

# 8. El fondo cosmico de microondas

## 8.1 Recombinacion

despues de 3 minutos se acabo la nucleosintesis  
temperatura  $10^9$  K

todavia domina la radiacion hasta  $z_{eq} \approx 16700 \Omega_m$

cuando materia comienza de dominar la expansion

$$H \approx H_0 \Omega_m / R^3$$

con la solucion  $R(t) = \left( \frac{3}{2} \sqrt{\Omega_m} H_0 t \right)^{2/3}$

y la temperatura  $T \sim \frac{1}{R} \sim t^{-2/3}$

Cuando se forman los primeros atomos?

energia de ionisacion de hidrogeno 13.6 eV  $\rightarrow$   $10^5$  K

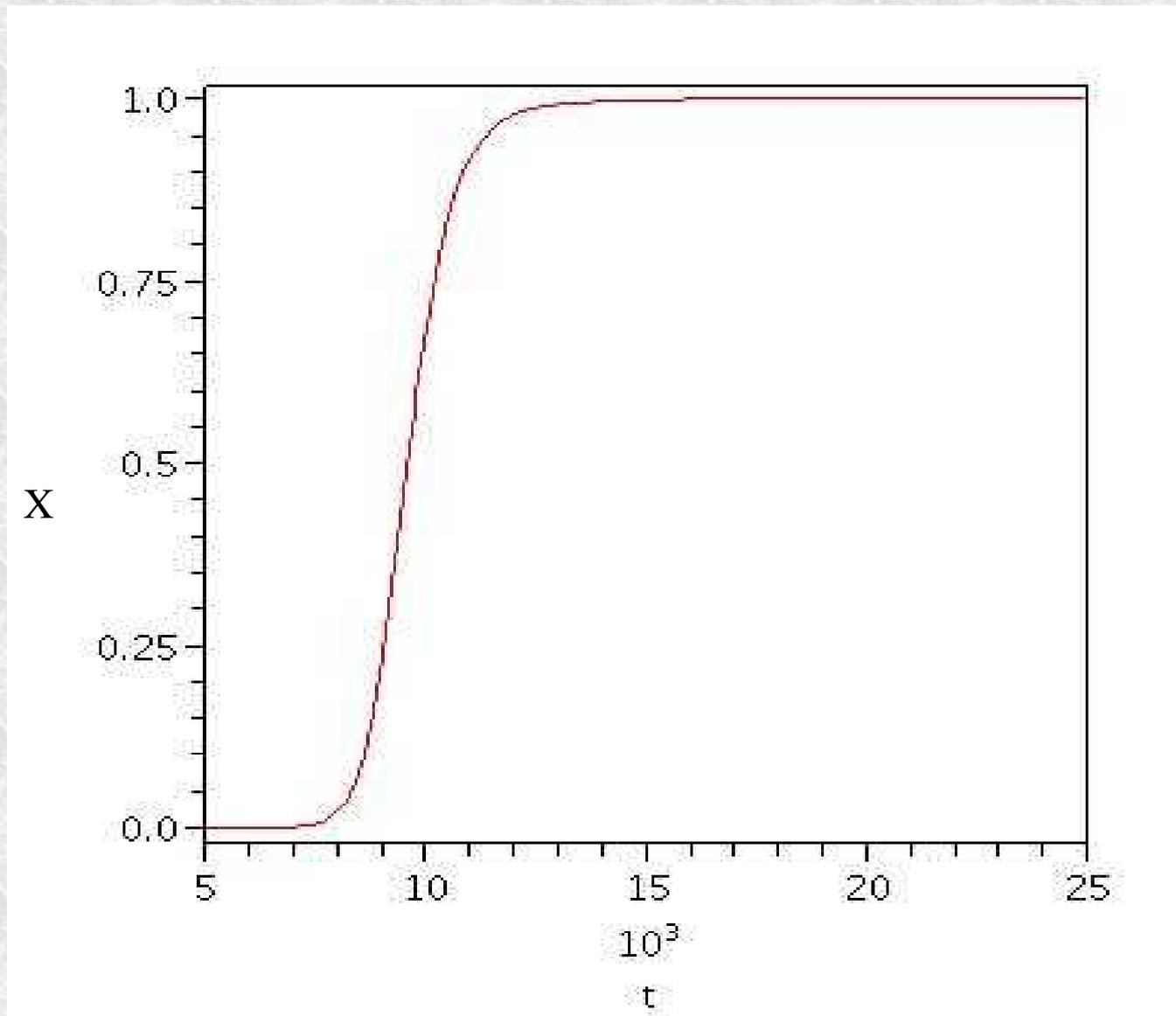
pero: con temperaturas mas baja, combinacion de los electrones con los protones no puede pasar porque todavia hay fotones  $> 13.6$  eV

