

# Ciência com grandes levantamentos de galáxias

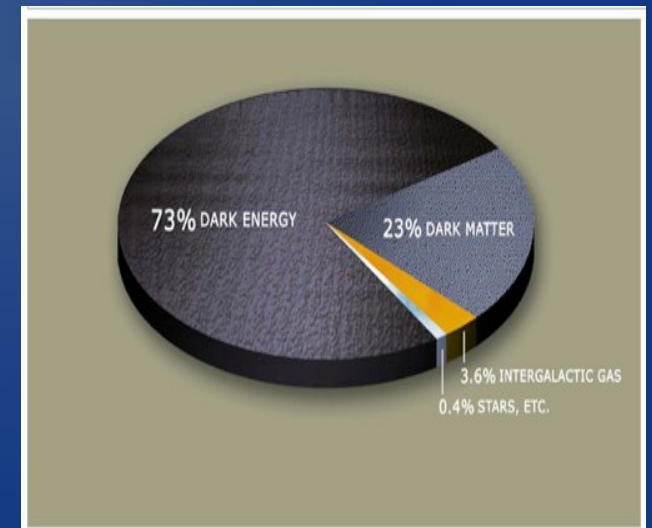
Laerte Sodré Jr.

Departamento de Astronomia  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
USP

COLMEA, IMPA, 06/03/2013

# Onde vivemos?

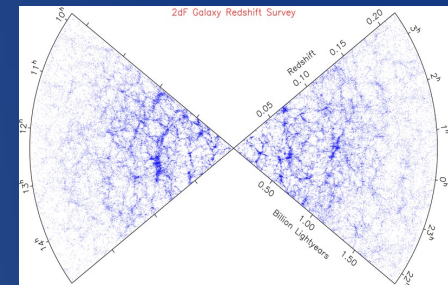
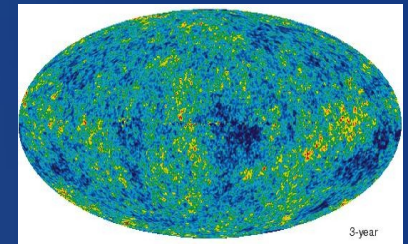
- Aqui! Em um universo  $\Lambda$ CDM
  - Paradigma cosmológico @2013:
  - universo (dentro de um multiverso?), descrito pela Relatividade Geral com:
    - **curvatura zero**
    - dominado por **energia escura  $\Lambda$**  (74%)
    - com **matéria escura fria CDM** (22%)
    - um pouco de **bárions** (~4%)
    - + **fótons, neutrinos...**
- (% em unidades da densidade crítica)



# O paradigma cosmológico: o universo $\Lambda$ CDM

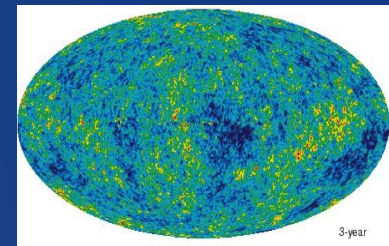
- Paradigma cosmológico @2013  
(sustentado por uma variedade de observações)  
cosmologia de precisão!

Parameter	Symbol	Value
Hubble parameter	$h$	$0.72 \pm 0.03$
Total matter density	$\Omega_m$	$\Omega_m h^2 = 0.133 \pm 0.006$
Baryon density	$\Omega_b$	$\Omega_b h^2 = 0.0227 \pm 0.0006$
Cosmological constant	$\Omega_\Lambda$	$\Omega_\Lambda = 0.74 \pm 0.03$
Radiation density	$\Omega_r$	$\Omega_r h^2 = 2.47 \times 10^{-5}$
Neutrino density	$\Omega_\nu$	See Sec. 21.1.2
Density perturb. amplitude at $k=2\text{Kpc}$	$\Delta_{\mathcal{R}}^2$	$(2.41 \pm 0.11) \times 10^{-9}$
Density perturb. spectral index	$n$	$n = 0.963^{+0.014}_{-0.015}$
Tensor to scalar ratio	$r$	$r < 0.43$ (95% conf.)
Ionization optical depth	$\tau$	$\tau = 0.087 \pm 0.017$
Bias parameter	$b$	See Sec. 21.3.4



