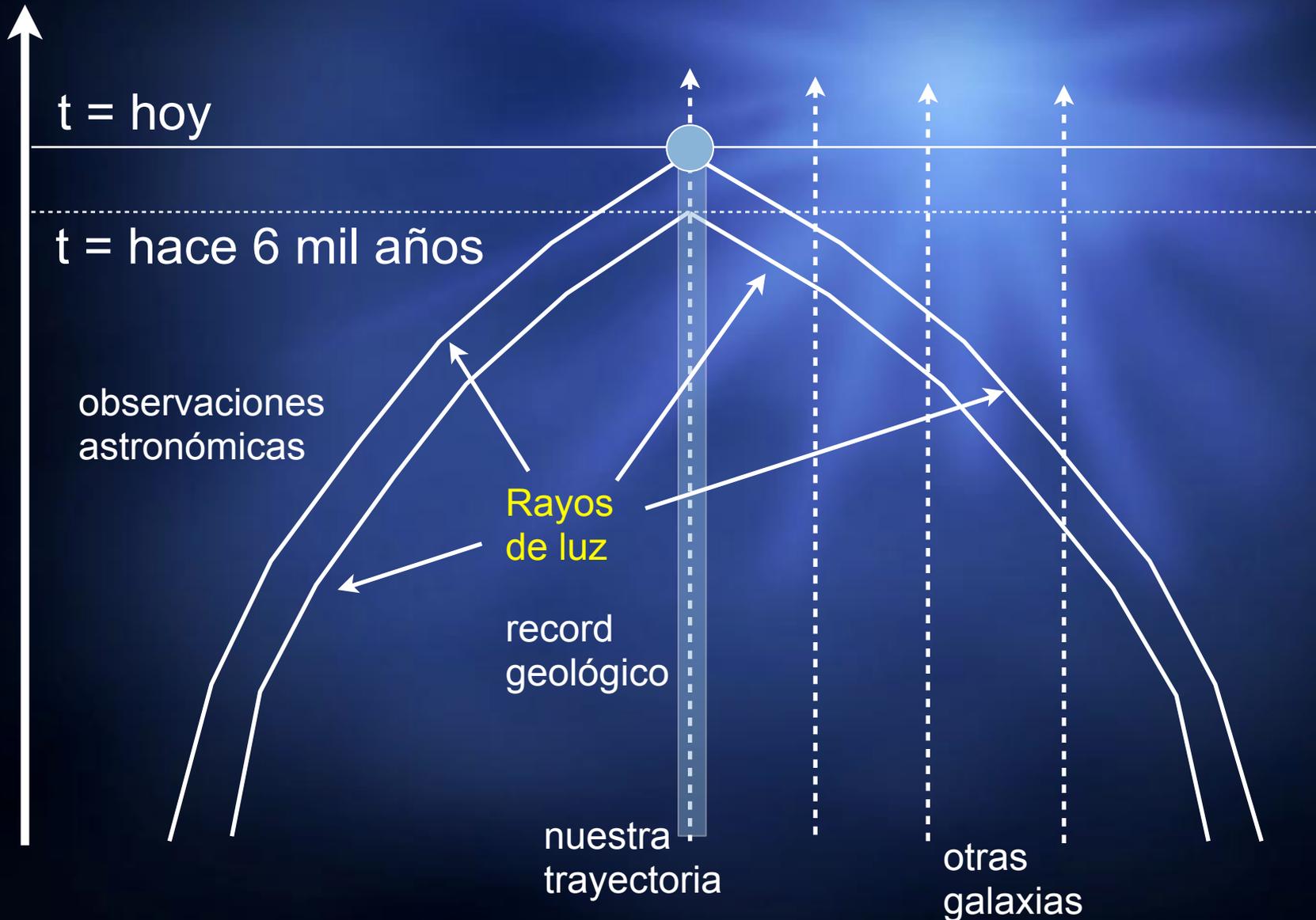
inflación

era cuántica

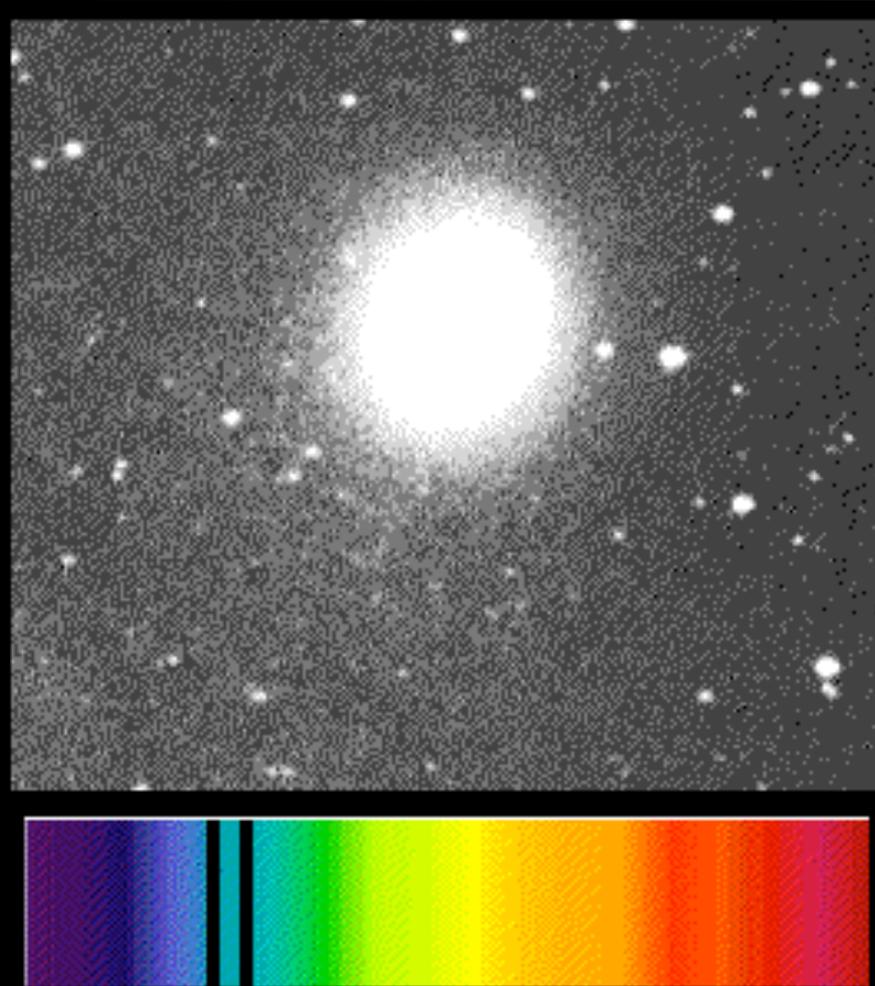
????????

