

A deep space photograph showing a dense field of galaxies in various colors (yellow, orange, blue, white) against a dark background. A bright star with a four-pointed diffraction pattern is visible in the lower-left quadrant. The text "20. O lado escuro do universo" is overlaid in yellow.

## 20. O lado escuro do universo



# O paradigma cosmológico

WMAP (Hinshaw et al. 2008)

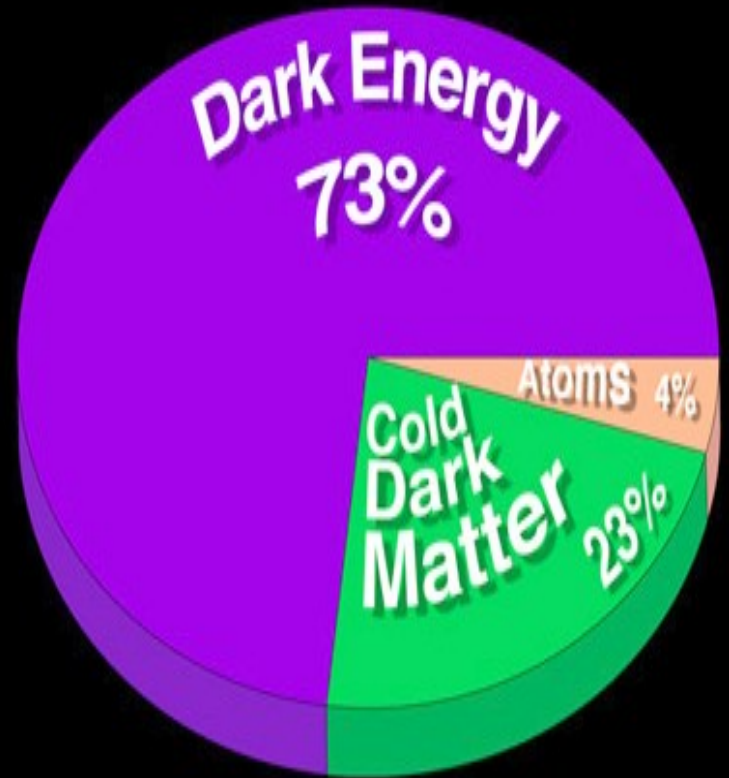
Para um universo de curvatura nula:

Energia escura: 0.72

Matéria escura: 0.23

Matéria bariônica: 0.046

(em unidades da densidade crítica)





# Evidências da ME: aglomerados de galáxias

- **Massas de aglomerados de galáxias em equilíbrio**

Teorema do Virial:

$$T = |U|/2$$

$$M \approx \langle v^2 \rangle r/G$$

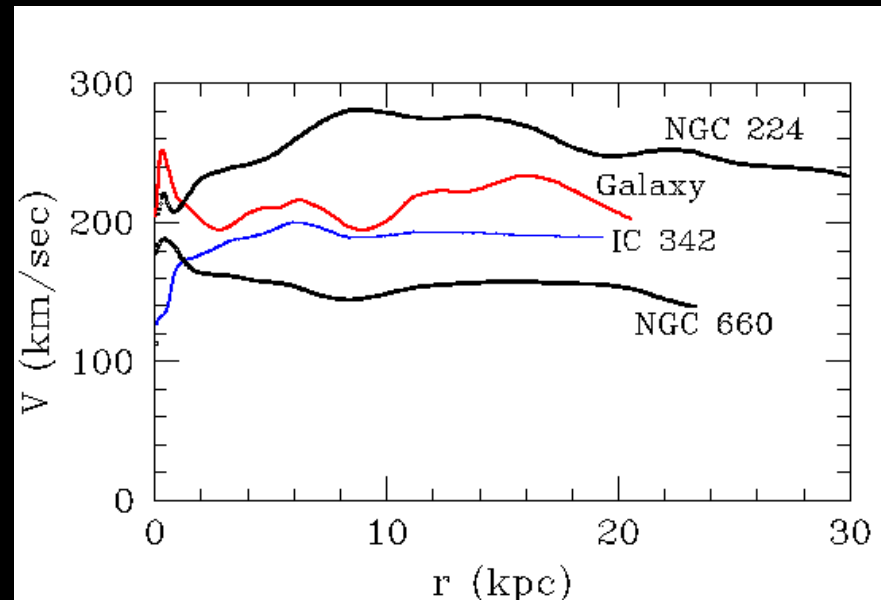
**Zwicky (1933):** *há muito mais massa nos aglomerados que aquela que podemos atribuir à matéria conhecida*



# Evidências da ME

## rotação das galáxias espirais

- **Vera Rubin (~1970):** Curvas de rotação de galáxias espirais:  
 $V(r) = [GM(r)/r]^{1/2}$
- se  $V \approx \text{cte}$ ,  $M(r) \propto r$
- **Freeman (1970):** *evidência de um halo escuro, esferoidal*



# Evidências da ME:

## emissão de raios-X em aglomerados de galáxias

- aglomerados possuem muito gás  
 $T \sim 10^7 - 10^8 \text{ K}$   
 $n \sim 10^{-4} - 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$   
 $L_X \sim 10^9 - 10^{11} L_{\text{sun}}$
- emissão de raios-X  
bremsstrahlung térmico
- Supondo que o gás está em equilíbrio,

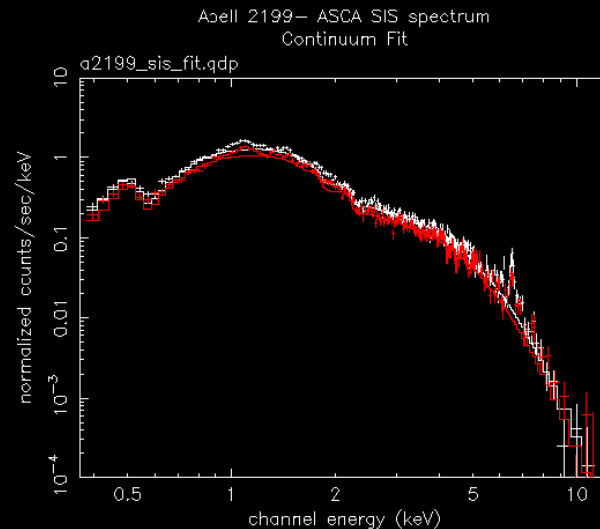
$$M \sim 2kTr / (G\mu m_p)$$

$$M_{\text{gas}} \sim 0.1 M$$

(a maior parte dos barions está na forma de gás quente!)



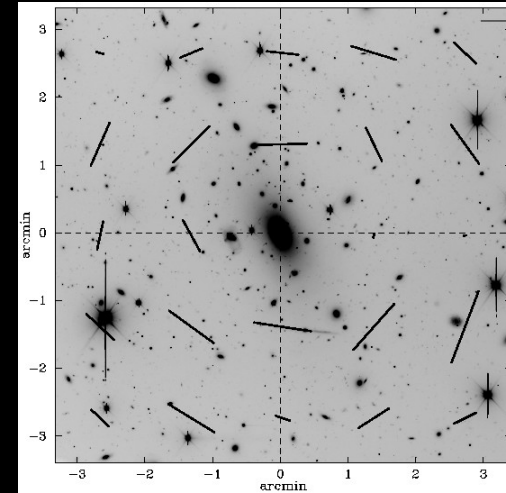
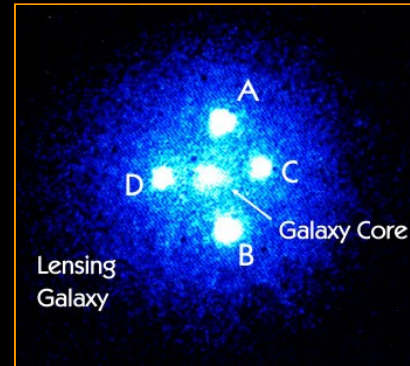
RDCS 1252.9-2927



# Evidências da ME: lentes gravitacionais

## lentes fortes e lentes fracas

$$\theta_E = [(4GM/c^2) d_{LS} / (d_S d_L)]^{1/2}$$



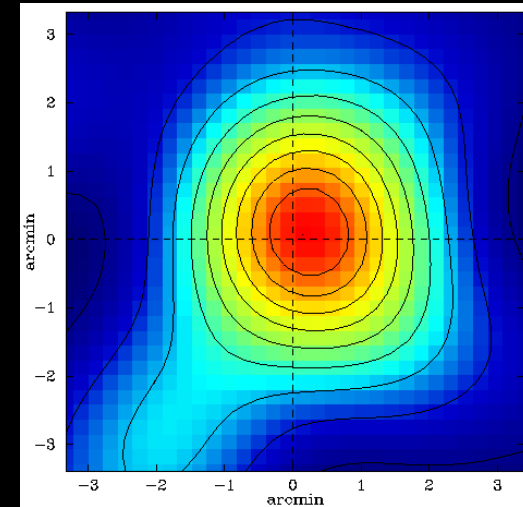
Gravitational Lens HST · WFPC2

Galaxy Cluster 0024+1654

PRC96-10 · ST ScI OPO · April 24, 1996

W.N. Colley (Princeton University), E. Turner (Princeton University),

J.A. Tyson (AT&T Bell Labs) and NASA





# Aglomerado de Coma

## ( $r < 1.5 h^{-1} \text{Mpc}$ )

Análise de Bahcall (1999):