en condiciones de equilibrio tenemos la ecuacion de Saha

$$\frac{1-x}{x^2} = 3.84 \eta \left( \frac{kT}{m_e c^2} \right)^{3/2} \exp\left( \frac{13.6 \text{ eV}}{kT} \right)$$

siendo  $x =$  densidad numerica de electrones libres/ densidad num. de protones

# ecuacion de Saha



segun Saha, tendríamos neutralidad con  $T \sim 7000 \text{ K}$

pero: transiciones directas al estado basico de hidrogeno liberan  
fotones  $> 13.6 \text{ eV}$  ---> ionisan otros atomos

transiciones simples a traves  $n=2$  tampoco funcionan:

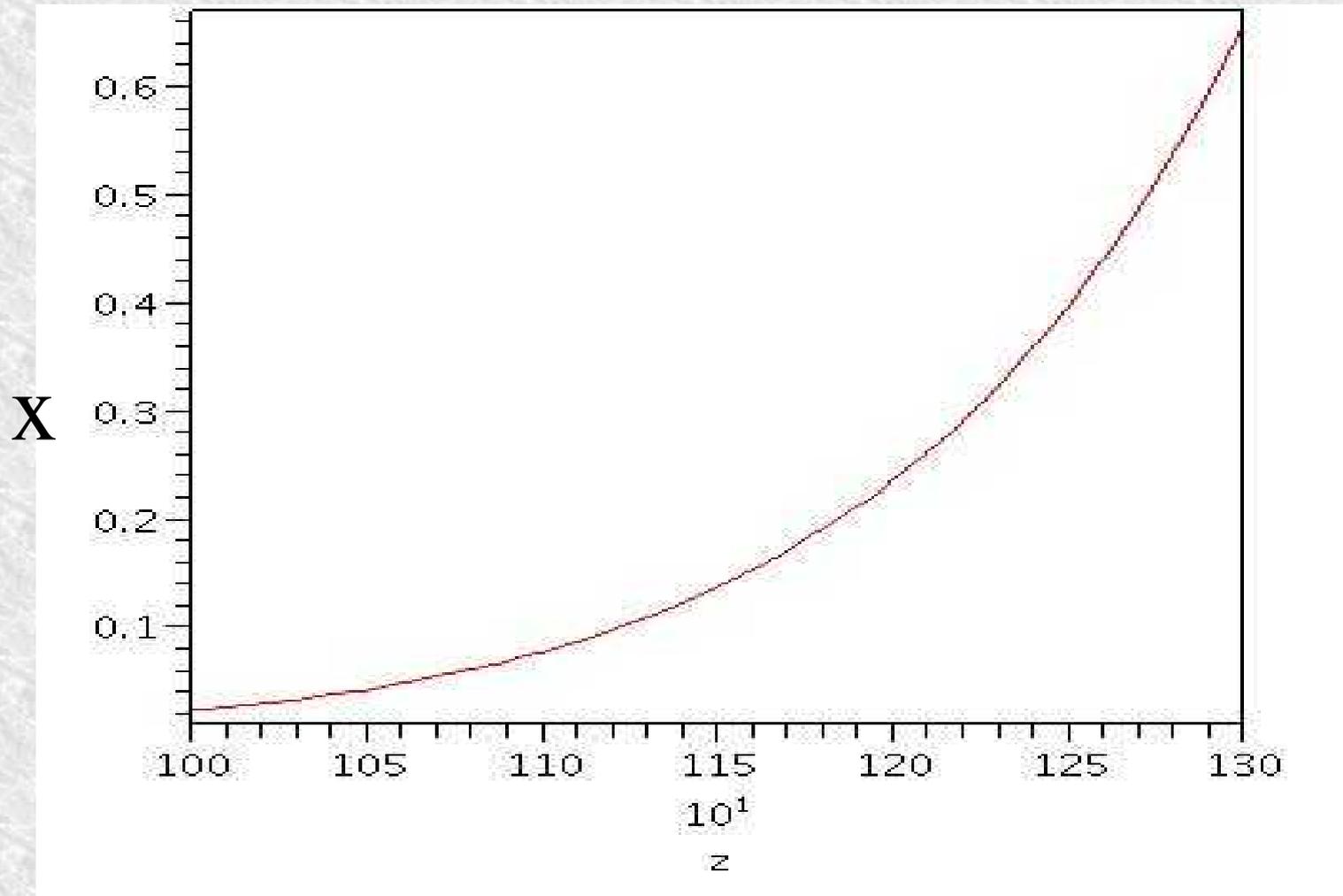
transicion  $n=2 \rightarrow n=1$  libera fotones de Lyman alfa  
---> ionisan otros atomos