**Universo opaco**

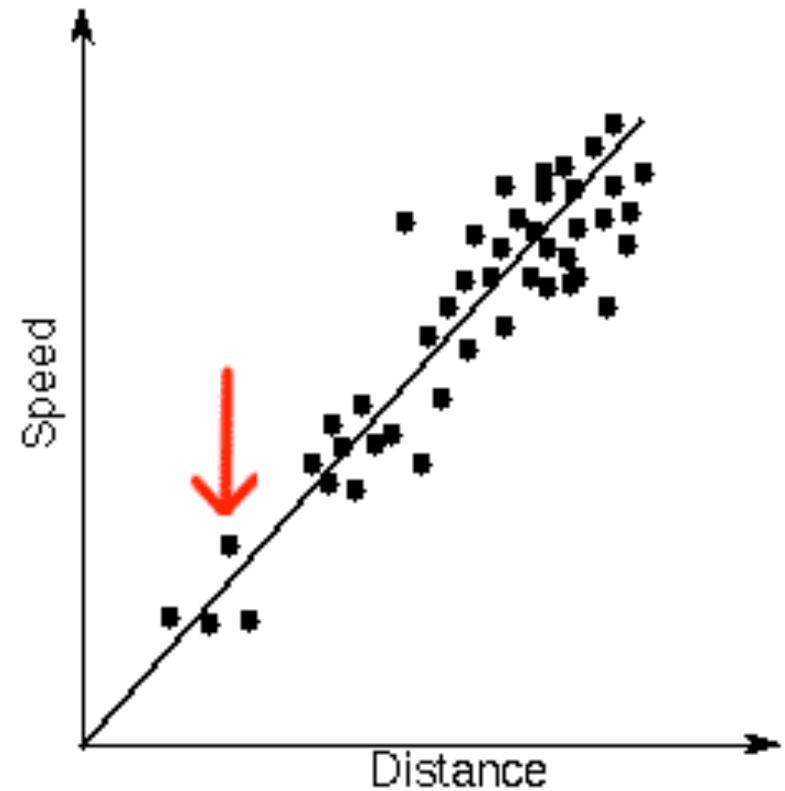
Mientras mas lejos vemos mas exploramos el pasado del Universo (pero no podemos observar todo ...)



“Distancias” ópticas = corrimiento al rojo  $z$



**Hubble Law**  
recession speed =  $H_0 \times \text{distance}$



# Optica de modelos cosmológicos

$$\dot{a}^2 = \frac{8\pi G}{c^4} \rho a^2 - k_0$$

$$\dot{\rho} = -3(\rho + p) \frac{\dot{a}}{a}$$

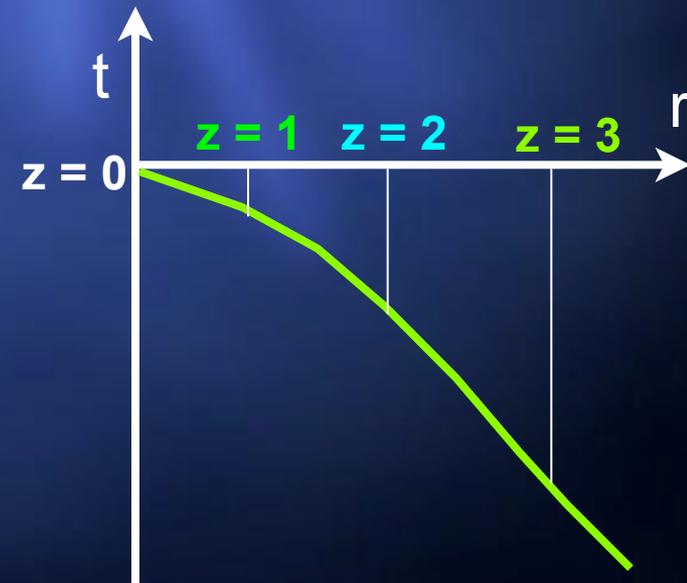
$z$  -- aumenta hacia el pasado

$$a(t_0) = 1, \quad z(t_0) = 0,$$

$$t < t_0, \quad z > 0,$$

Ecuaciones con respecto a  $z$

$$a = \frac{1}{1+z} \quad \Rightarrow \quad \frac{da}{dz} = -\frac{1}{1+z^2}$$

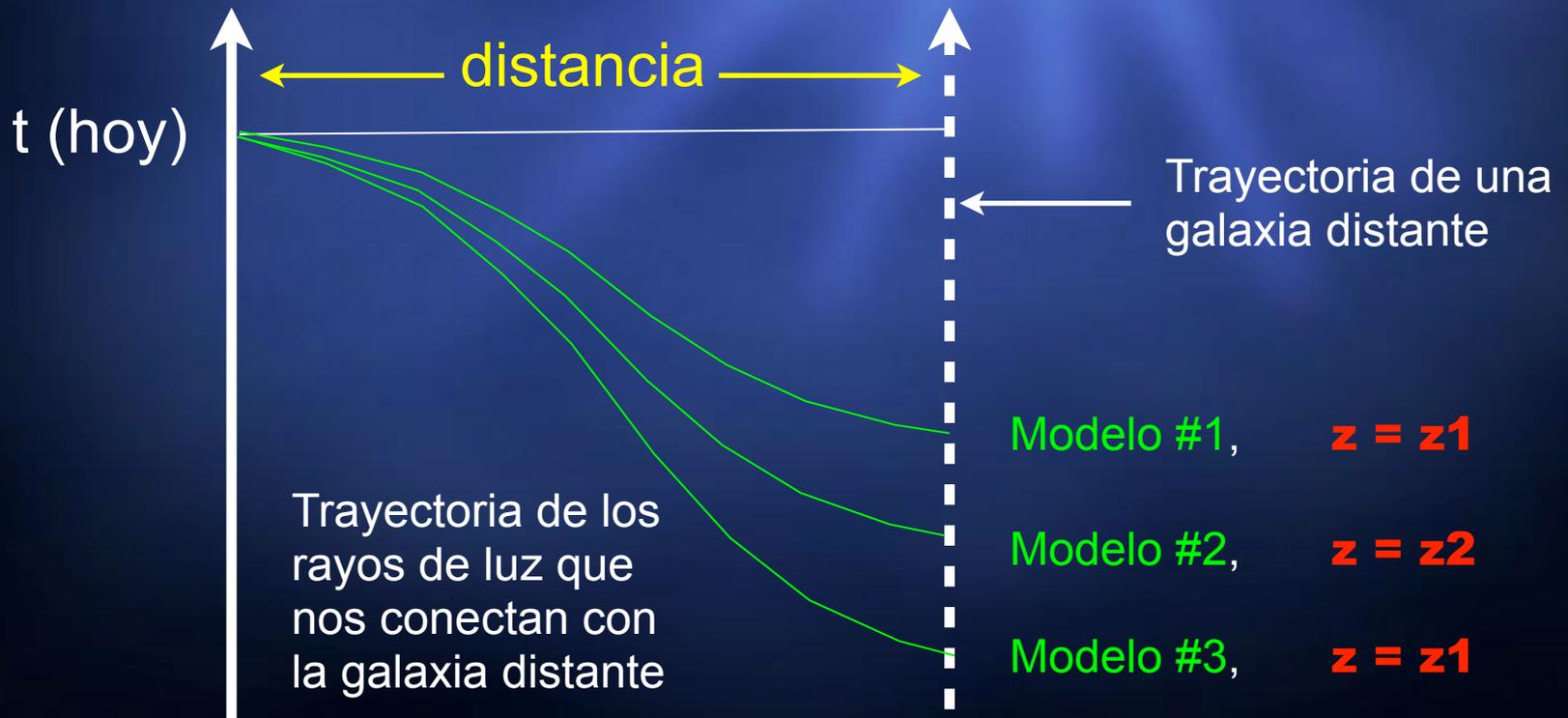


# Metodología: ajuste observacional

- Observamos velocidades (de recesión) = **CORRIMIENTO AL ROJO ( $z$ )**
- Podemos medir **distancias** (con menor precisión mientras mas lejanos los objetos) .....  **$d$**