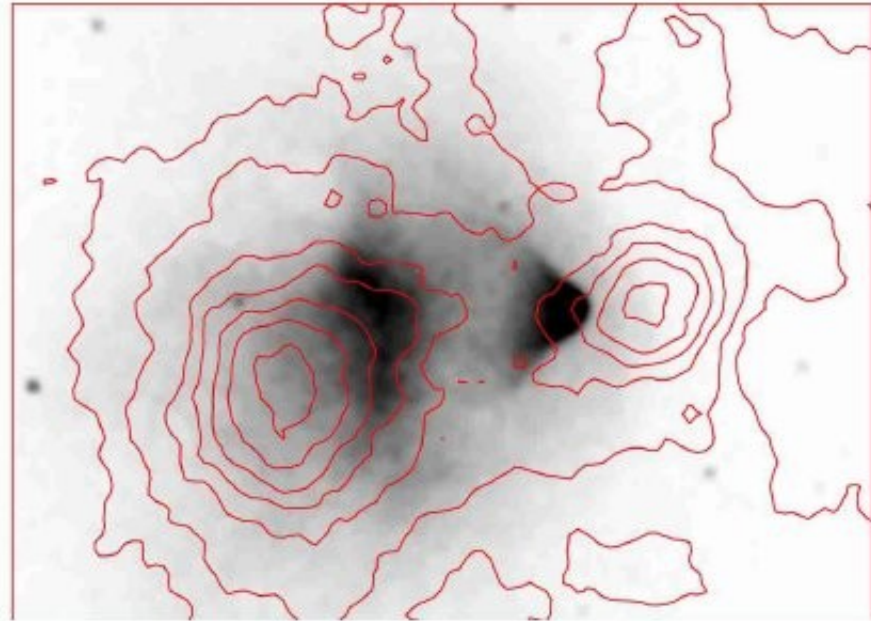
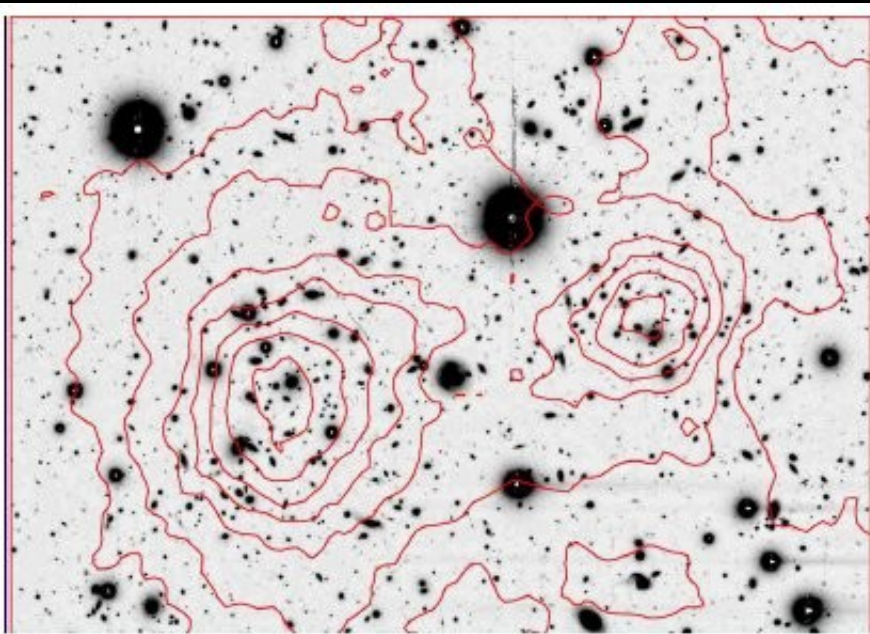
- $M_* = 1.0 \times 10^{13} h^{-1} M_{\text{sun}}$
- $M_{\text{gas}} = 5.5 \times 10^{13} h^{-1} M_{\text{sun}}$
- $M_T = 6.8 \times 10^{14} h^{-1} M_{\text{sun}}$

*A massa total é ~ 10 vezes a  
massa em estrelas e gás*

***MATÉRIA ESCURA***



# Evidências da ME: *o aglomerado bala*



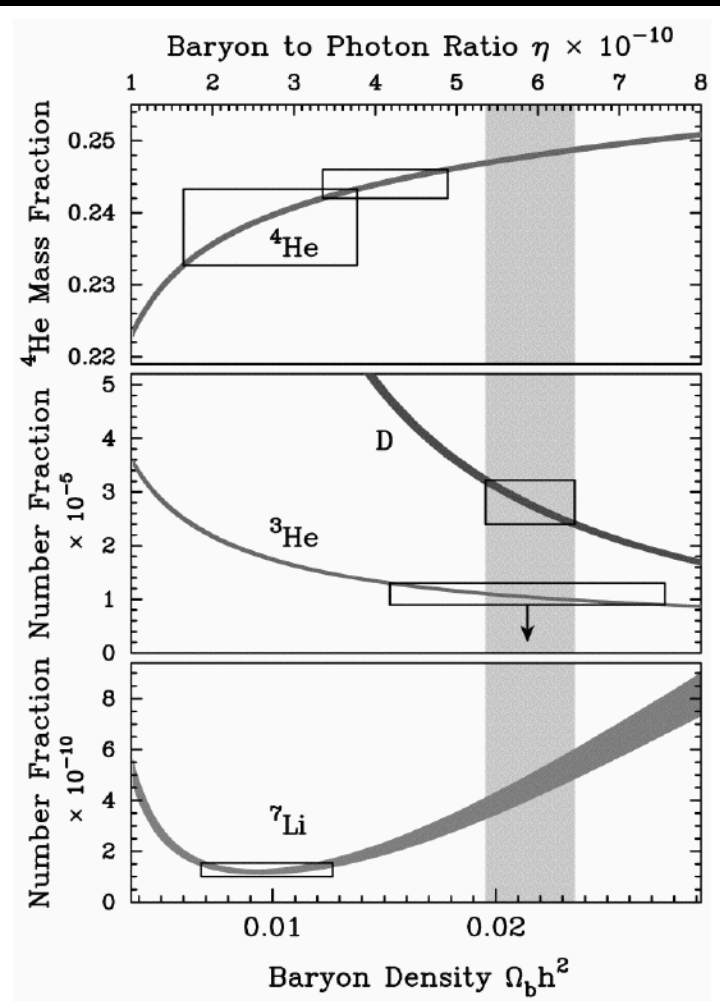


# A ME é bariônica?

- *A maior parte da ME não deve ser bariônica!*
  - nucleosíntese primordial
  - flutuações na radiação cósmica de fundo
  - formação de galáxias

# barions x não-barions

- análise da abundância dos elementos leves:



$$\Omega_b h^2 \approx 0.022$$

para  $h=0.72$  (HSTKP),

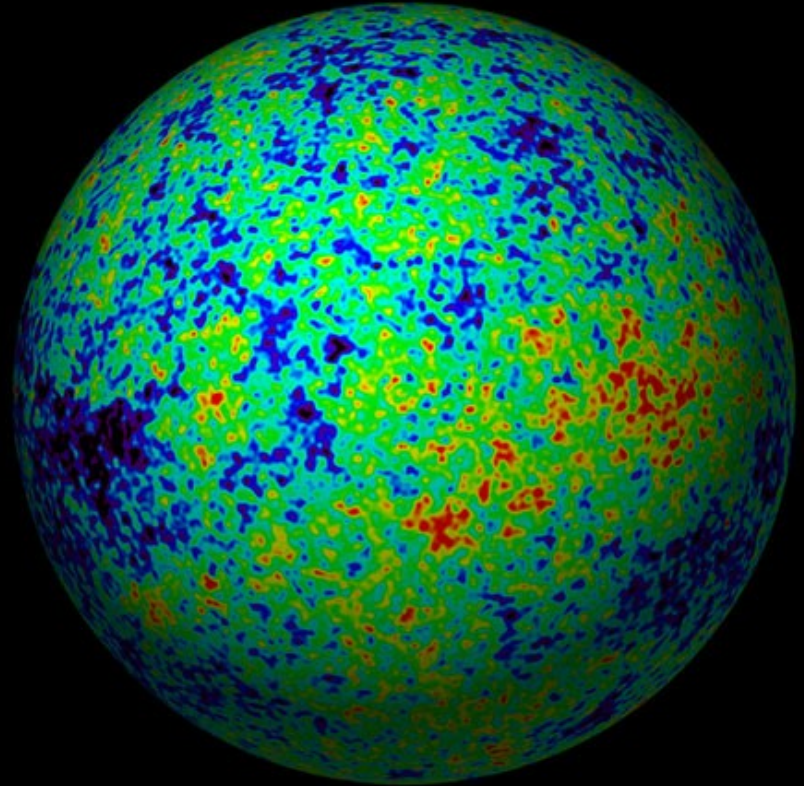
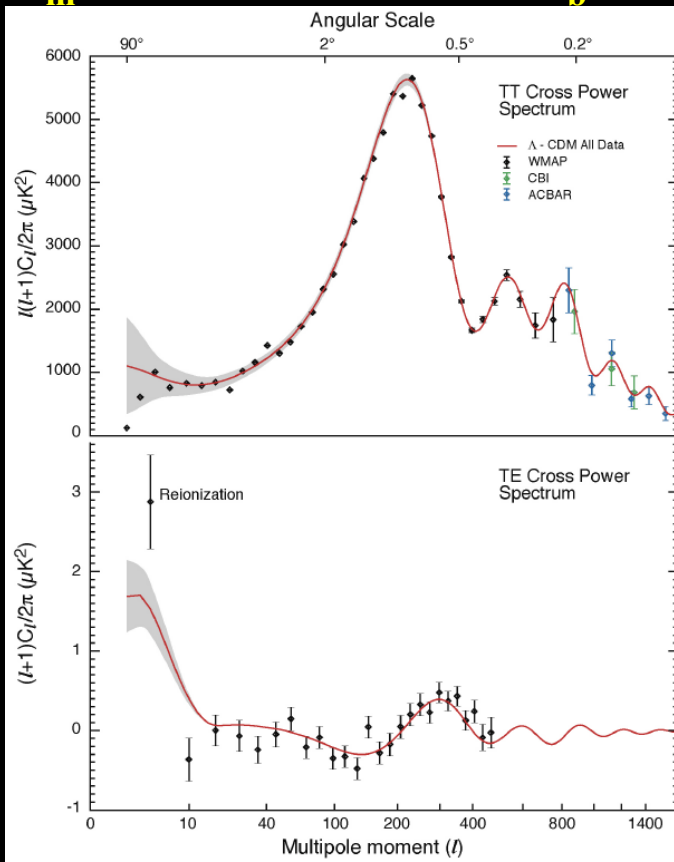
$$\Omega_b = 0.042$$

# barions x não-barions

flutuações da temperatura da radiação cósmica de fundo  
(WMAP, 2003):  
posição dos picos depende de  $\Omega_b$

$$\Omega_m = 0.24 \pm 0.02$$

$$\Omega_b = 0.042 \pm 0.003$$



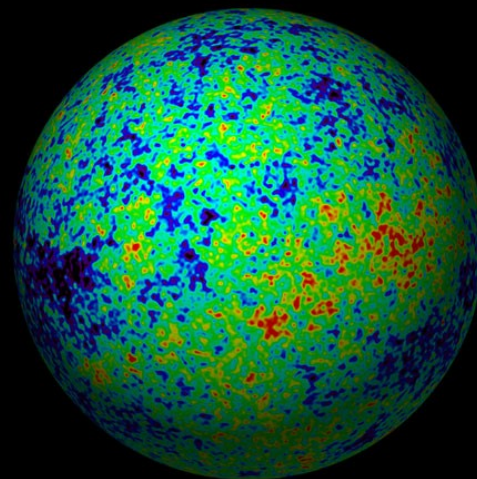


# barions x não-barions

## formação de galáxias:

idéia básica: logo após o Big-Bang o universo era bastante homogêneo, com pequenas irregularidades;

estas irregularidades crescem sob a ação da gravidade, vindo a formar galáxias, estrelas e outros corpos celestes



$$(\Delta\rho/\rho)_{\text{hoje}} \approx (\Delta\rho/\rho)_{\text{rec}} (1+z_{\text{rec}})$$

$\approx 10^{-5}$

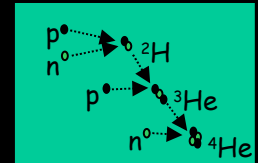
$10^{-2}!!$

1000

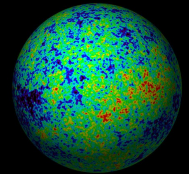
problema: num universo puramente bariônico não dá tempo de formar galáxias!!

# barions x não-barions

- nucleosíntese primordial:  $\Omega_b = 0.042$



- flutuações da RCF:  $\Omega_b = 0.042$



(Medidas completamente independentes!)