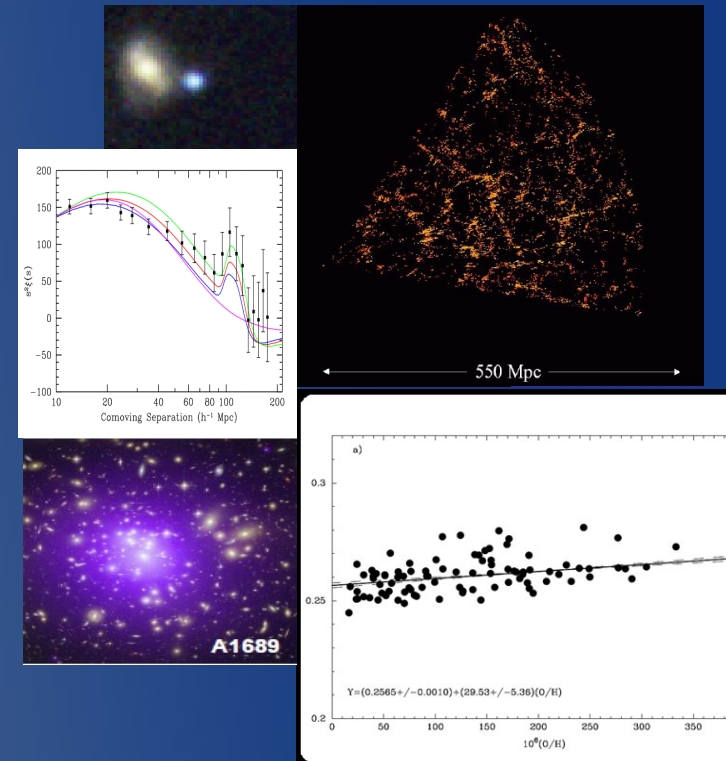
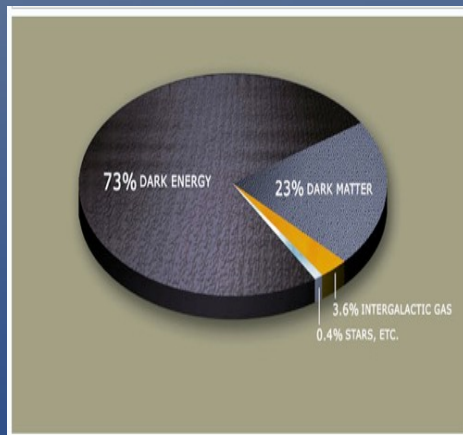


# O paradigma cosmológico @2013: *universo dominado por ME e EE*



Modelo sustentado por uma  
grande variedade de observações!

Quantidade de ME e EE determinadas  
com grande precisão!



*Mas o que é a ME? O que é a EE?*

# Matéria Escura



Zwicky (1933):

*há muito mais massa nos aglomerados que a que podemos atribuir à matéria conhecida: a ME*

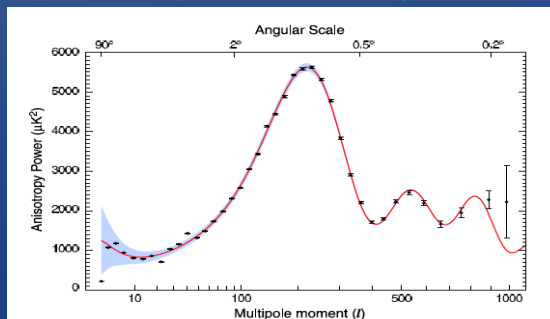
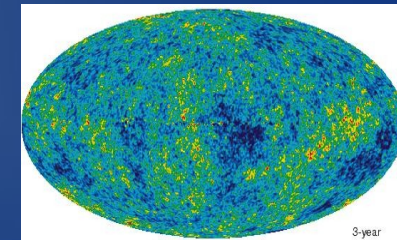
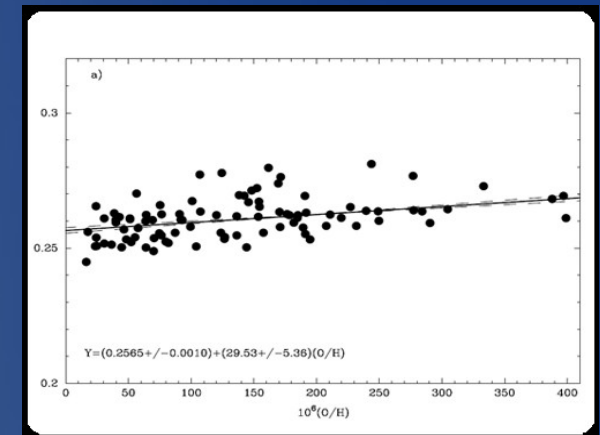
*A maior parte da ME não pode ser bariônica!*