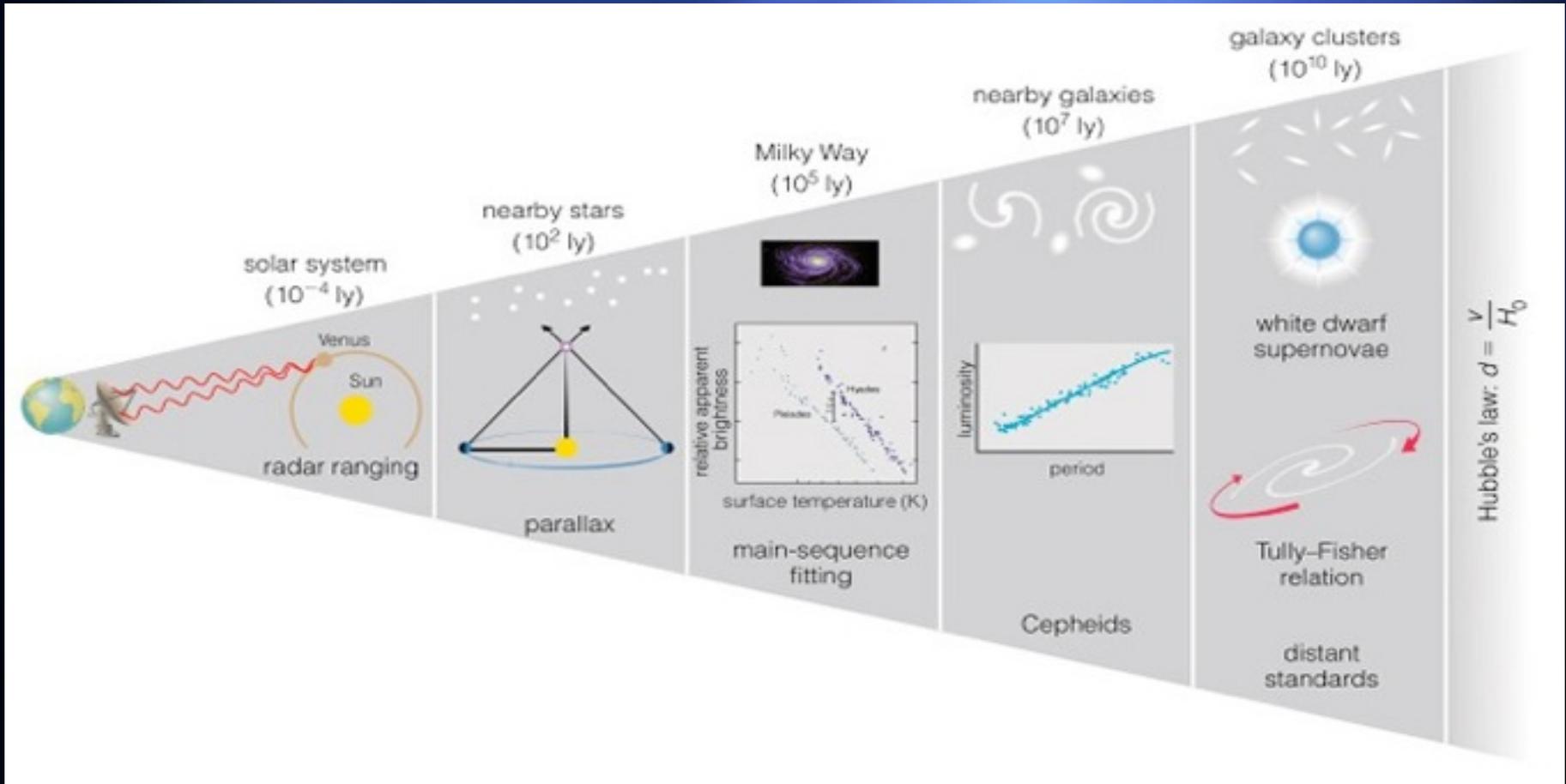
-- Ajustar predicciones teóricas a estas observaciones

- Cada modelo teórico (tipo de materia y tipo de curvatura) nos da una relación diferente entre  **$z$**  y  **$d$** .



# ¿Como medimos distancias cósmicas?

Diferentes distancias - diferentes métodos, empezando desde objetos “cercaños”, pasando a objetos mas distantes (escalera), hasta llegar a la escala cósmica: aprox 300 millones de años luz



# Inventario de la materia-energía cósmica

- ★ Hasta los años 80's se creía que se podía explicar la dinámica cósmica mediante las ecuaciones de Einstein,
- ★ se suponía que toda la materia (fuente de la gravitación) era materia visible formada por partículas del "Modelo Estándar":

- Fotones
- Protones, electrones y neutrones
- Neutrinos

en esos tiempos la Cosmología era una ciencia con muchos modelos teóricos y pocos datos observacionales

pronto hubo "problemas en el paraíso"

empezamos a tener mas y mejores  
datos observacionales y vimos que ....

- El estudio de las curvas de rotación de galaxias, lentes gravitacionales y formación de estructura **SUGIEREN** que el 80-90% de la masa galáctica debería ser “Materia Oscura”
- Observaciones de supernovas desde 1996 **SUGIEREN** que podría haber otro componente “exótico” llamado “Energía Oscura” que acelera al cosmos

¿Qué son la “Materia Oscura” y la Energía Oscura?  
Aun no lo sabemos, pero esperamos que experimentos y observaciones futuras nos den la respuesta.

# ¿Porqué creemos que hay materia “oscura” ?

- ⊕ Porque sentimos su gravedad: las observaciones galácticas y cósmicas no son compatibles con la pura existencia de la materia visible (la “familiar”)

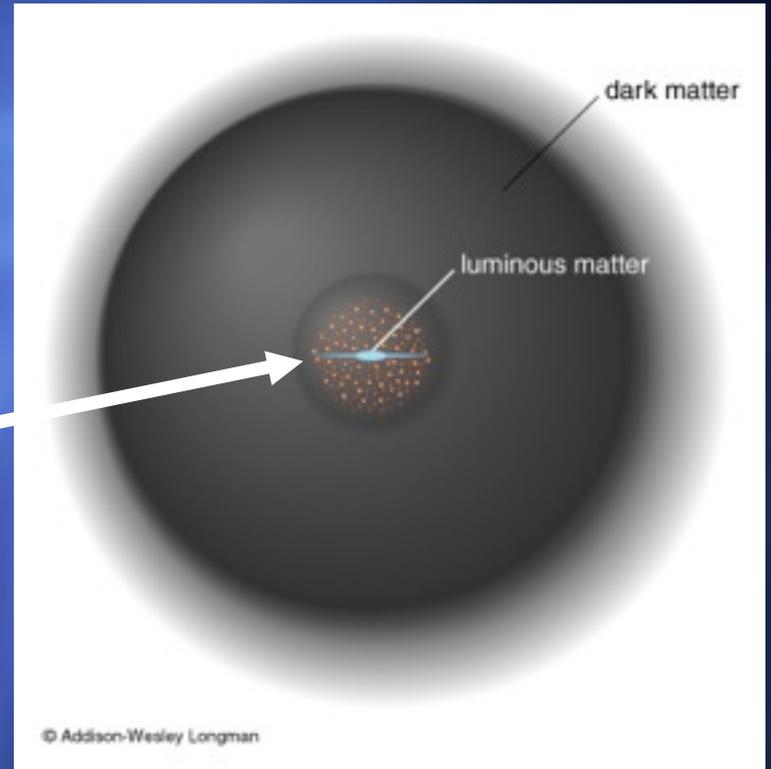
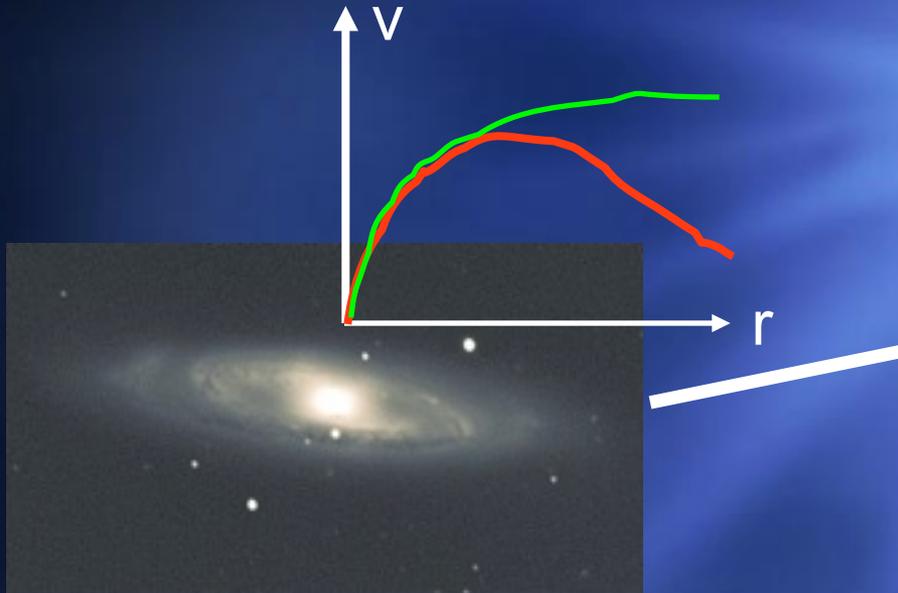
Organicemos una manifestación y gritemos:

NO SE VE !!!!