- quantidade de matéria:  $\Omega_m = 0.24 \pm 0.02$



**A maior parte da matéria escura é  
não -bariônica!**

# A natureza da Matéria Escura:

a história das anomalias nos movimentos planetários

Problemas com a lei da gravitação ou evidência de uma massa ainda desconhecida?

Le Verrier e Adams: conjecturaram que as anomalias observadas na órbita de Urano seriam devidas às perturbações de um outro planeta, Urano, descoberto em 1846

A tentativa de se explicar as anomalias no movimento de Mercúrio com um novo planeta, Vulcano, não funcionou; a solução exigiu uma nova teoria da gravitação: a relatividade geral



# A natureza da Matéria Escura:

a história das anomalias nos movimentos planetários

Problemas com a lei da gravitação ou evidência de uma massa ainda desconhecida?

Le Verrier e Adams: conjecturaram que as anomalias observadas na órbita de Urano seriam devidas às perturbações de um outro planeta, Urano, descoberto em 1846 → ME como partícula

A tentativa de se explicar as anomalias no movimento de Mercúrio com um novo planeta, Vulcano, não funcionou; a solução exigiu uma nova teoria da gravitação: a relatividade geral

→ ME como gravitação modificada

# Tipos de ME

- vou supor ME como partículas
- Melhores candidatos: relíquias do universo primordial:  
(no começo o universo é muito quente e denso)  
enquanto  $kT > 2 mc^2$ :  $\gamma + \gamma \leftrightarrow p + \text{anti-}p$   
(interconversão de partículas)
- “desacoplamento” do campo de radiação:  $kT \sim 2 mc^2$   
as que sobrevivem à aniquilação podem estar ainda hoje por aqui.

# Tipos de ME e formação de estruturas

- ME quente: são relativísticas quando se desacoplam (neutrinos massivos)

primeiras estruturas a se formar seriam muito grandes e as estruturas menores seriam formadas por fragmentação das maiores (teoria das panquecas)

- ME fria: são não-relativísticas quando se desacoplam (neutralino, axions...)

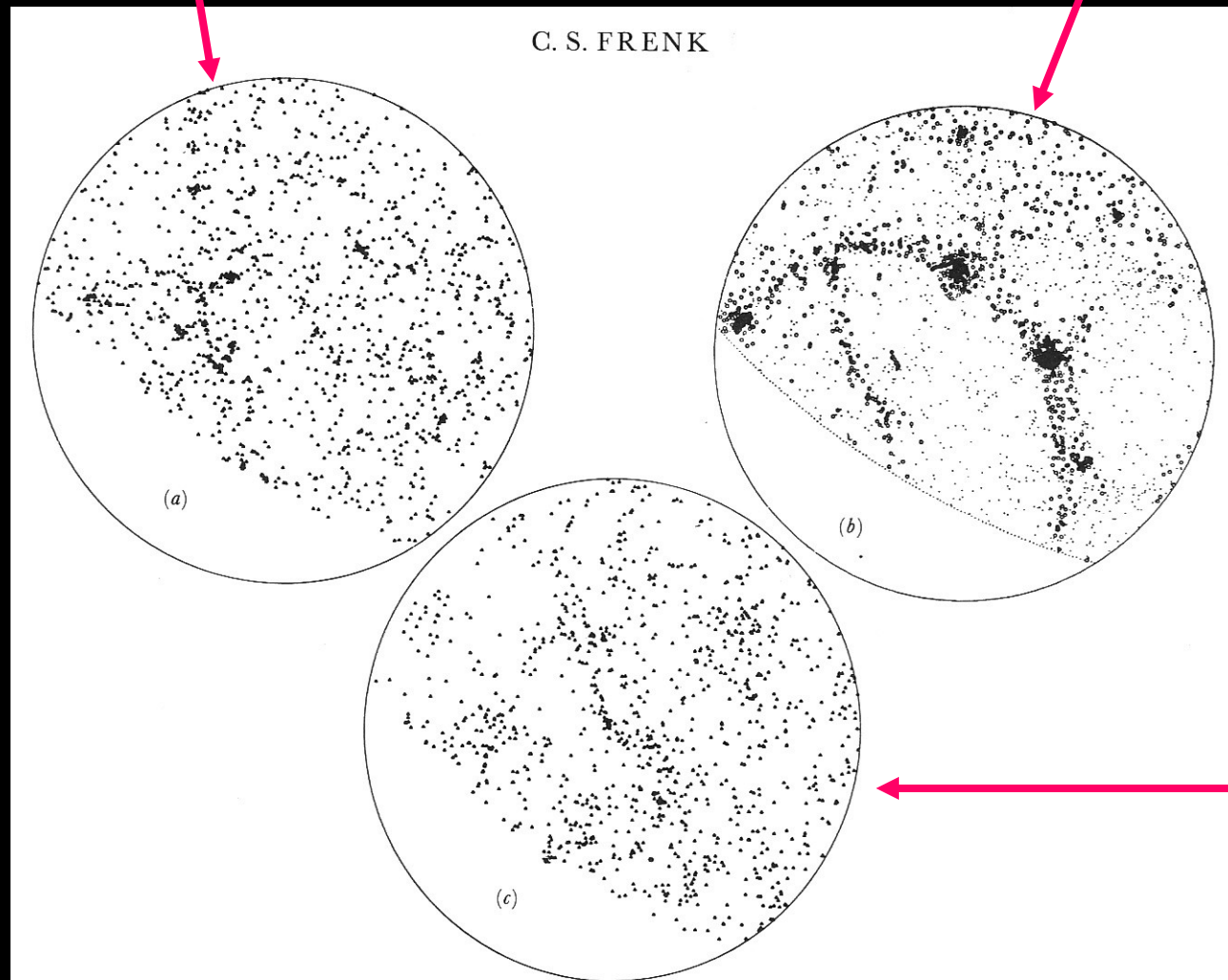
leva a um cenário hierárquico de formação de estruturas



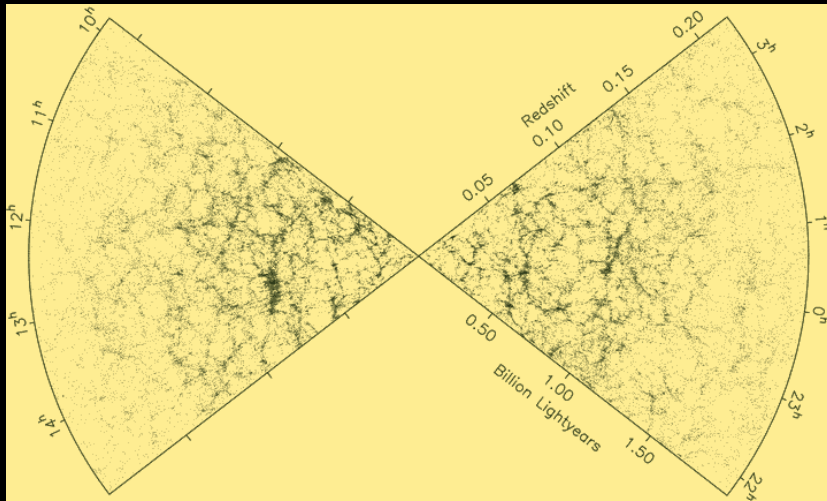
# simulações (Frenk, 1985)