- nucleosíntese primordial

(prevê a abundância do He, D e Li)  $\Omega_b h^2 \approx 0.022$   
para  $h=0.72$ ,  $\Omega_b = 0.042 \pm 0.002$

- flutuações de temperatura da RCF (WMAP): a posição dos picos no espectro de potência depende de  $\Omega_b$

$\Omega_m = 0.260 \pm 0.012$        $\Omega_b = 0.046 \pm 0.001$



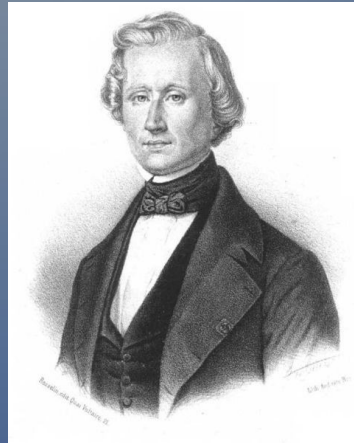
# Matéria Escura fria: CDM

## CDM: cold dark matter

- partículas que não interagem com os fótons
- interação gravitacionalmente
- “estáveis”: tempo de decaimento  $> 1/H_0$
- “frias”: não relativísticas quando formadas
  
- **Candidatos:**
  - ◆ neutralino:  $m \sim 100 \text{ GeV}$  ( $10^{11} \text{ eV}$ )
  - ◆ axion:  $m \sim 10^{-6} \text{ eV}$
  - ◆ ...
  
- “Estimativas” recentes:
  - ◆ Geringer-Sameth & Koushiappas (2011):  $m > 40 \text{ GeV}$
  - ◆ de Vega et al. (2012):  $1 - 2 \text{ keV}$

# ME: Partículas ou Gravidade Modificada?

## Le Verrier e as anomalias nos movimentos planetários



- **Le Verrier (31/8/1846):** sugere que as perturbações observadas na órbita de Urano eram devidas a um novo planeta (ainda desconhecido)

- **23/9/1846:** Galle descobre Netuno

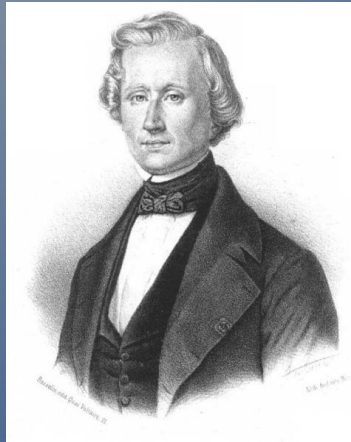
- **1859:** Le Verrier propõe um novo planeta para explicar a precessão do periélio de Mercúrio

- **26/3/1859:** Lescarbault descreve o trânsito de um planeta desconhecido sobre o disco do Sol (posteriormente refutado por Emmanuel Liais, trabalhando no Rio de Janeiro)

- **1915:** Einstein explica a precessão do periélio de Mercúrio com uma modificação da teoria gravitacional: a relatividade geral

# ME: Partículas ou Gravidade Modificada?

## Le Verrier e as anomalias nos movimentos planetários



- Le Verrier (31/8/1846): sugere que as perturbações observadas na órbita de Urano eram devidas a um novo planeta (ainda desconhecido)

- 23/9/1846: Galle descobre Netuno

- 1859: Le Verrier propõe um novo planeta para explicar a precessão do periélio de Mercúrio

- 26/3/1859: Lescarbault descreve o trânsito de um planeta desconhecido sobre o disco do Sol (posteriormente refutado por Emmanuel Liais, trabalhando no Rio de Janeiro)

- 1915: Einstein explica a precessão do periélio de Mercúrio com uma modificação da teoria gravitacional: a relatividade geral