SE SIENTE !!!!!

LA MATERIA OSCURA ESTA PRESENTE !!!

# Materia oscura galáctica



$$2M(r) = \int_r \rho(r) r^2 dr$$

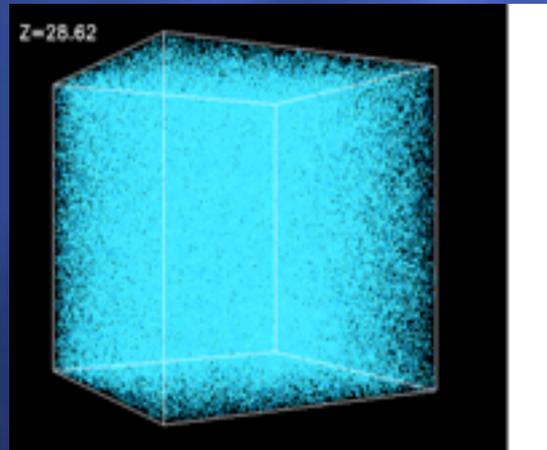
$$v^2(r) = \frac{M(r)}{r}$$

Masa según materia visible

Masa según velocidad de rotación de las estrellas

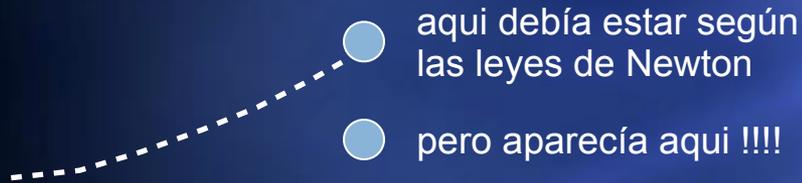
*Formacion de estructura galactica a partir de un universo temprano y gaseoso (plasma)*

*Solamente se obtiene un buen ajuste con las estructuras observadas si suponemos que existe Materia Oscura.*



# El suponer la existencia de materia “oscura” (no visible) NO es una metodología nueva

En el siglo XIX los astrónomos trataban de predecir la posición del planeta Urano en el cielo:



**La razón por la que no “aparecía” en el lugar “debido” era la presencia de un planeta aun no descubierto: Neptuno (materia oscura)**

- Se propuso la existencia de “materia oscura” para explicar observaciones con la teoría de gravedad vigente (teoría de Newton)
- Pero esta estrategia NO siempre funciona, a veces NO existe materia oscura y es necesario modificar la teoría de la gravitación

Ejemplo: la precesión de la órbita de Mercurio



**Se propuso que esto sucedía por la presencia de un planeta aun no descubierto: Vulcano (materia oscura), pero este NUNCA fue detectado. Esta precesión fue explicada por una nueva teoría de la Gravitación: La teoría de Einstein**

No sabemos si existe la materia oscura, pero podemos suponer que existe y hacer modelos teóricos sobre ella:

★ Si son partículas “exóticas”, estas no pueden ser demasiado ligeras (materia oscura “caliente”). Deben ser “medianas” (“tibia”) o pesadas (“fria”)

★ Partículas super-simétricas (fermiones) sin carga eléctrica que no se derivan del Modelo Estándar

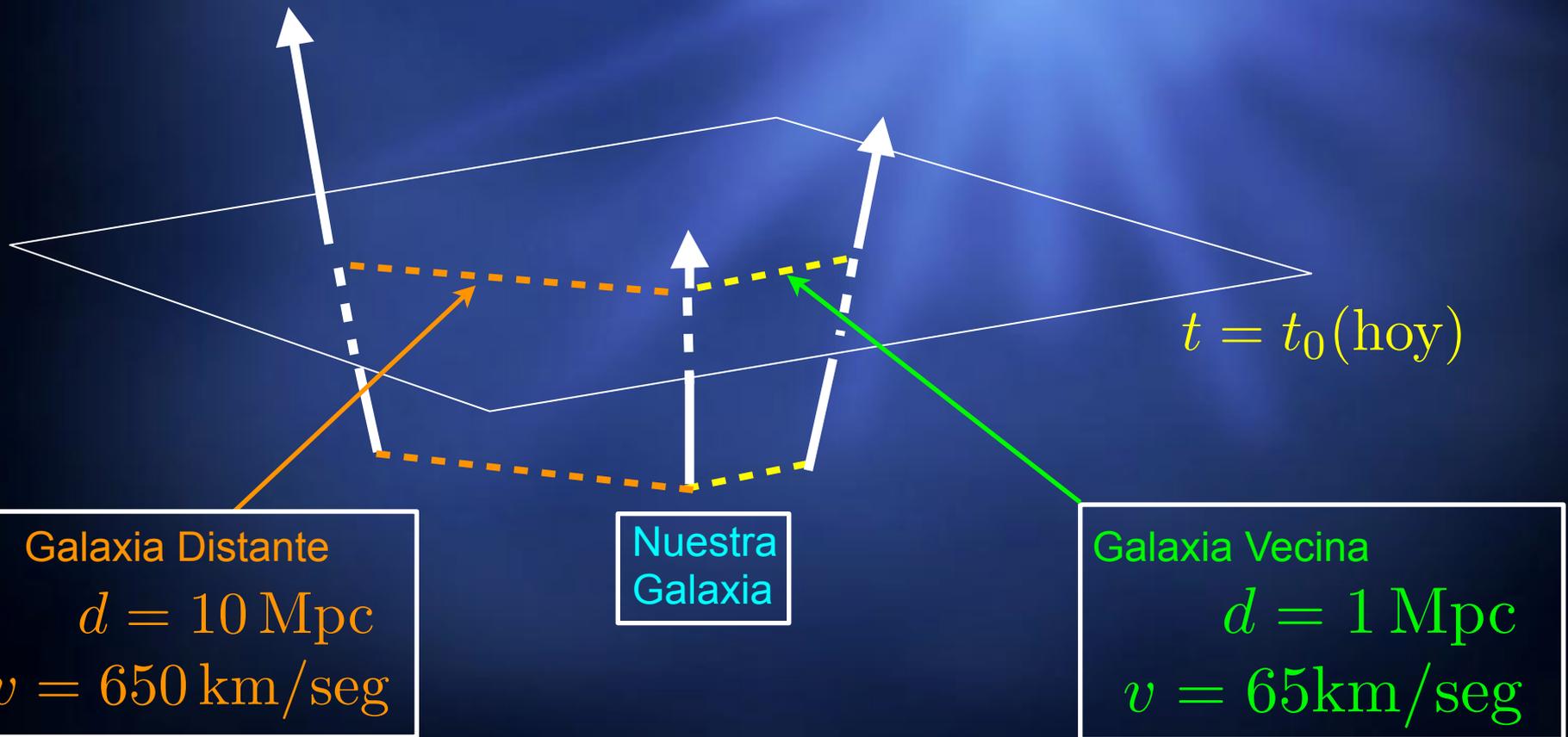
★ Campos escalares (bosones en estado de coherencia cuántica)