universo aberto com CDM

universo de Einstein – de Sitter  
com matéria escura quente

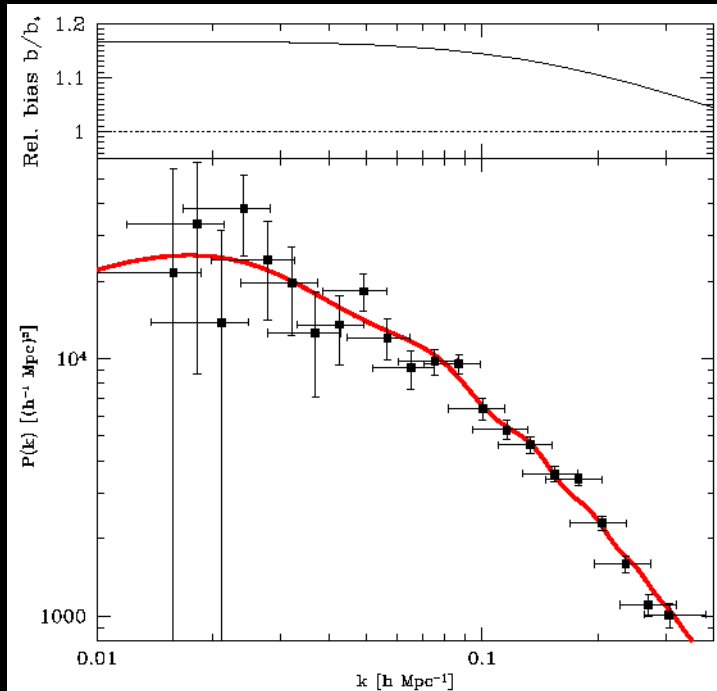


# E os neutrinos?



**Neutrinos: ME quente**

**O *free-streaming* dissipa  
pequenas estruturas**



**CMB+LSS:  
 $\Sigma m_\nu < 0.17 \text{ eV}$**

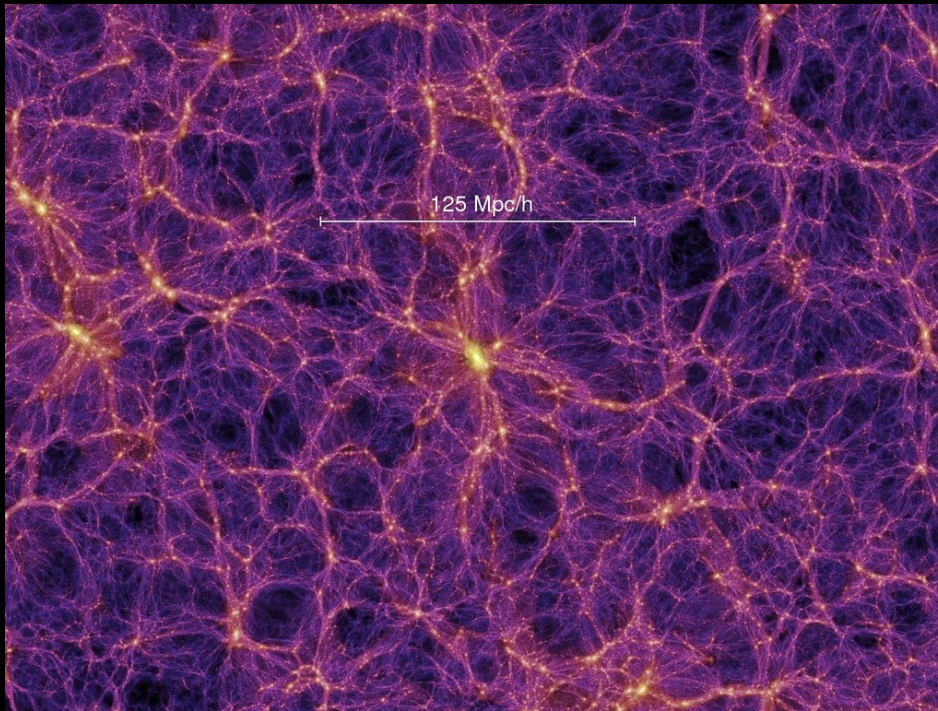
**(Seljak et al. 2006)**

**a astrofísica provê  
o vínculo mais  
forte sobre a massa  
dos neutrinos!**

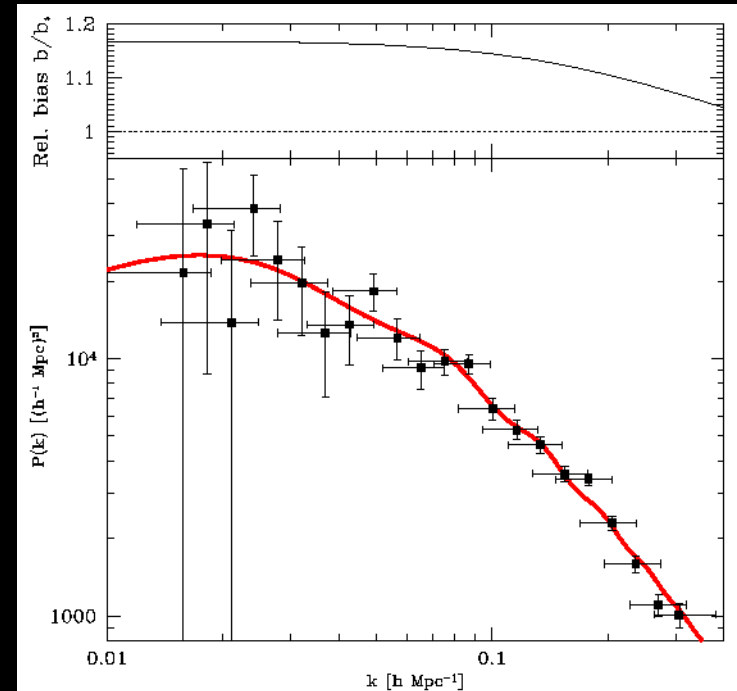
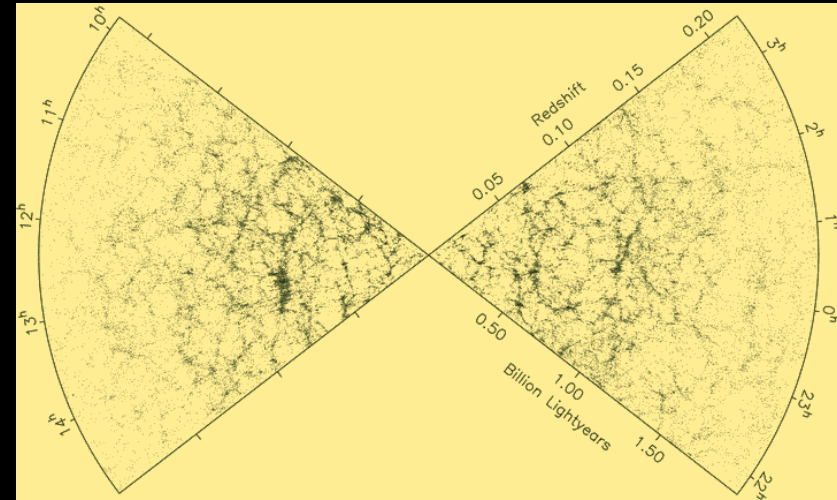
# Paradigma: matéria escura fria

(CDM)

- Explica muito bem a estrutura do universo em grandes escalas



**(Millennium Simulation, 2005)**

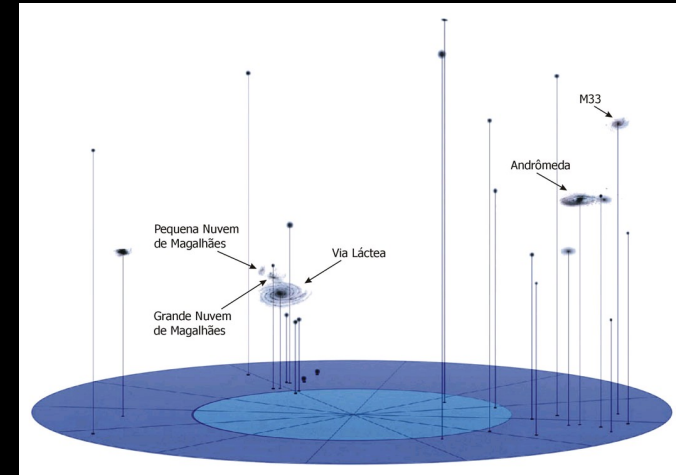
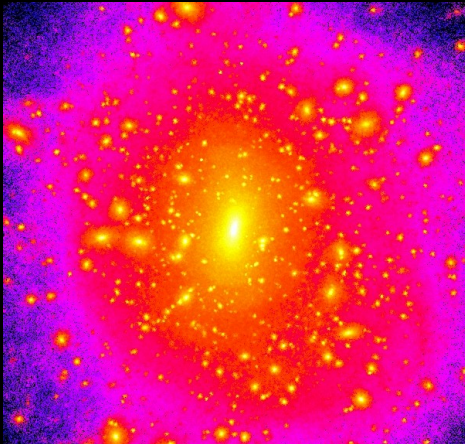


# ME Fria

- interação puramente gravitacional
  - “estável”: vida media longa,  $> 1/H_0$
  - candidatos:
    - neutralino:  $m \sim 100 \text{ GeV}$
    - axion:  $m \sim 10^{-6} \text{ eV}$
    - ...
- (isso dá uma dimensão de nossa ignorância)

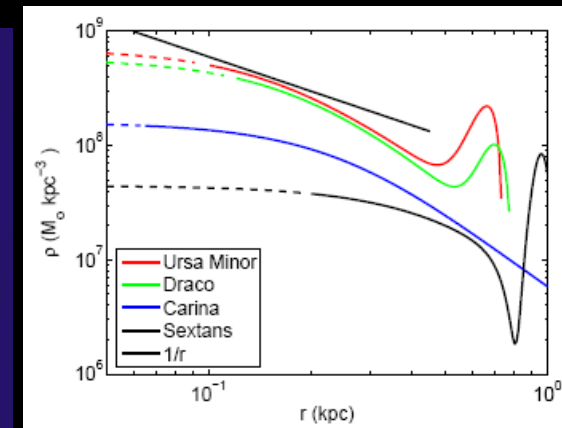
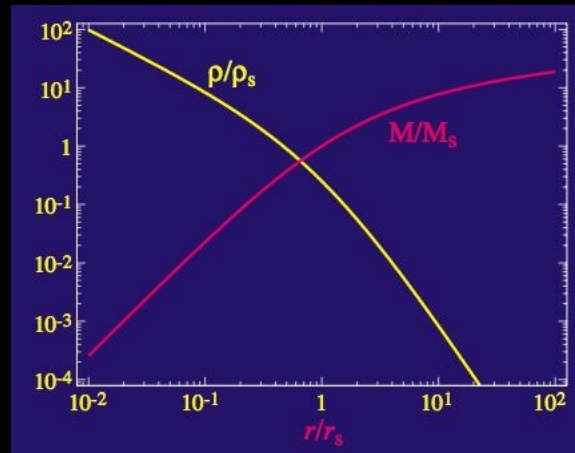
# Porém, há problemas com a CDM convencional!

- Problemas com as simulações:
  - excesso de satélites



- perfis de matéria excessivamente “pontudos” :

$$\rho = \rho_0 (r/r_c)^{-1} (1+r/r_c)^{-2}$$





# Alternativas a CDM

- MOND: Modified Newtonian Dynamics  
Milgrom (1983)
- Branas (teoria das cordas)
- Propriedades adicionais da ME
- Física dos bárions?

# Alternativas a CDM: MOND (Milgrom 1983)

- Modificação da gravitação newtoniana:

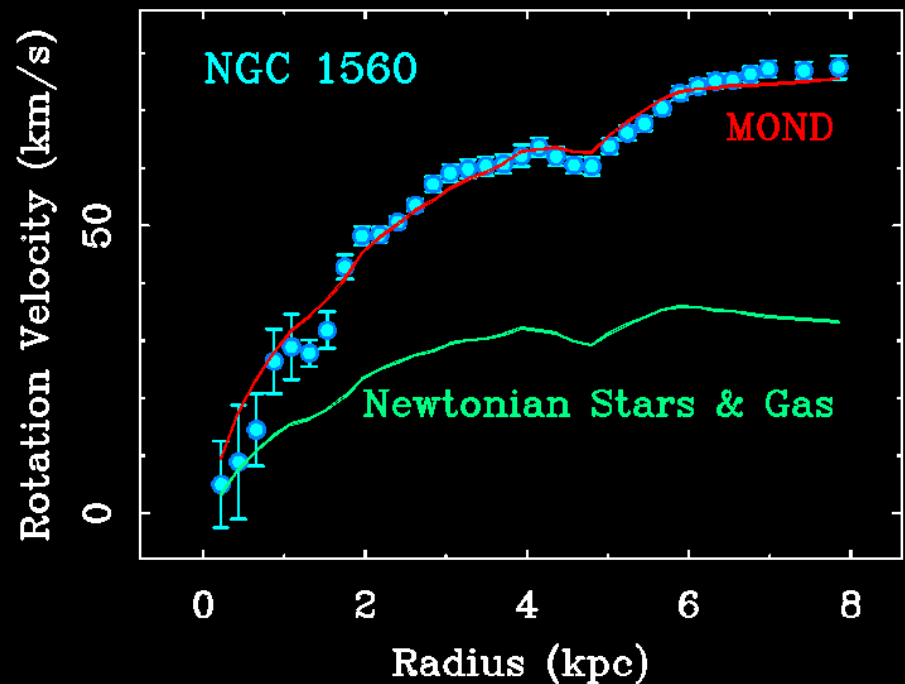
- $g = V^2/r = GM/(r^2\mu(g/a_0))$

- $\mu(g/a_0)=1$  se  $g \gg a_0$

- $\mu(g/a_0)=g/a_0$  se  $g \ll a_0$

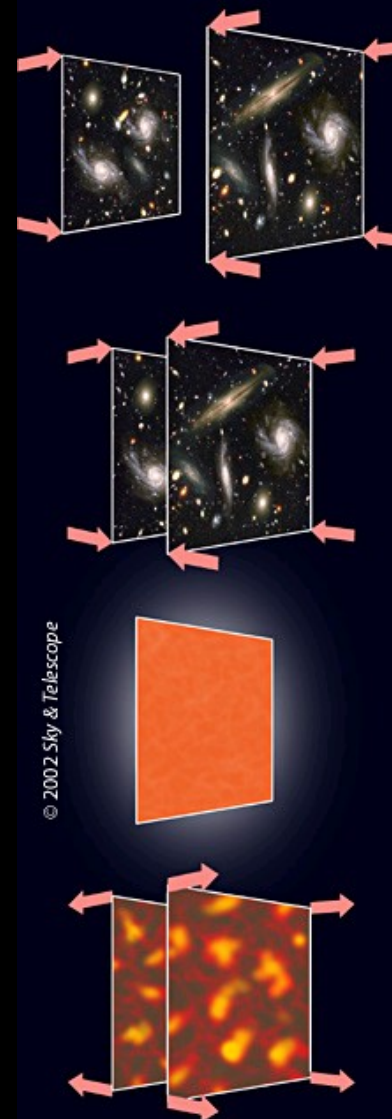
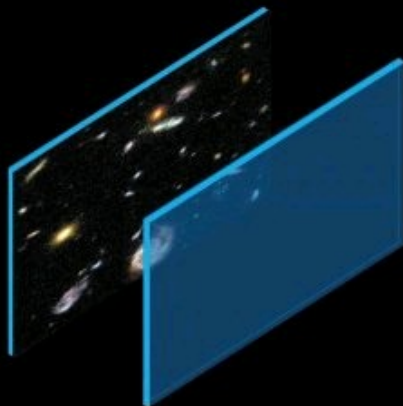
- $V_\infty = (G M a_0)^{1/4}$