ME como partícula

ME como gravitação modificada

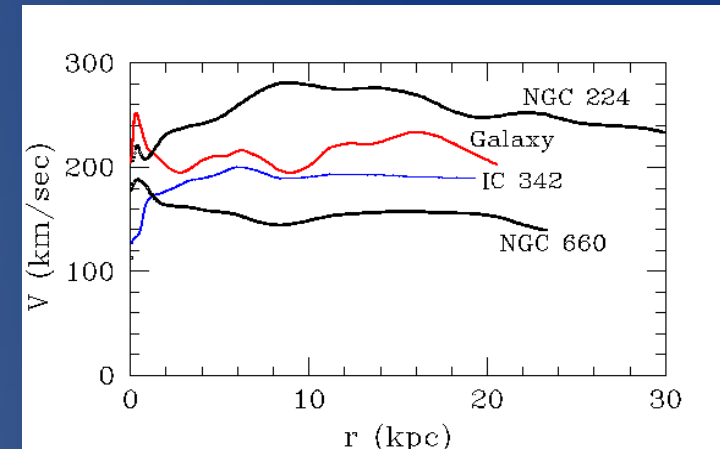


# Evidências de ME:

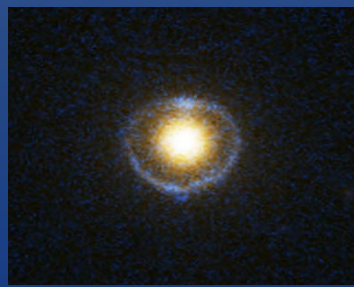
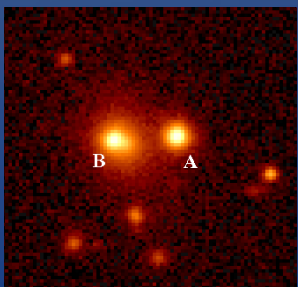
- Curvas de rotação de galáxias espirais (Vera Rubin, ~1970)



- Emissão de raios-X por aglomerados de galáxias



- Lentes gravitacionais



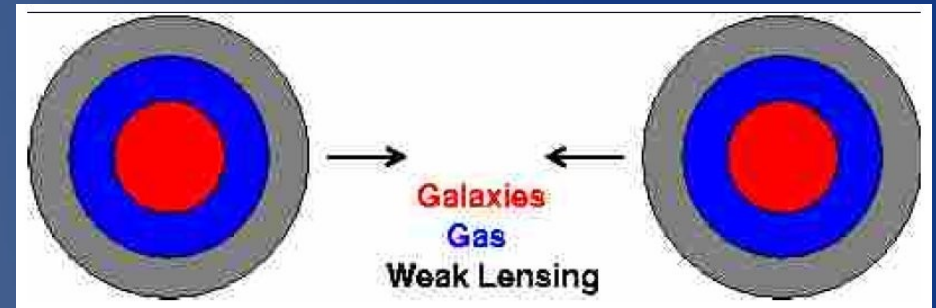
# ME: Partícula ou Gravitação Modificada?

Vamos usar lentes fracas para ver onde a massa está

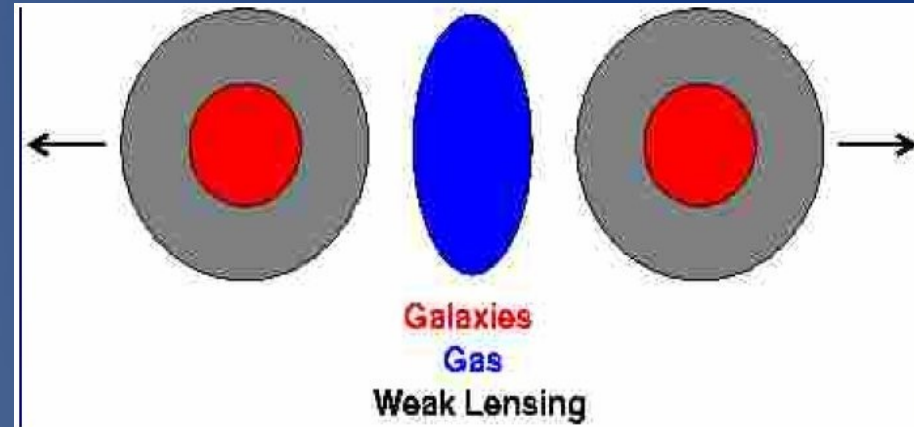
a maioria dos bárions está na forma de gás quente