# Expansión cósmica

$$H_0 = H(t_0) = \left[ \frac{\dot{a}}{a} \right]_{t_0}$$

$$H_0 = 65 \pm 10 \frac{\text{km}}{\text{seg}} \times \text{Megaparsec}$$

1 Megaparsec = 3.26 millones de años luz



# Contenido material vs curvatura y aceleración

$$\text{Densidad Crítica} \quad \frac{3c^4 H_0^2}{8\pi G} \approx 2 \times 10^{-29} \frac{\text{gm}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{Para cada componente de materia} \quad \Omega_i = \frac{\rho_i}{\rho_{\text{crit}}} = \frac{8\pi G}{3c^4 H_0^2} \rho_i$$

$$\text{El total} \quad \rho_T = \sum_i \rho_i, \quad \Omega_T = \sum_i \Omega_i = \frac{8\pi \rho_T}{3c^4 H_0^2}$$

Curvatura vs densidad crítica

$$\frac{k_0}{a^2} = \Omega_T - 1, \quad k_0 = 0 \Rightarrow \Omega_T = 1$$

Curvatura vs expansión decelerada ( $q < 0$ )

$$q \equiv -\frac{\ddot{a}}{H^2 a} = -\frac{1}{2}\Omega_T(1 + 3w), \quad w \equiv \frac{p_T}{\rho_T}$$

# La "Bodega Cósmica" en 1996

$$\Omega_{\gamma} \sim 0.001,$$

fotones

$$\Omega_{\nu} \sim 0.001,$$

neutrinos

$$\Omega_b \sim 0.05$$

materia visible

$$\Omega_{\text{CDM}} \sim 0.25$$

materia oscura

La suma es

$$\Omega_{\text{TOT}} \sim 0.30 < 1$$

Si este es el contenido total, entonces el universo es de curvatura negativa y su expansión es decelerada

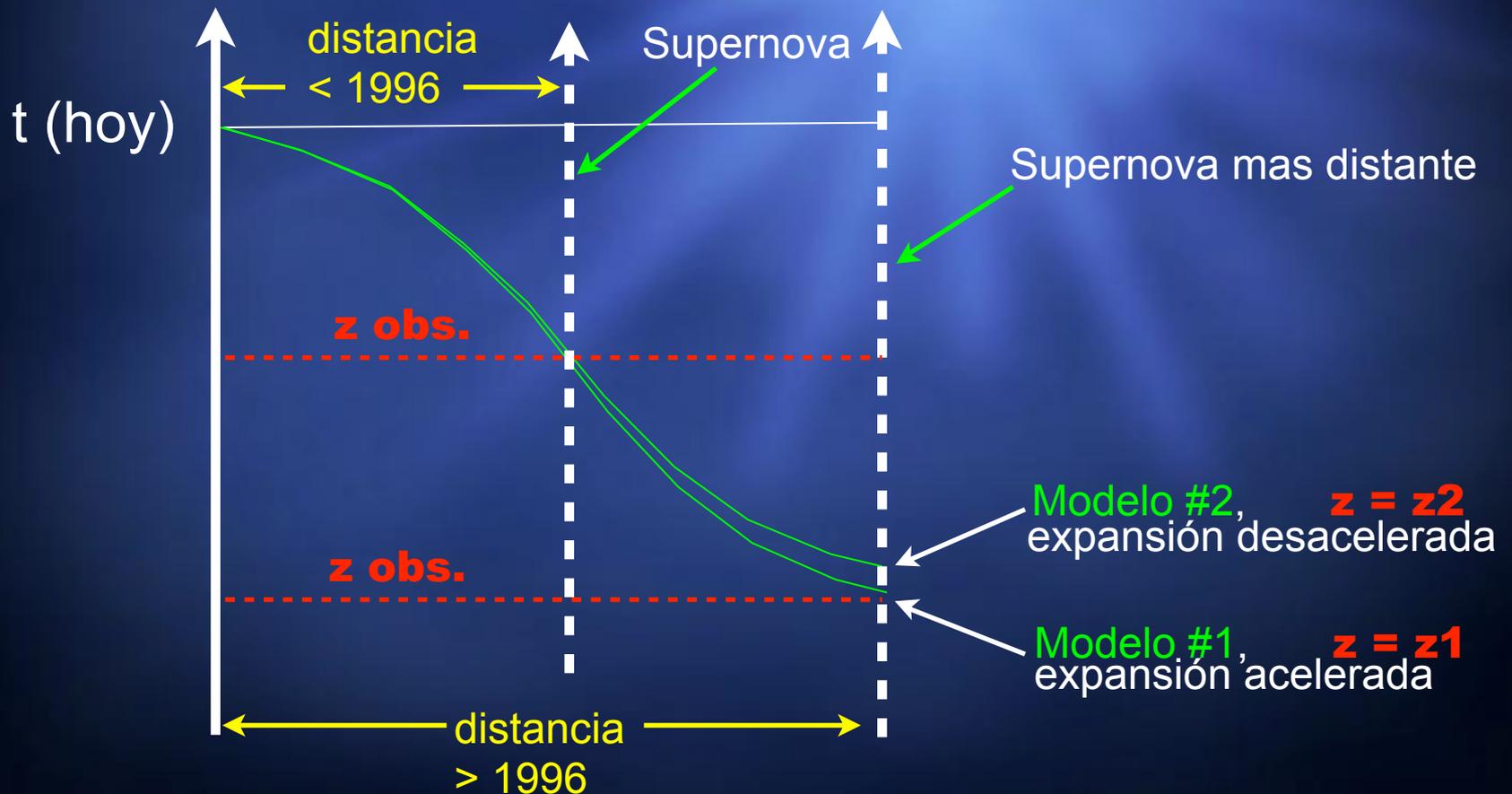
$$(q < 0)$$

$$\Omega_T \approx \Omega_{\text{CDM}}, \quad p_T \approx p_{\text{CDM}} \approx 0,$$

# Energía oscura y aceleración cósmica

# ¿Porqué no se manifestó antes este problema?

Por que no teníamos observaciones confiables de objetos lo suficientemente distantes para discriminar modelos cosmológicos