- $a_0 \approx 1.2 \times 10^{-8} \text{ cm/s}^2$



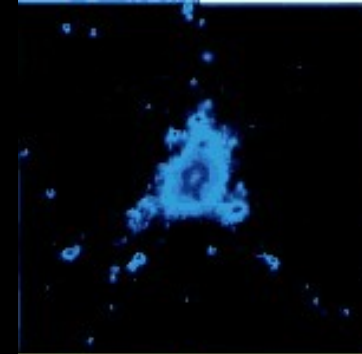
# Alternativas a CDM: Branas

- Branas: teoria de cordas
- Modelos com dimensões extras
- A matéria ocupa 4-dimensões
- A gravidade se propaga também nas outras dimensões (o “bulk”)
- ME: interação entre branas



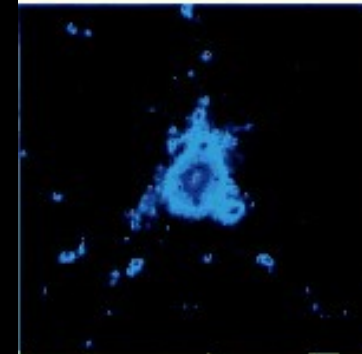
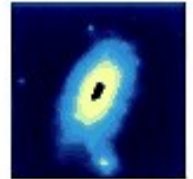
# Alternativas a CDM: “temperando” a CDM

- pode ser que a ME interaja entre si ou com a matéria bariônica de outras formas
- Diferentes tipos de ME levam a diferentes previsões em diferentes escalas
- Exemplo: ME auto-interagente (Yoshida et al. 2000)
  - colisões tipo bola de bilhar
  - problema: a seção de choque necessária para resolver o problema dos perfis produz halos muito arredondados



S1

1 : 0.82 : 0.65

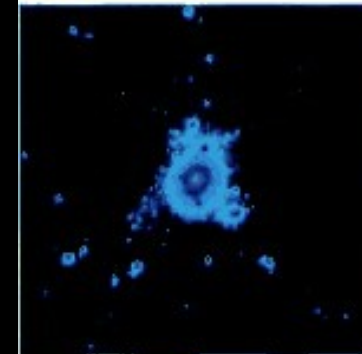
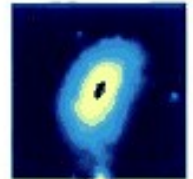


S1Wa

$\sigma^* = 0.1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

$r_c = 40 h^{-1} \text{ kpc}$

1 : 0.88 : 0.66

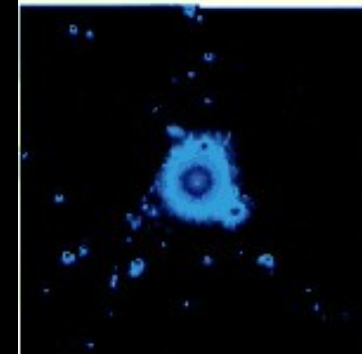
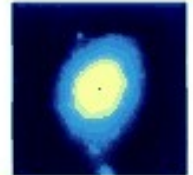


S1Wb

$\sigma^* = 1.0 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

$r_c = 100 h^{-1} \text{ kpc}$

1 : 0.91 : 0.72



S1Wc

$\sigma^* = 10.0 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

$r_c = 160 h^{-1} \text{ kpc}$

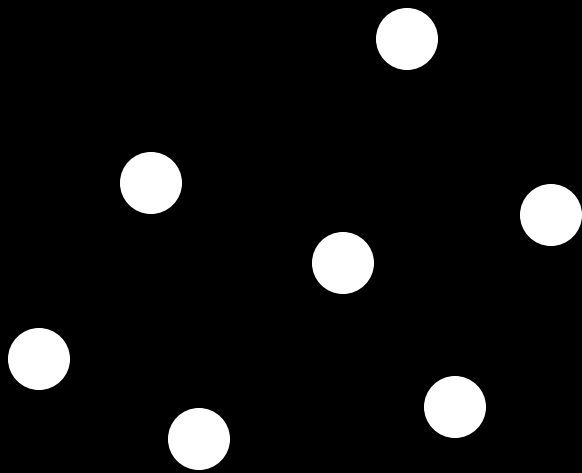
1 : 0.98 : 0.89



# Exemplo: ME auto-interagente

## Simulações de N-corpos por Monte Carlo

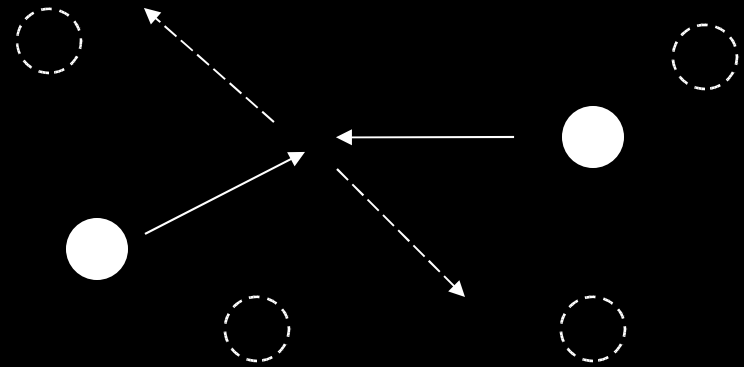
simulação CDM



Interação mútua  
devido  
apenas à gravidade

simulação SIDM

(modelo de bolas de bilhar)



$$P = \rho \sigma V dt$$

gravidade

+

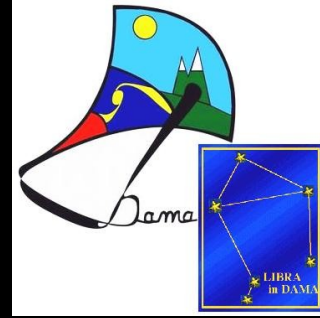
Pares próximos podem ser  
espalhados com probabilidade  
 $P$



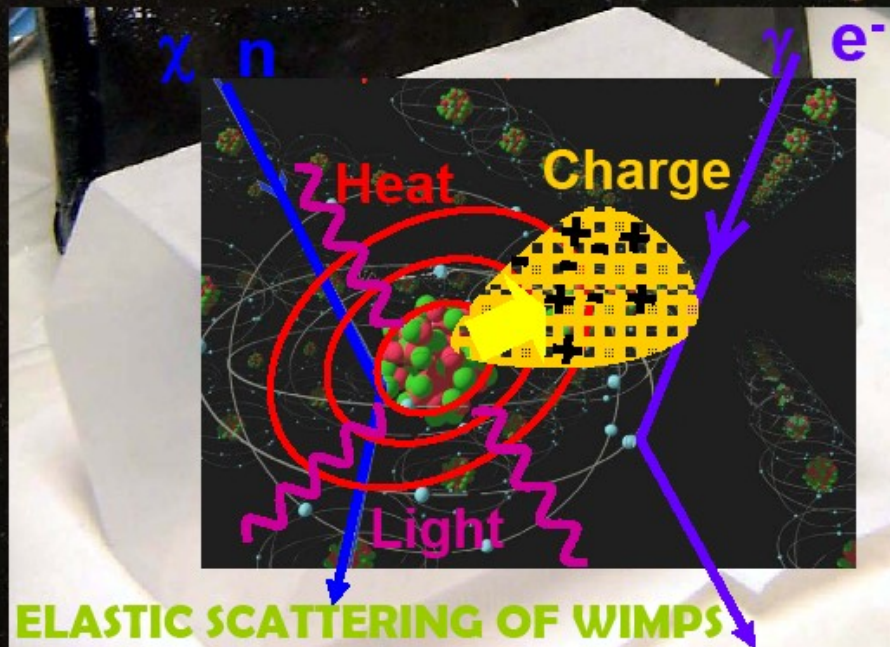


# A ME já foi detectada?

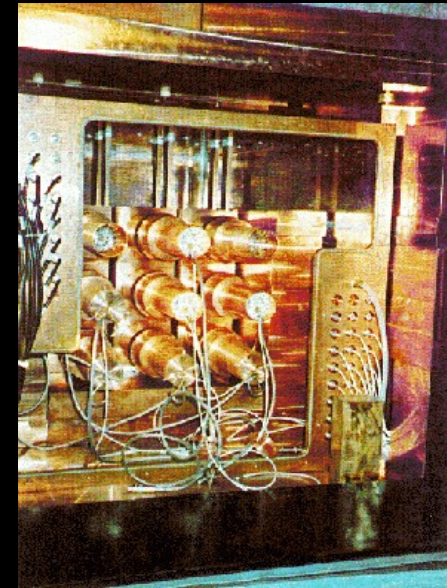
## Experimento DAMA/LIBRA



### Direct Detection of WIMPs



ELASTIC SCATTERING OF WIMPS  
Producing a nuclear recoil





# A ME já foi detectada?

## Experimento DAMA/LIBRA



### Annual modulation in the dark matter signal

$\alpha = 60^\circ$

$v = 220 \text{ km/s}$

Sistema Solar

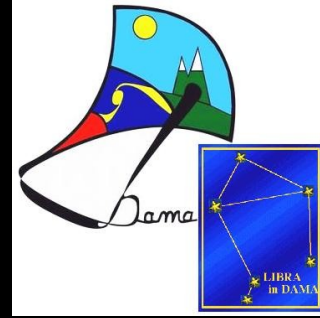
$v_{\text{orbital}} = 30 \text{ km/s}$

Earth motion around the Sun  
makes change relative velocity  
WIMP-nucleus and  
correspondingly the DM  
interaction rate