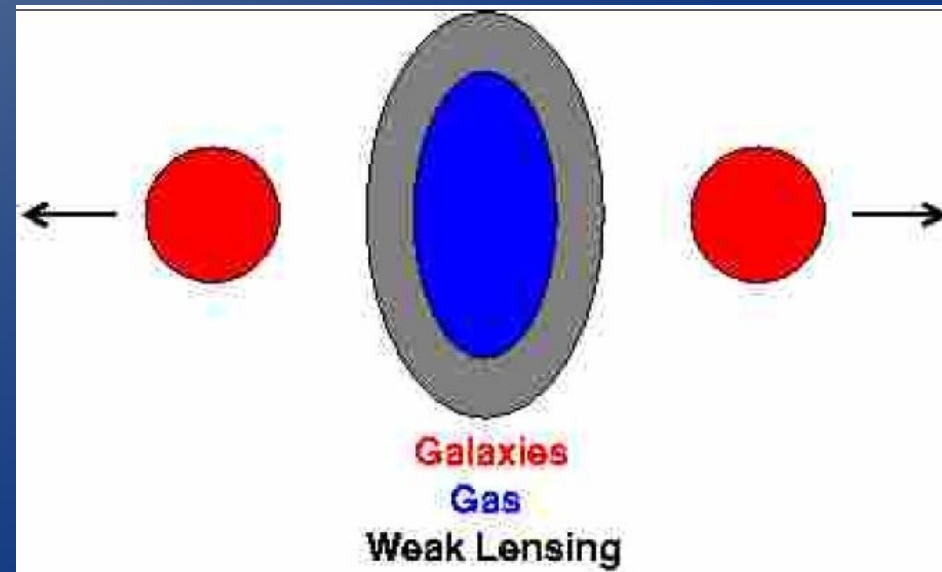
mas a massa está onde estão as galáxias (e a ME!)



DM



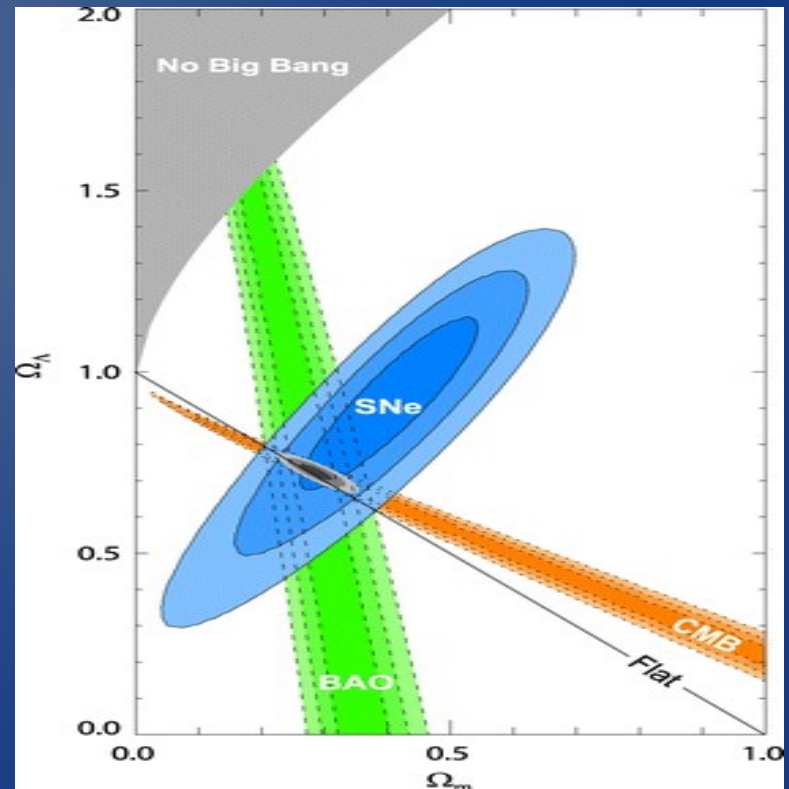
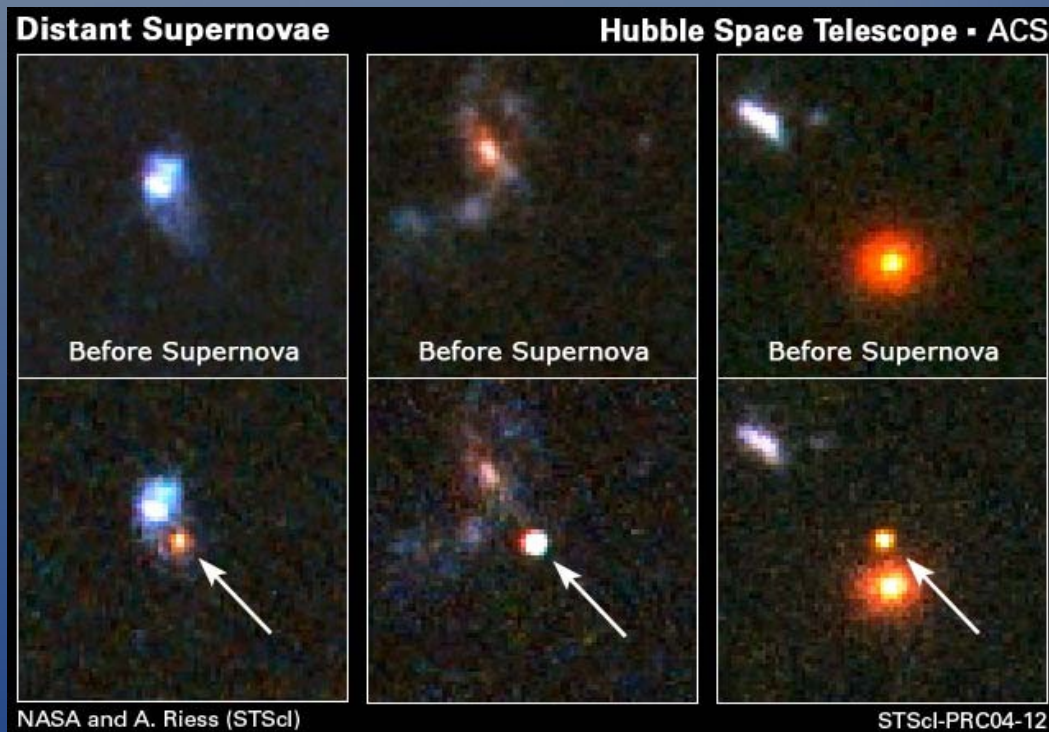
MOND