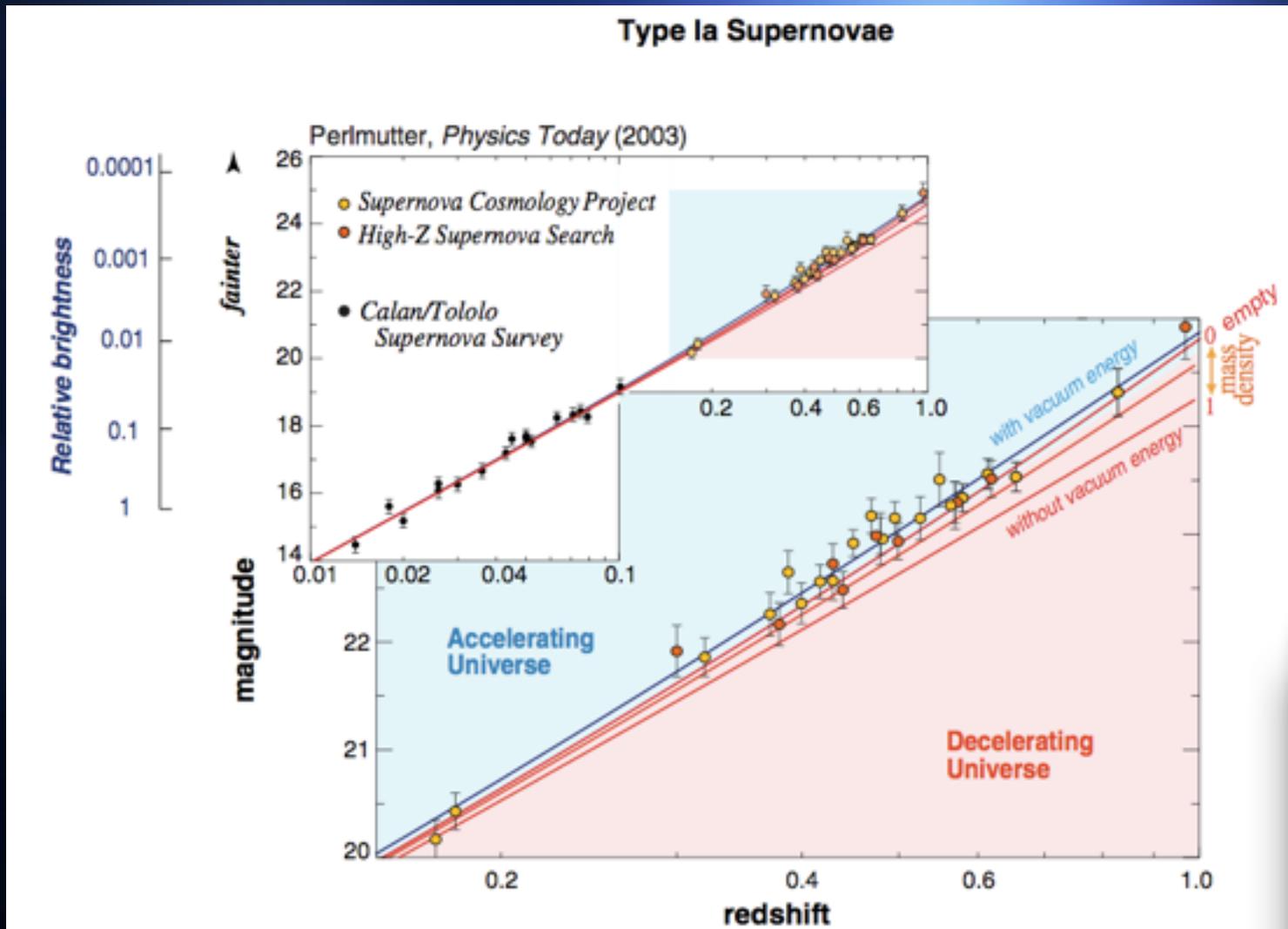


# ¿Porqué se usan las supernovas?

- ★ Son lo suficientemente luminosas como para ser vistas a distancias colosales: hasta 2000 millones de años luz (casi 1/3 de la edad del Universo)

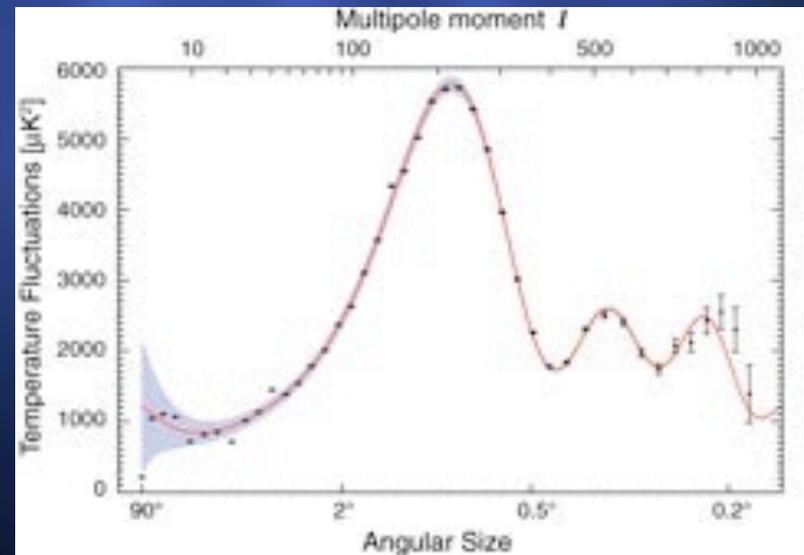
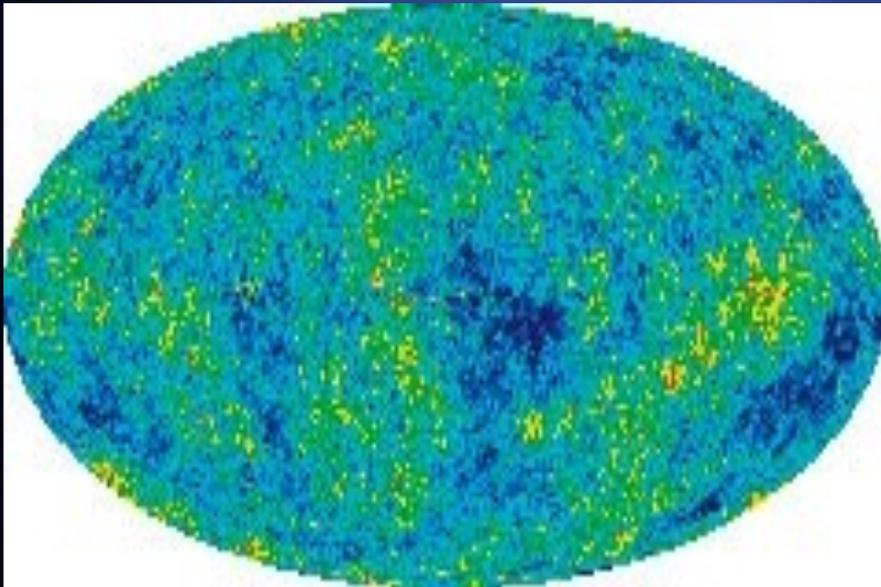
- ★ Son “velas estándar”, por lo tanto dan una indicación muy buena de la distancia en base a su luminosidad “absoluta”

Observaciones desde 1996 basadas en Supernovas (aparentemente) indican una aceleración cósmica, lo cual contradice  $\Omega < 1$  !!



# *Radiación de fondo (CMB) => el universo es espacialmente plano: $\Omega = 1$*

- Fue descubierta por accidente
- Es casi cuerpo negro (RESIDUO DEL BIG BANG)
- Es casi isotrópica (igual en todas direcciones)
- Sus pequeñas desviaciones de la isotropía sirven para calibrar modelos teóricos (materia cósmica)

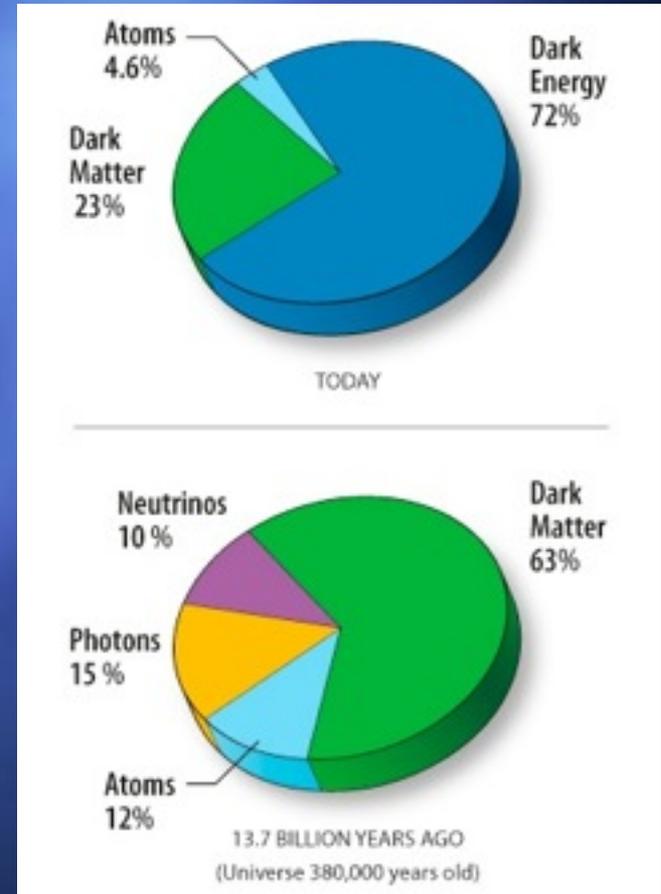


# Consecuencias ....El Modelo Lambda-CDM

★ La materia de la que estamos hechos (protones, electrones, y neutrones) mas la luz, constituye menos del 5% del contenido del universo.  $\Omega = 0.05$