**SIGNATURE**

# A ME já foi detectada?

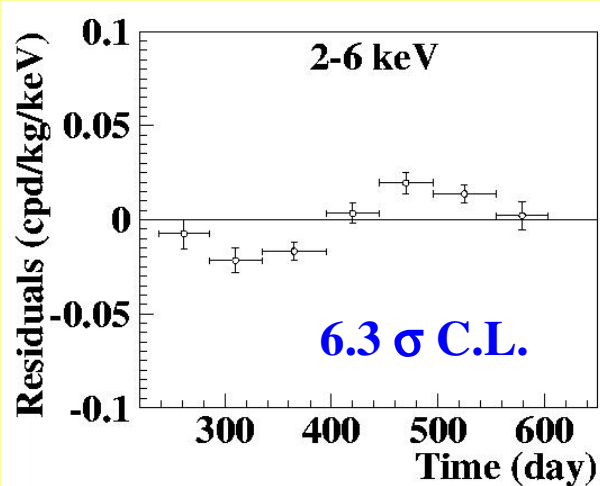
## Experimento DAMA/LIBRA



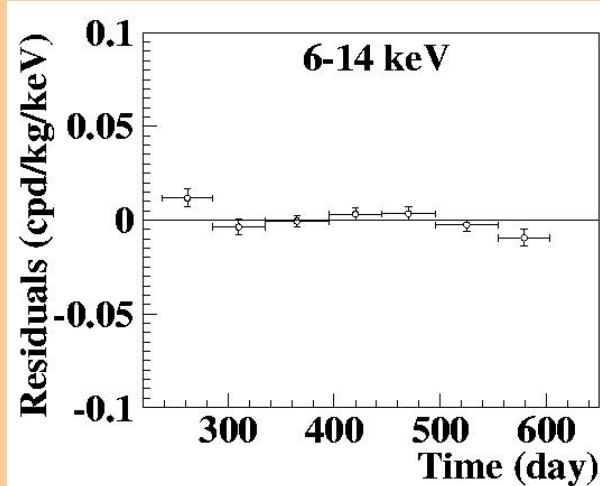
### Model-independent single-hit residual rate in a single annual cycle

• Initial time 7th August

7 annual cycles: Total Exposure: 107731 kg · d



for  $t_0 = 152.5$  d and  $T = 1.00$  y:  
 $A = (0.0195 \pm 0.0031)$  cpd/kg/keV



for  $t_0 = 152.5$  d and  $T = 1.00$  y:  
 $A = -(0.0009 \pm 0.0019)$  cpd/kg/keV

A clear modulation is present in the lowest-energy region,  
while it is absent just above

# as supernovas e a energia escura

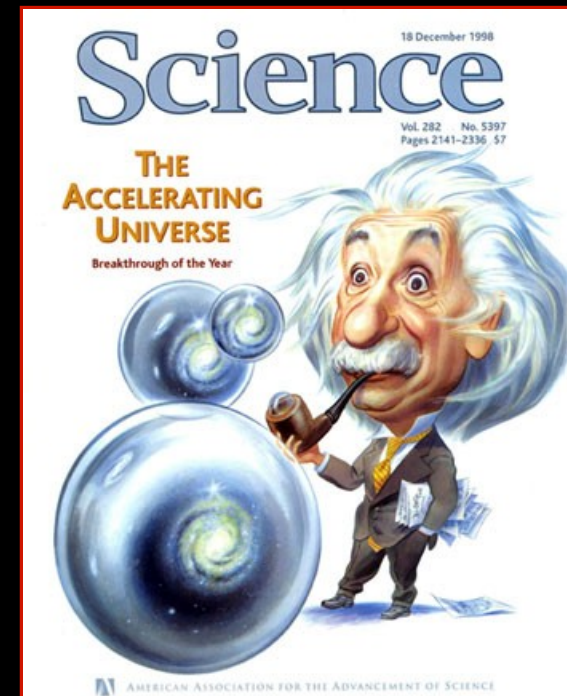
1998: observações de supernovas Ia indicam que o universo está se acelerando!

melhor ajuste para o módulo de distância em função do redshift:  
universo com constante cosmológica

$$\Omega_m = 0.29 \quad \Omega_\lambda = 0.71$$

mas pode ser que a constante cosmológica não seja constante:

*energia escura*





# as supernovas e a energia escura

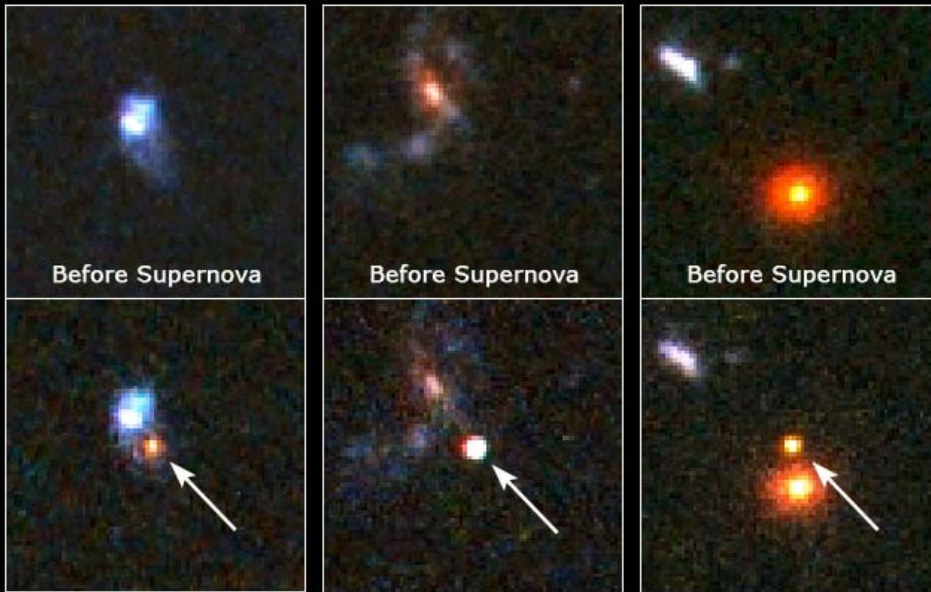
SN Ia são excelentes indicadores de distância

precisão:  $\sigma_{\text{mag}} = 0.15 \text{ mag}$  ou

$$\delta dL/dL \sim 7\%$$

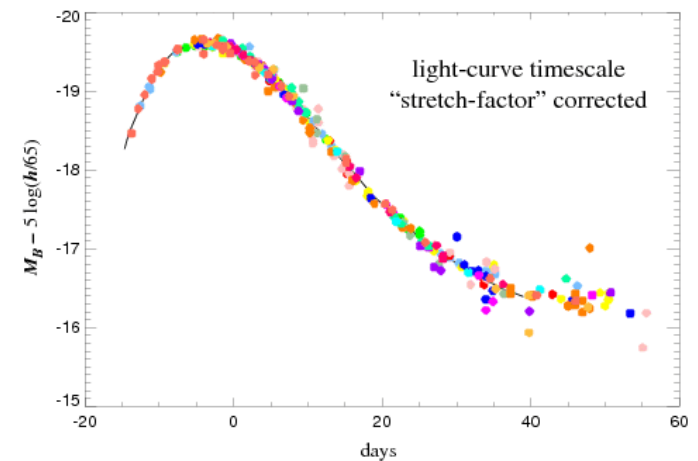
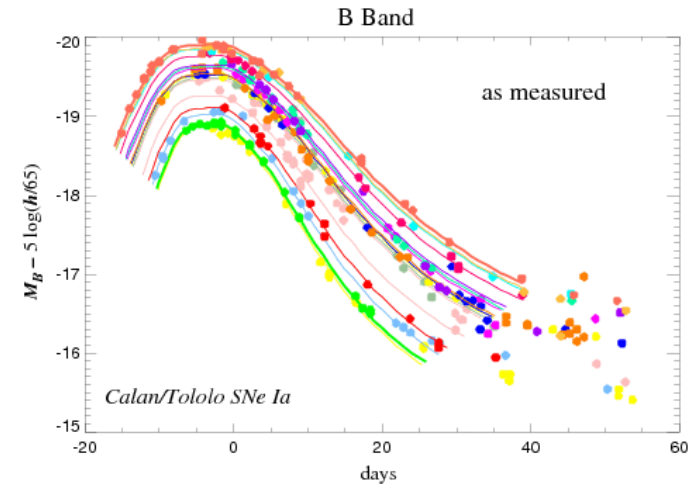
Distant Supernovae

Hubble Space Telescope - ACS



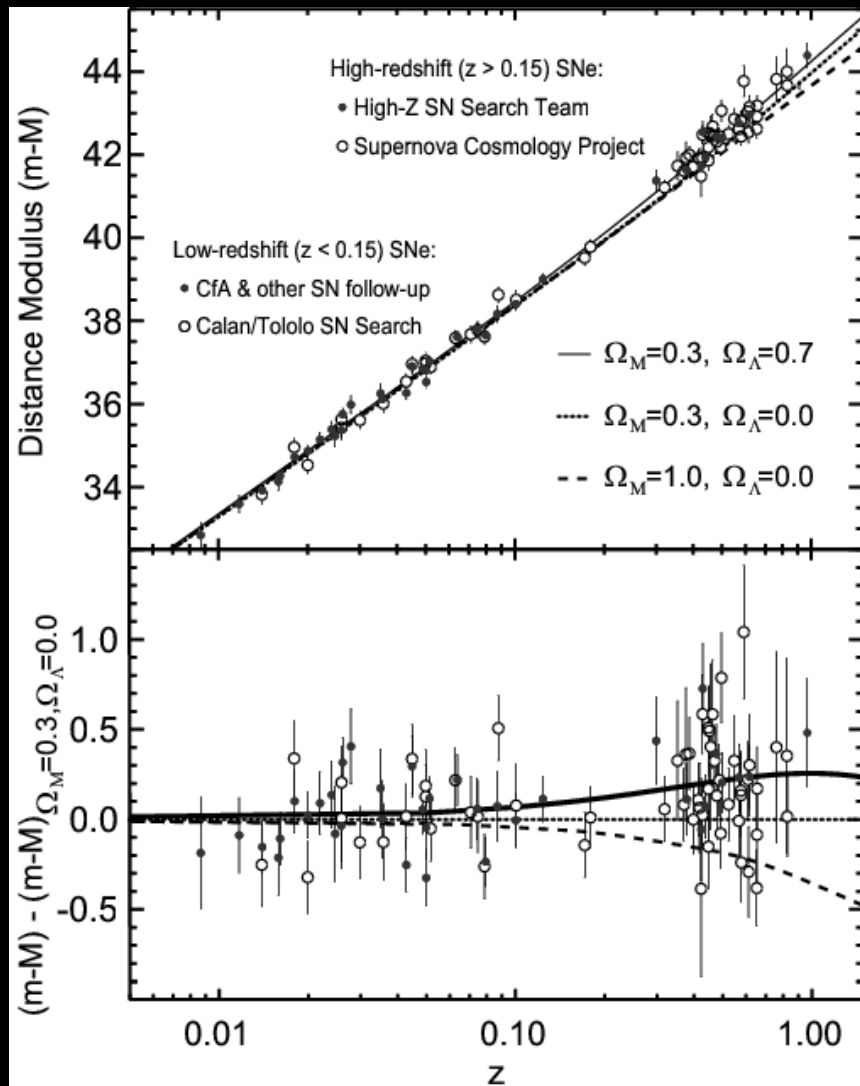
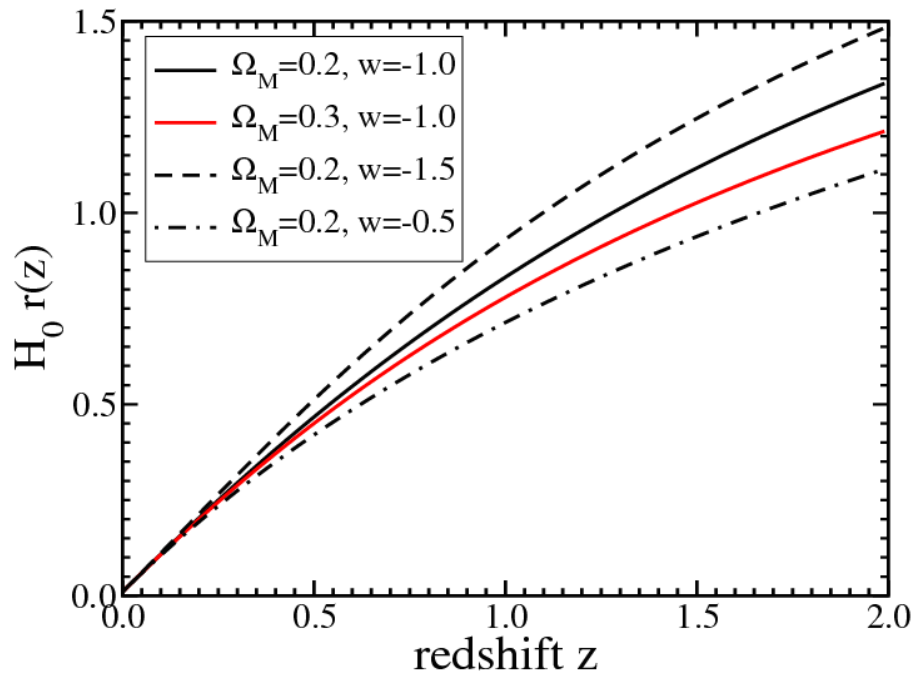
NASA and A. Riess (STScI)