# A Energia Escura

- Supernovas Ia são excelentes indicadores de distância
- Luminosas
- Velas padrão
- Precisão na distância:  $\delta L / L \sim 7\%$
- Observações de SNs distantes:
- evidência de um universo acelerado
- melhores modelos com constante cosmológica  $\Lambda$ :  $\Omega_\Lambda \sim 0.7$



# A Energia Escura

- Modelo do Big Bang convencional (TRG):  
o universo se expande, mas a expansão é desacelerada
- TRG: uma “constante cosmológica” ou um fluido de pressão negativa (!) podem produzir um universo acelerado: a energia escura

- Limite de campo fraco da TRG:

$$F = -GM/r^2 + \Lambda r/3$$

antigravidade ou energia/fluido?

- Zel'dovich: a constante cosmológica poderia ser a energia do vácuo de um campo físico
- Problema: diferença de  $10^{120}$  ordens de magnitude do valor esperado...

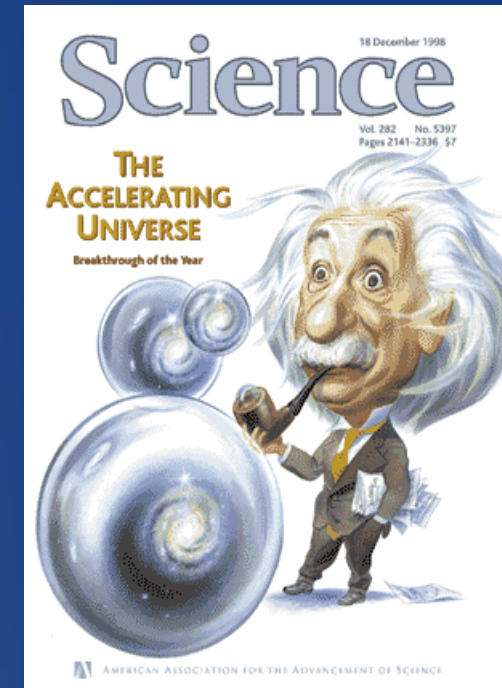
*Most embarrassing observation in physics...  
Edward Witten*



EE: gravitação modificada ou fluido com pressão negativa?