★ La “materia oscura”, que se concentra en las galaxias forma el 25%.  $\Omega = 0.25$

★ Un tipo de “cosa” llamada “energía oscura”, que acelera al universo forma el 70%.  
El faltante para  $\Omega = 1$



Hasta la fecha NO sabemos que son la materia y energia “oscuros”

# Aumentar el inventario de la "bodega" cósmica

$$\Omega_\gamma \sim 0.001,$$

fotones

Agregar

$$\Omega_\nu \sim 0.001,$$

neutrinos

$$\Omega_\Lambda \sim 0.7$$

$$\Omega_b \sim 0.05$$

materia visible

energía oscura

$$\Omega_{\text{CDM}} \sim 0.25$$

materia oscura

(Constante Cosmológica)

Suma

$$\Omega_T \sim 1.0$$

espacialmente plano

$$p_\Lambda = -\rho_\Lambda \Rightarrow w \approx \frac{p_\Lambda}{\rho_{\text{CDM}} + \rho_\Lambda} \approx -1$$

$$q = -\frac{1}{2}\Omega_T(1 + 3w) > 0$$

el Universo se  
acelera !!!

# Modelo dominante: $\Lambda - \text{CDM}$

$\Omega_{\text{CDM}} \approx 0.23$       Materia oscura “fria” (cold dark matter)

$\Omega_{\Lambda} \approx 0.70$       Constante cosmológica o energía oscura

$\Omega_{\text{vis}} \approx 0.06$       Materia visible, fotones y neutrinos

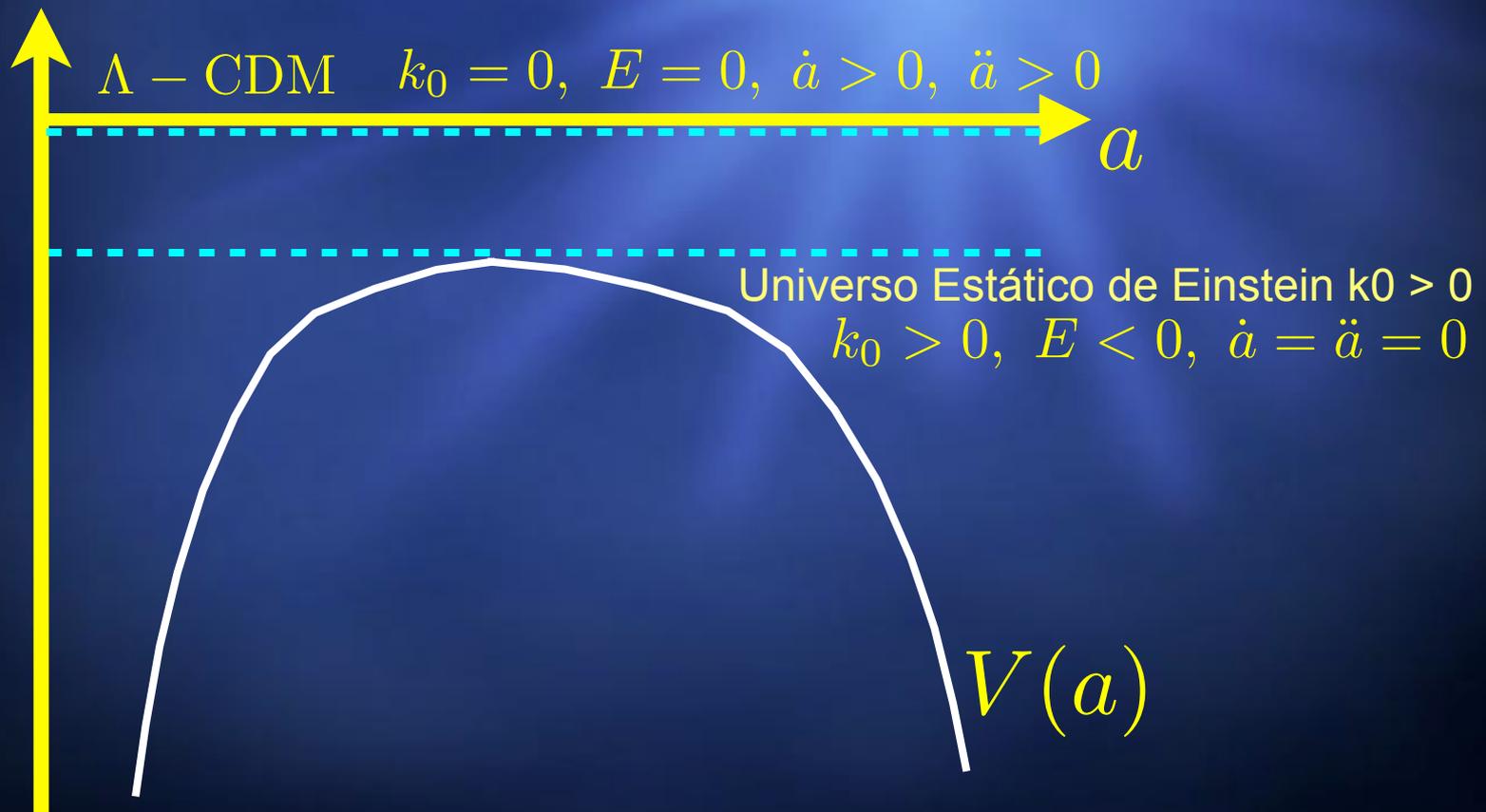
$$\Omega = \Omega_{\text{vis}} + \Omega_{\text{cdm}} + \Omega_{\Lambda} \approx 1$$