en realidad, recombinacion funciona por un evento raro:

transicion  $n=2 \rightarrow n=1$  con dos(!) fotones emitidos  
---> fotones no tienen la energia de ionisar  
otros atomos

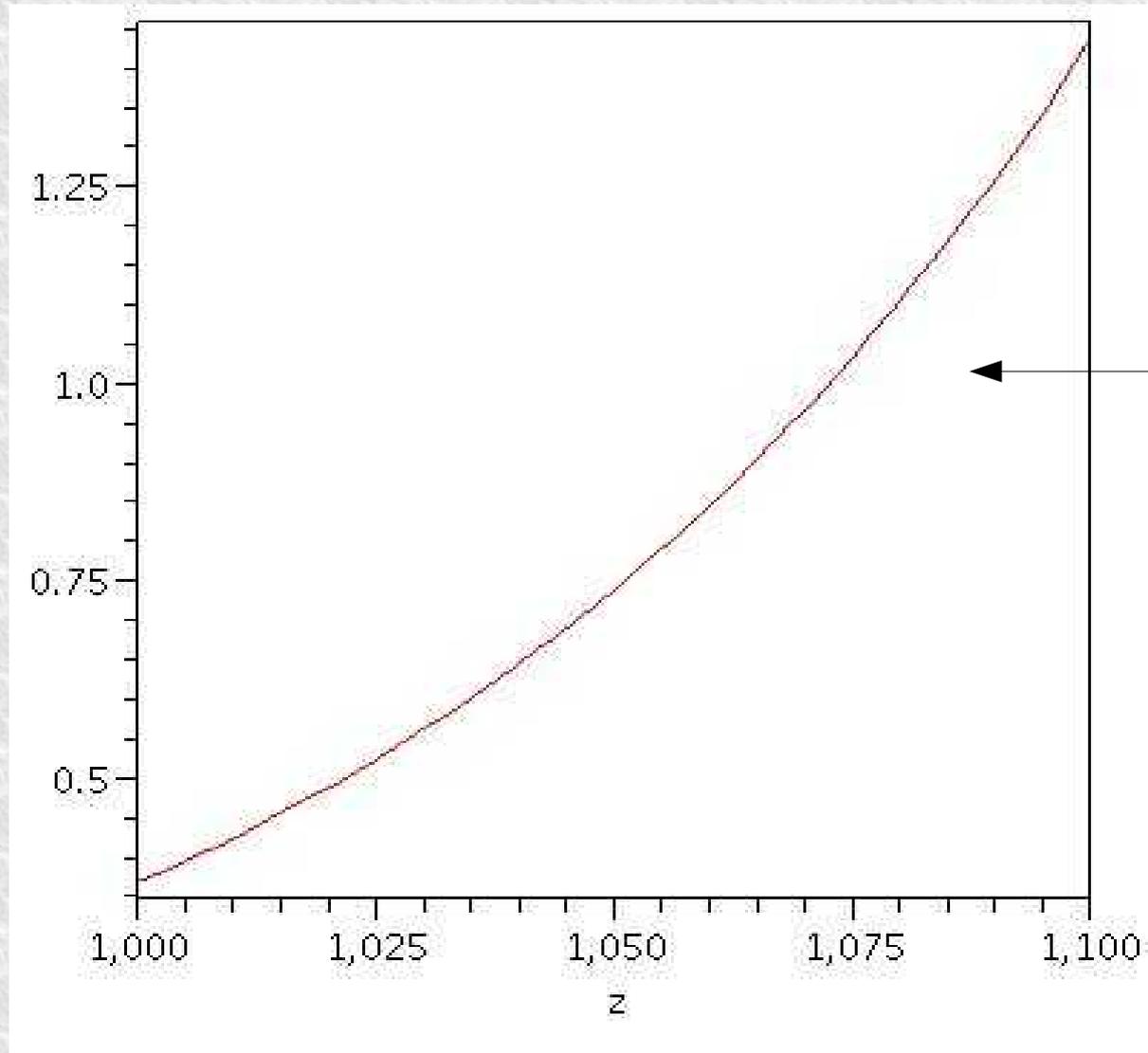
numericamente para  $800 < z < 1200$ :