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

1. Cosmological constant
2. Dark energy  $w = \text{const}$
3. Dark energy  $w = w(z)$
4. quintessence
5. scalar-tensor models
6. coupled quintessence
7. mass varying neutrinos
8. k-essence
9. Chaplygin gas
10. Cardassian
11. quartessence
12. qulessence
13. phantoms
14.  $r(R)$
15. Gauss-Bonnet
16. anisotropic dark energy
17. brane dark energy
18. backreaction
19. degravitation
20. TeVeS
21. oops....did I forget *your* model?







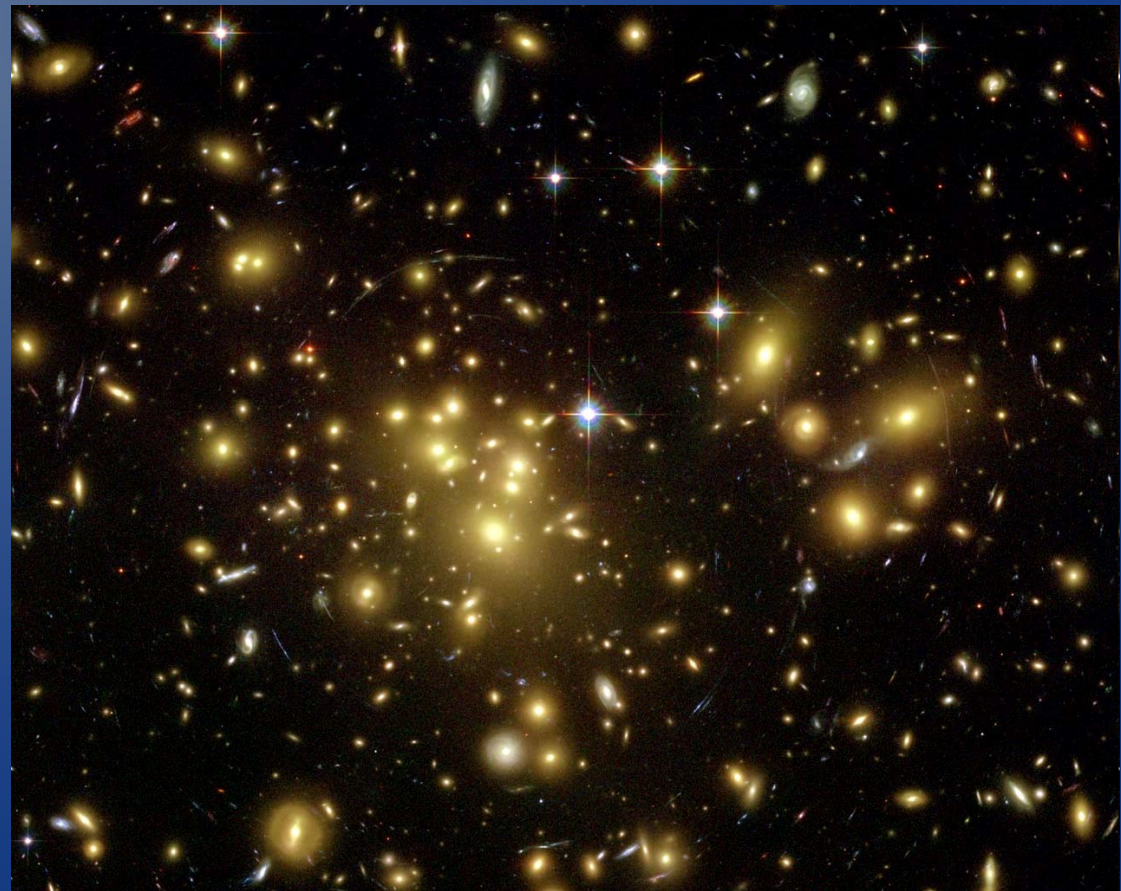
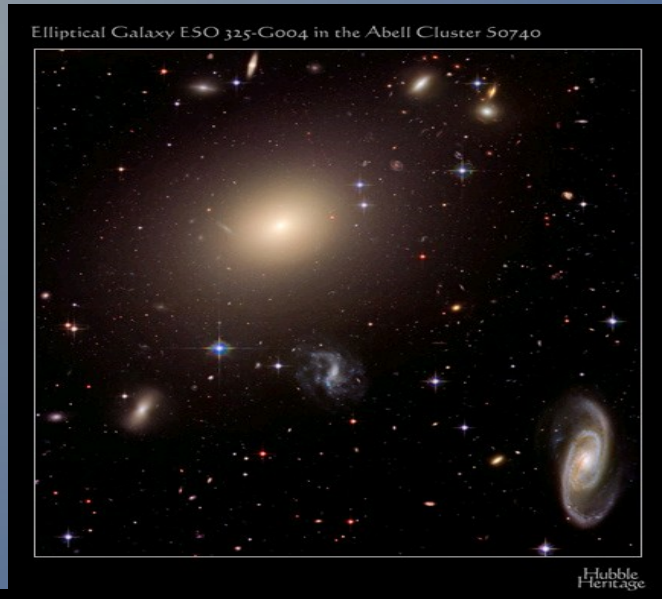
**Como estudar a EE?**