$q \approx \frac{1}{2} > 0$       expansión acelerada

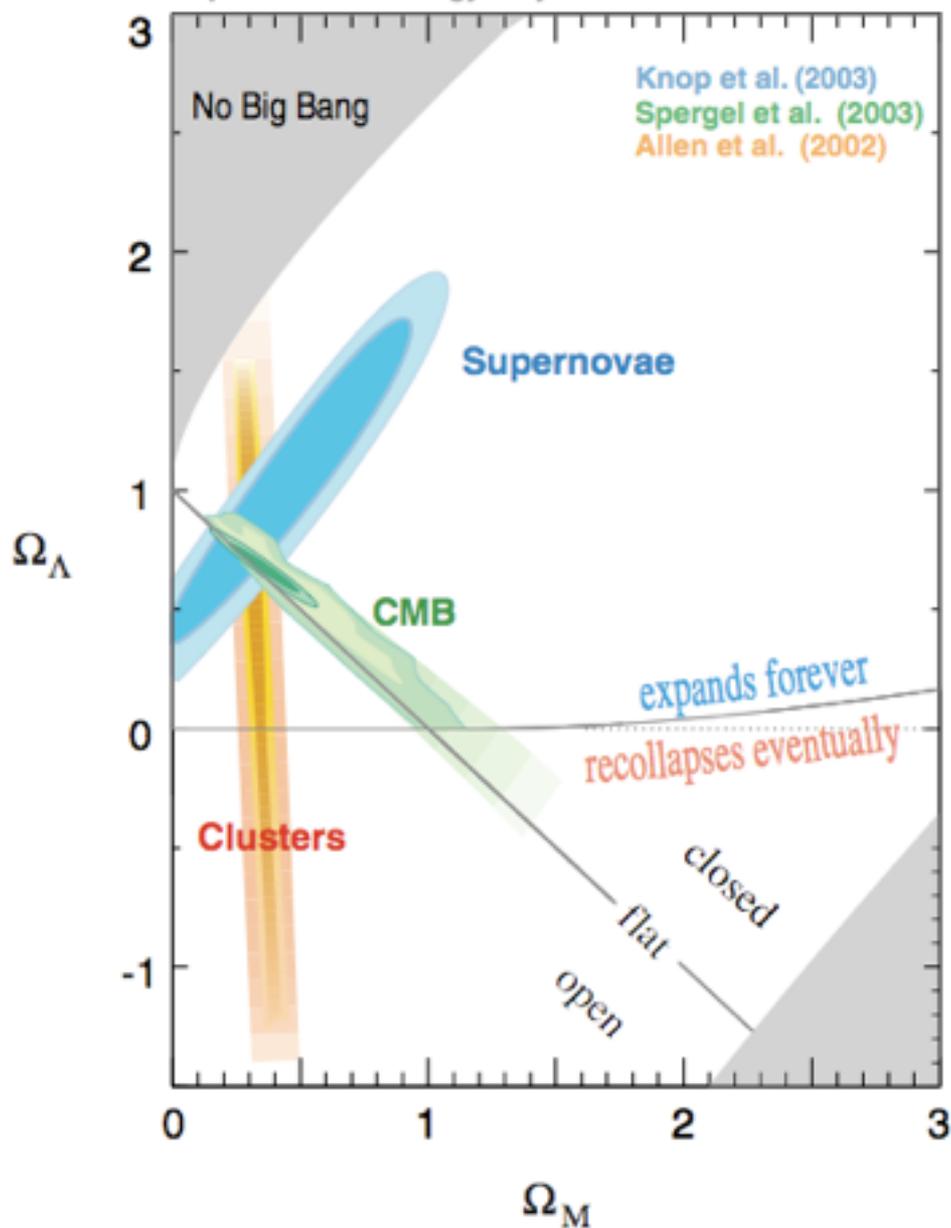
Esta “constante cosmológica” es la misma que propuso Einstein? **La respuesta es NO**

$$\frac{1}{2}\dot{a}^2 + V(a) = E \quad \longrightarrow \quad V(a) \propto -\frac{1}{a} - \Lambda a^2$$

$\Lambda$  = constante cosmológica



Supernova Cosmology Project



La contrastación entre observaciones independientes da un ajuste excelente

Se asume homogeneidad e isotropía para obtener estos ajustes

Bajo esta suposición, es inevitable introducir energía oscura

# ¿ Es absolutamente imprescindible que existan la materia y energía “oscuras” ?

★ Si queremos mantener la teoría gravitación de Einstein como teoría vigente, entonces **NECESITAMOS** que exista la materia oscura

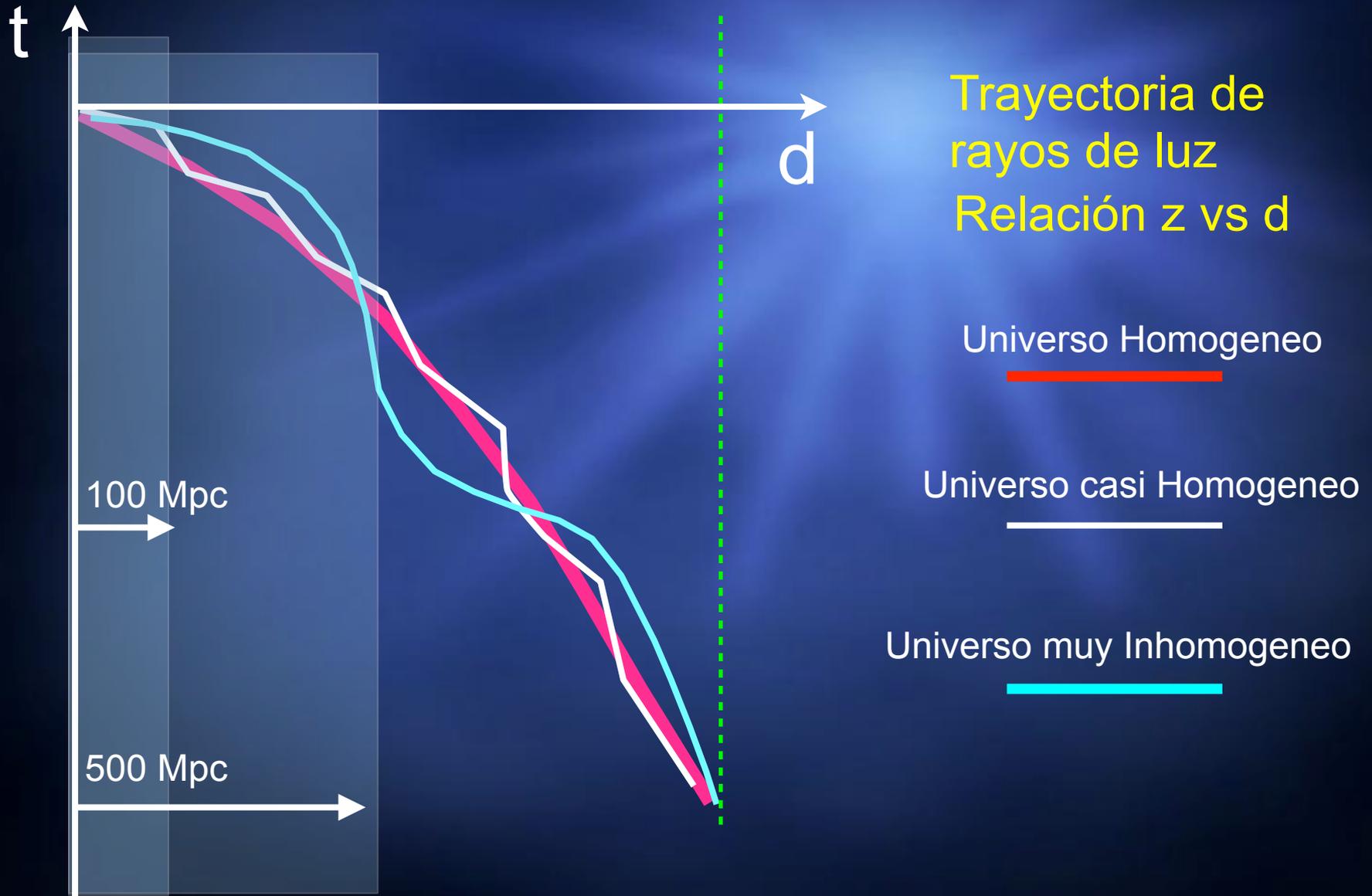
Sin embargo ....

★ Podemos mantener la teoría de gravitación de Einstein como teoría vigente **SIN SUPONER** que exista la energía oscura

★ Podemos prescindir de ambas fuentes “oscuras” si utilizamos otra teoría de la Gravitación (modificación o extensión de la de Einstein)

Hasta la fecha las modificaciones de la teoría de Einstein no han sido exitosas

Una “escala de homogeneidad” grande podría explicar las observaciones sin modificar la teoría de Einstein.



# Conclusiones:

- ⊕ Explicar las observaciones cósmicas es uno de los problemas fundamentales de la Física Actual.
- ⊕ ¿Se mantendrá la Teoría de Einstein como teoría vigente de la Gravitación?
- ⊕ Esperamos nuevos resultados observacionales y experimentales.
- ⊕ También, hace falta mucho trabajo teórico.
  - ¿ Quien se apunta para esta tarea ?