$$x(z) = 1.7 \cdot 10^{-3} \frac{\sqrt{\Omega_m}}{\Omega_{barion}} \cdot \left( \frac{z}{1000} \right)^{12.75}$$



profundidad optica para los fotones (scattering Thompsen):

$$\tau(z) = 0.37 \left( \frac{z}{1000} \right)^{14.25}$$

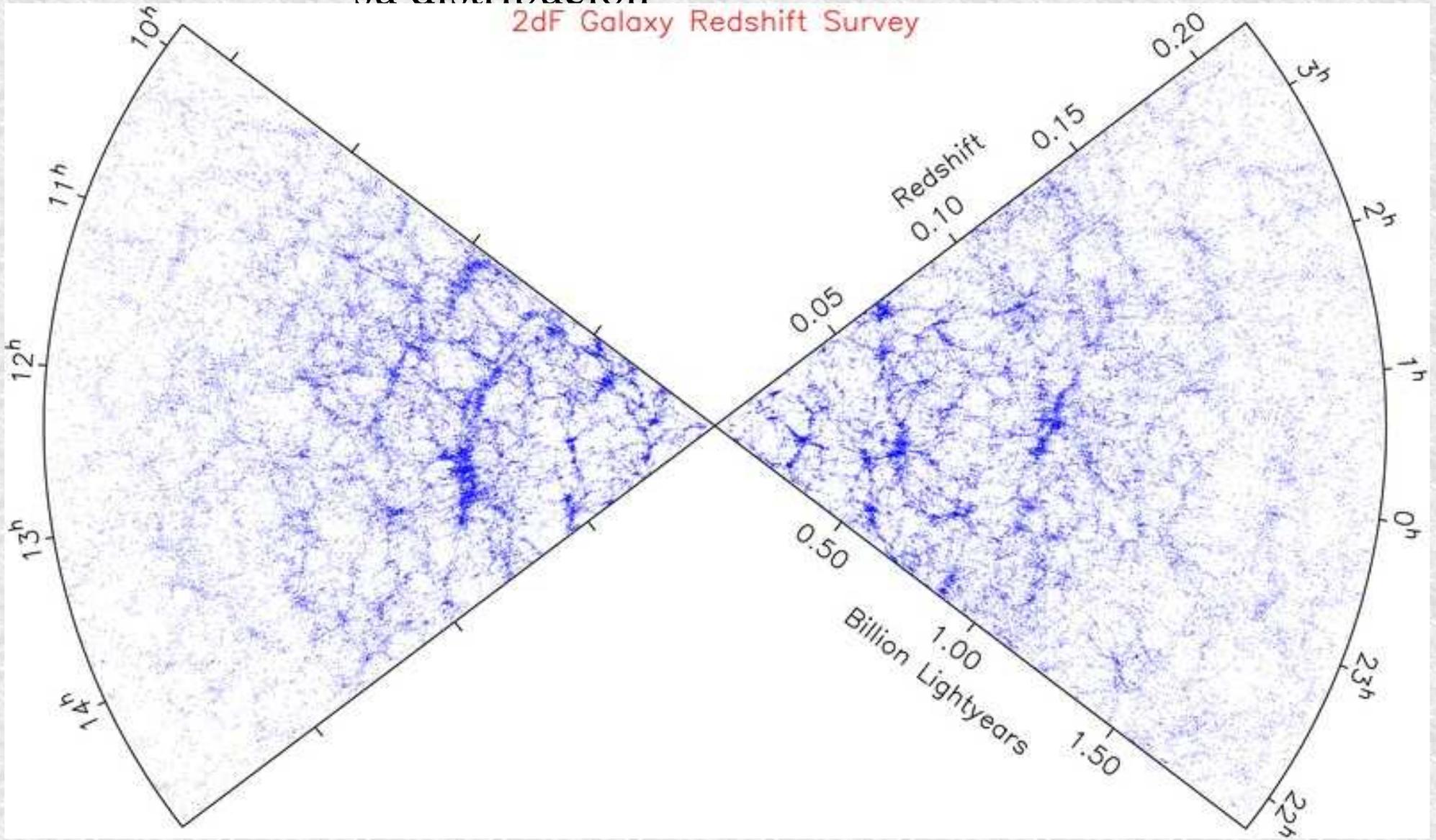


radiacion del fondo

## 8.2 Inhomogeneidades en el Universo

inhomogeneidades: estrellas, galaxias, cumulos de galaxias

pero en escalas grandes: solo cumulos de galaxias y su distribucion



contraste de densidad:

$$\delta(r, t) = \frac{\rho(r, t) - \bar{\rho}(r, t)}{\bar{\rho}(r, t)}$$

donde la densidad es la densidad total (materia luminosa + materia oscura)

por ejemplo: para un cumulo de galaxias  $\delta \approx 200$

tarea: comportamiento de  $\delta$  en un Universo en expansion

cualitativamente:

consideramos una region con densidad mayor

- > expansion esta decelerado dentro esta region
- > densidad declina mas lento que en promedio
- > mas deceleracion --> .... inestabilidad gravitatoria

Conclusion:  $\delta$  aumenta con el tiempo!

cuantitativamente ---> teoria lineal de perturbaciones

imaginacion: materia comporta como un fluido

primer paso: ecuaciones

ecuacion de continuidad 
$$\frac{\partial \rho(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0$$

ecuacion de Euler: 
$$\frac{\partial \mathbf{v}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = 0$$

ecuacion de Poisson: 
$$\nabla^2 \Phi = 4 \pi G \rho$$

segundo paso: transformacion en coordenadas comoviles:

$$\mathbf{r} = R(t) \mathbf{x}$$

tercer paso: linearisacion --> despreciar terminos cuadraticos

solucion:  $\delta(\mathbf{x}, t) = D(t) \delta_0(\mathbf{x})$  para  $\delta(\mathbf{x}, t) < 1$

siendo D el "factor de crecimiento"