STScI-PRC04-12



Kim, et al. (1997)

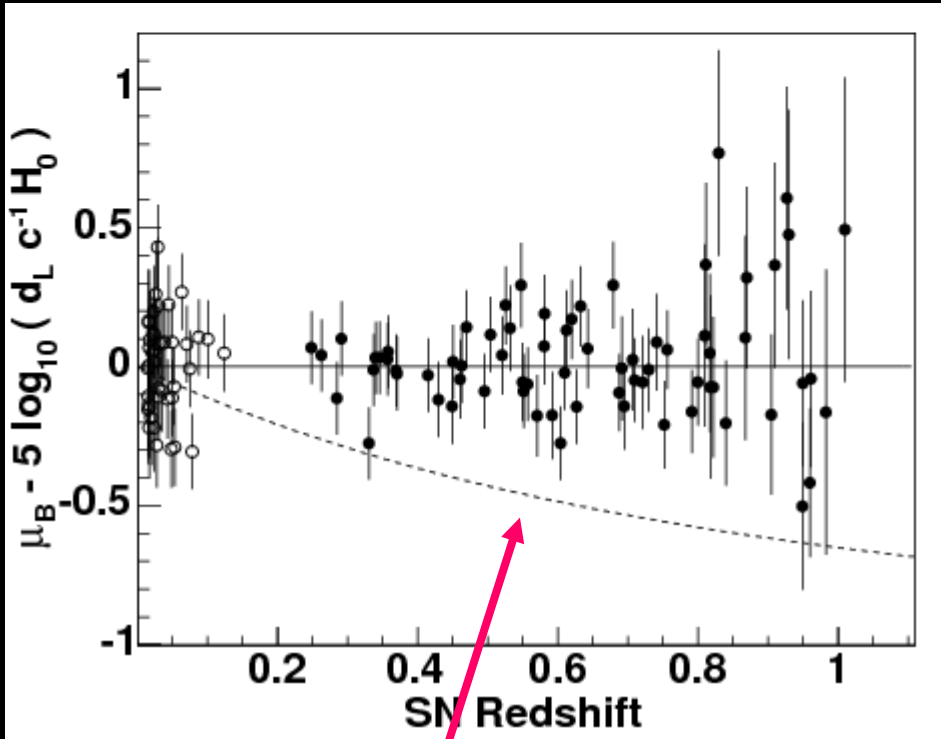
# as supernovas e a energia escura



melhores modelos: com  $\Lambda$ :  $\Omega_\Lambda = 0.7$

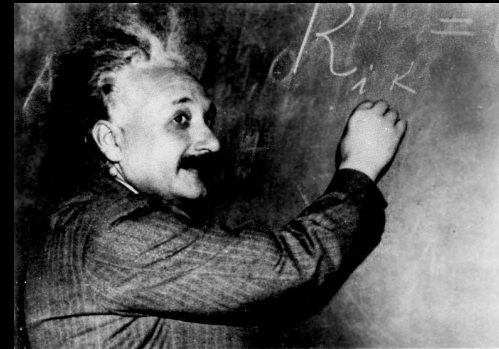
a constante cosmológica está de volta!

# as supernovas e a energia escura



$$\Lambda = 0$$

a constante cosmológica está de volta!



# a energia escura

mas o que é  $\Lambda$ ?

a constante cosmológica pode ser interpretada como energia do vácuo: energia do estado fundamental de algum campo físico ainda não conhecido

problema:

a interpretação de  $\Lambda$  via teoria quântica de campos

prevê  $\Omega_\lambda \sim 10^{120}$

a pior previsão conhecida da física!



(ele está rindo!)

## a energia escura

Equações de Friedmann-Lemaître:

$$\ddot{R}(t) = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho(t) + \frac{3p(t)}{c^2} \right) + \frac{1}{3} \Lambda R$$

o vácuo é um fluido de *pressão negativa*:

$$p_{vac} = -\rho_{vac} c^2 = -\Lambda/8\pi G = \text{constante}$$

equação de estado:

$$p = w \rho c^2$$

constante cosmológica:  $w = -1$



# a energia escura

mas o que é  $\Lambda$  pode não ser uma constante

exemplo: quintessência

campo escalar que vai decaindo para zero

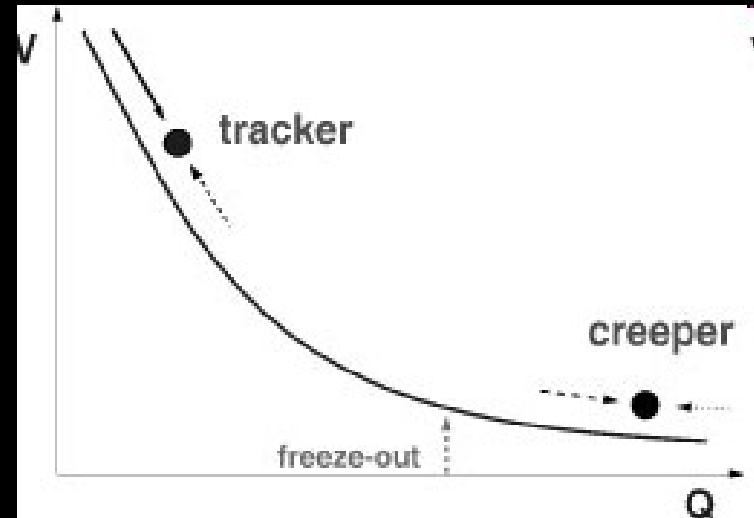
equação de estado:

$$p = w \rho c^2$$

mas agora  $w$  pode variar com o tempo

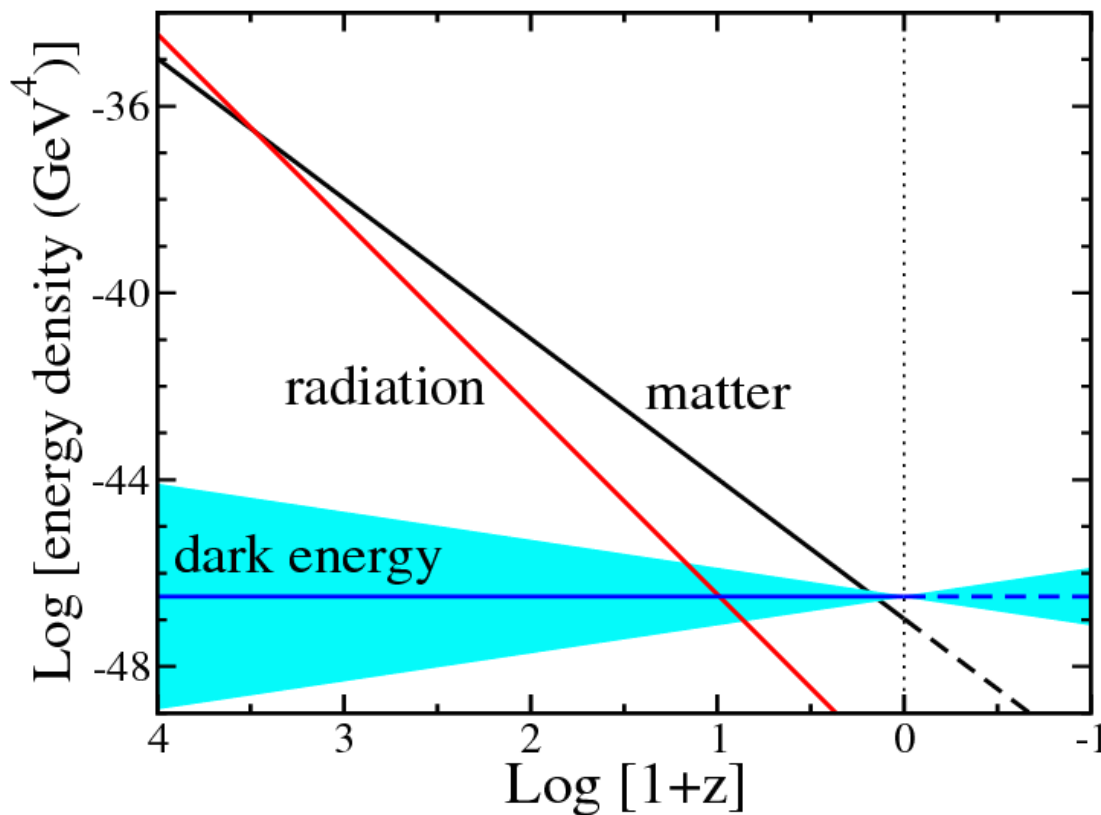
parametrização conveniente:

$$w(z) = w_0 + w_a(1-R_0/R) = w_0 + w_a z/(1+z)$$



# a energia escura: o problema da coincidência

porquê a energia escura só começou a dominar “logo agora”,  
em  $z \sim 0.5$ ?



(ele está rindo!)

# a energia escura

entender a energia escura é um tremendo desafio

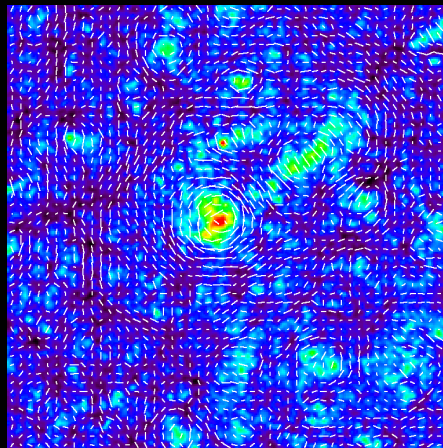
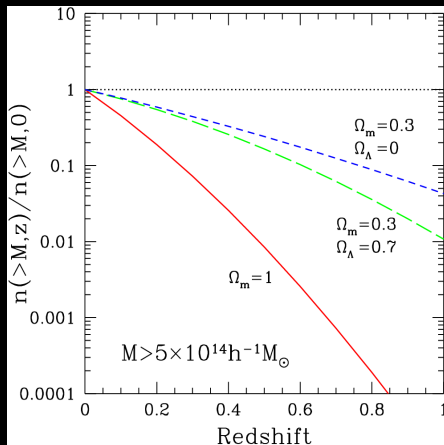
próximo passo:

constante cosmológica ou  $w$  variável?

parametrização conveniente:

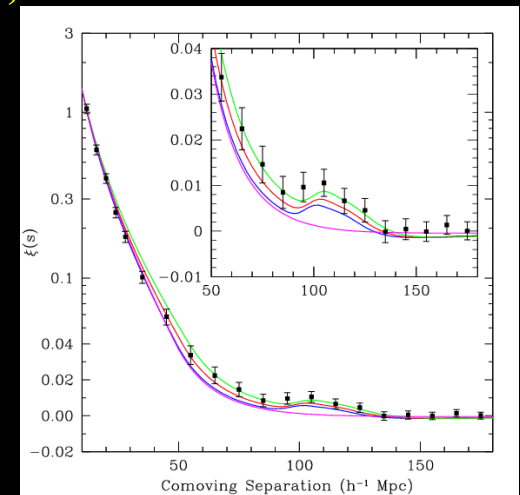
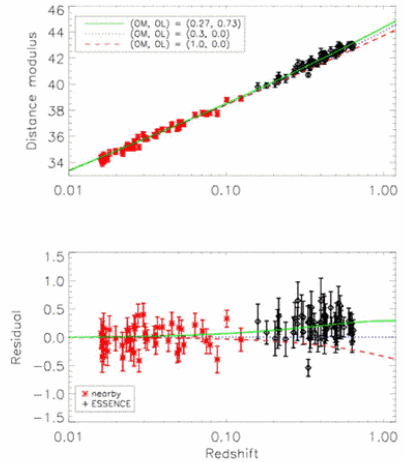
$$w(z) = w_0 + w_a(1-R_0/R) = w_0 + w_a z/(1+z)$$

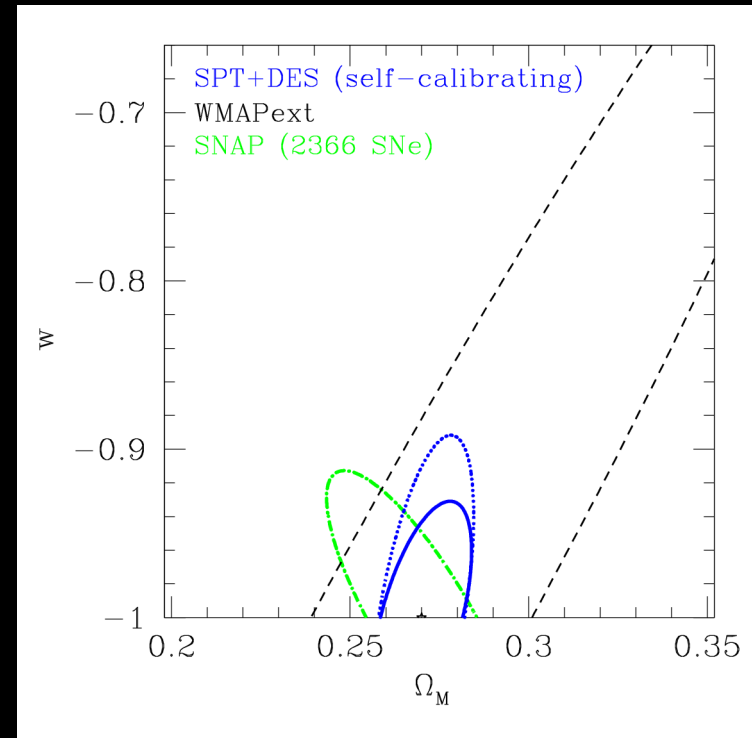
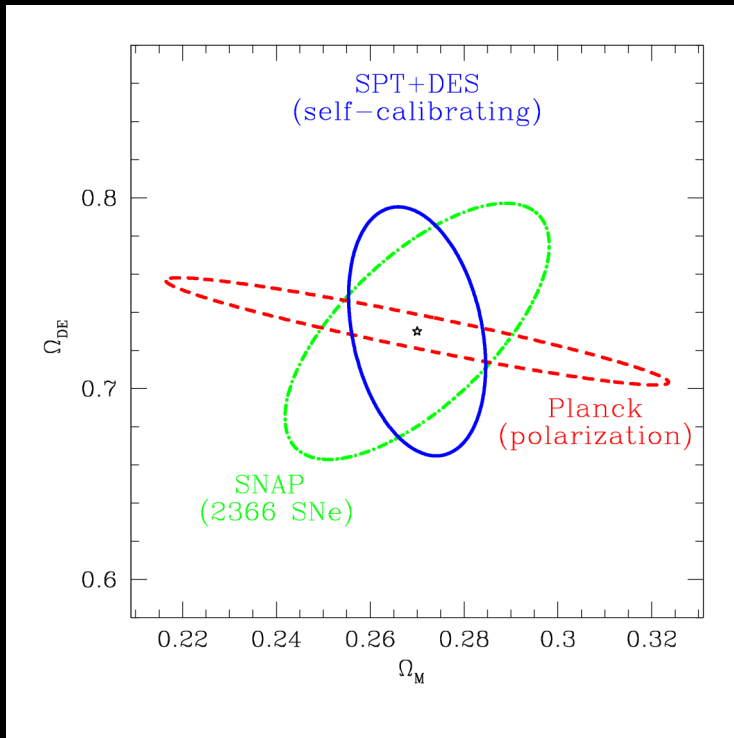
técnicas: BAO, tomografia por lentes fracas, aglomerados, ...



ESSENCE  
Results

An accelerating universe!





Majumdar & Mohr 2004

previsão do DES: 68% CL

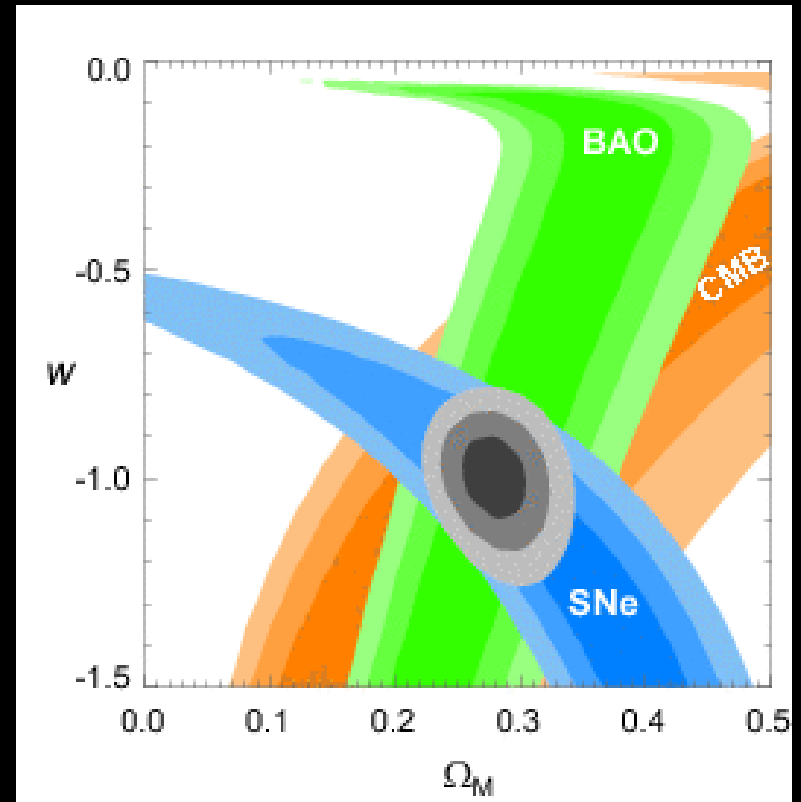
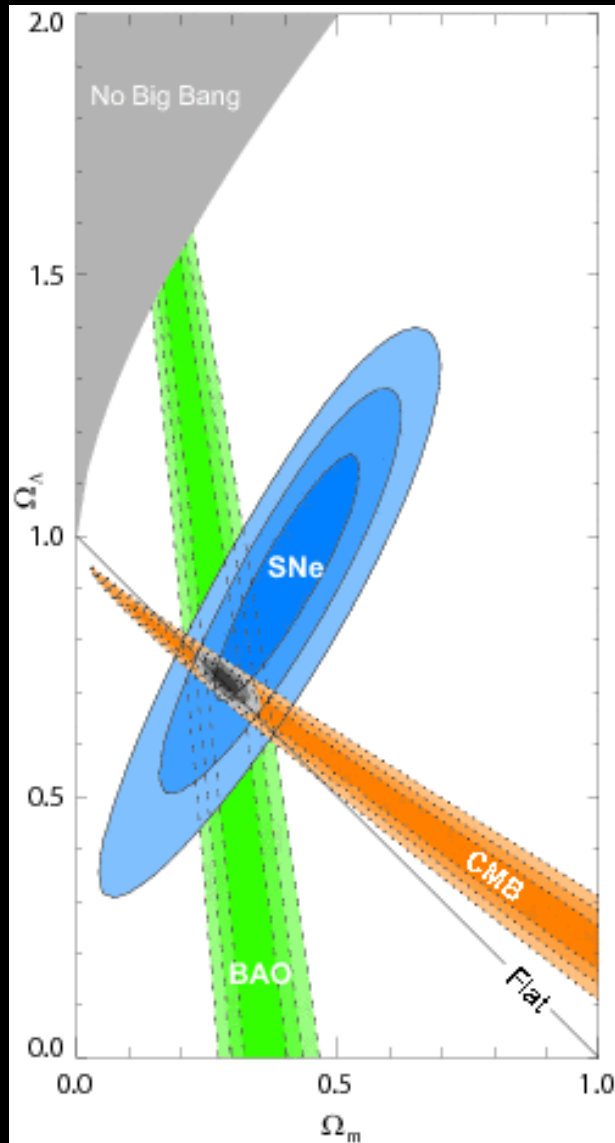
$$\sigma(\Omega_{DE}) = 0.004 \text{ (0.012)}$$

$$\sigma(w_0) = 0.061 \text{ (0.112)}$$

$$\sigma(w_a) = 0.217 \text{ (0.498)}$$

em parenteses os resultados atuais

# Cosmological Parameters



Kowalski *et al.* (2008)

$$w = -0.94 \pm 0.1$$



- Epiciclos?

O lado escuro da força!