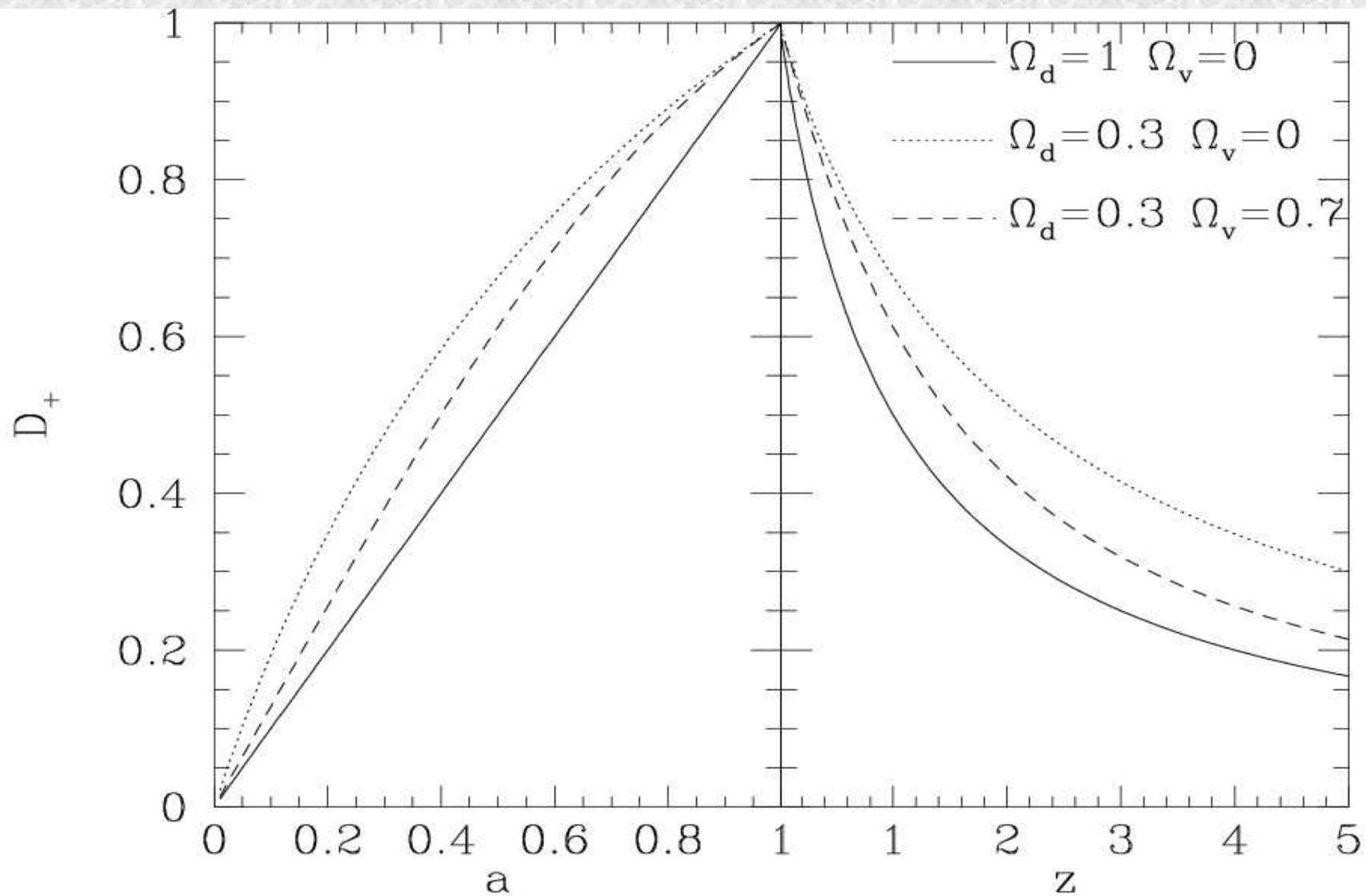
$$D(R) \sim \frac{H(t)}{H_0(t)} \int_0^R \frac{dR'}{\left[ \Omega_m / R'^3 + \Omega_\Lambda / R'^2 - (\Omega_m - \Omega_\Lambda - 1) \right]^{3/2}}$$

cte de proporcionalidad de la normalisacion  $D_0(1) = 1$

por ejemplo: para un Universo Einstein-de Sitter  $\Omega_m = 1$ ,  $\Omega_\Lambda = 0$

$$D(t) = R(t)$$

factor de crecimiento para tres modelos comologicos:  
en Universos de baja densidad contrastes crecen mas rapidos



cuando los contrastes  $\delta > 1$  --> crecimiento non-lineal  
-- > solo modelos numericos

pero como aproximacion:

$z = 1000$  ---> esperamos  $\delta > 0.001$  para asegurar el crecimiento  
hasta hoy a valores como  $\delta > 1$

## 8.3 Procesos físicos que producen fluctuaciones en la temperatura del CMB

### el efecto Sachs-Wolfe

Universo inhomogenio ---> regiones de alta densidad +  
regiones de baja densidad

fotones entran regiones de alta densidad --> ganan energia  
cuando salen --> pierden energia  
efecto neto = cero

pero con expansion: contraste de la densidad aumenta durante  
la viaje del foton a traves la region

efecto neto: ---> foton pierde energia

## **efecto Doppler**

fluctuaciones de densidad siempre causan velocidad peculiares

---> fotones con el origen en regiones de alta densidad pueden ser corridos al azul o al rojo

## **amortiguacion de Silk**

fotones tienen un camino libre ---> en escalas pequeñas bariones y fotones son decoplados ---> reduccion de fluctuaciones escalas pequeñas

**efectos secundarios, que declinan las fluctuaciones de temperatura**

### **scattering de Thompson**

fotones interactúan con electrones libres después de la reionización

---> pierden información sobre sus trayectorias originales

---> una componente isotrópica del CMB

### **efecto Sachs-Wolfe integrado**

fotones viajan con  $z < 10$  a través de regiones de densidad más alta

---> expansión --> cambio de frecuencia

### **efecto Sunyaev-Zeldovich**

fotones interactúan con electrones energéticos de gas caliente en

cúmulos de galaxias ---> cambio de la frecuencia

## 8.4 Analisis de las fluctuaciones de la temperatura

encontrar una manera de describir la distribution de las fluctuaciones segun sus tamaños y sus amplitudes