**A cosmologia está impressa na  
distribuição de galáxias**

**Os grandes levantamentos de galáxias  
são a ferramenta ideal para extrair esta  
informação**



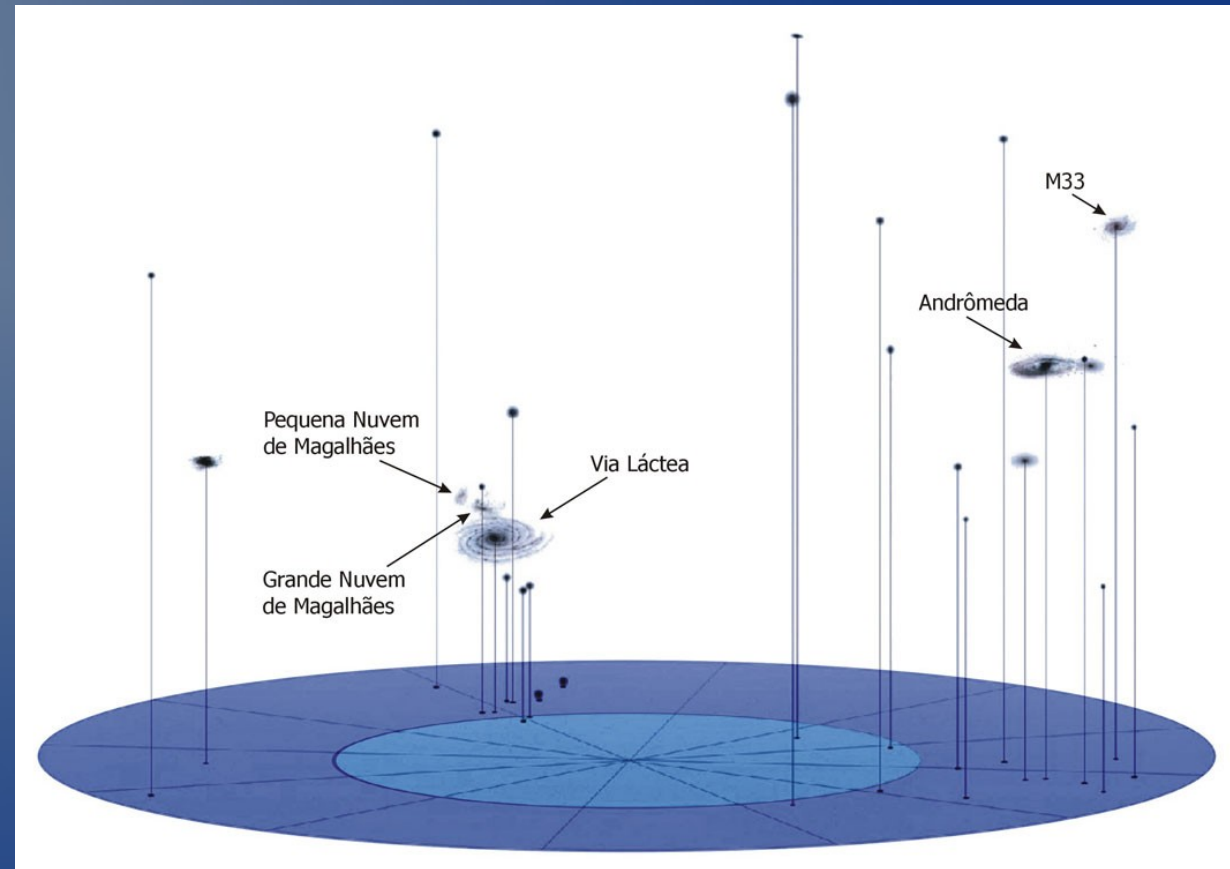
# galáxias vivem em ambientes variados



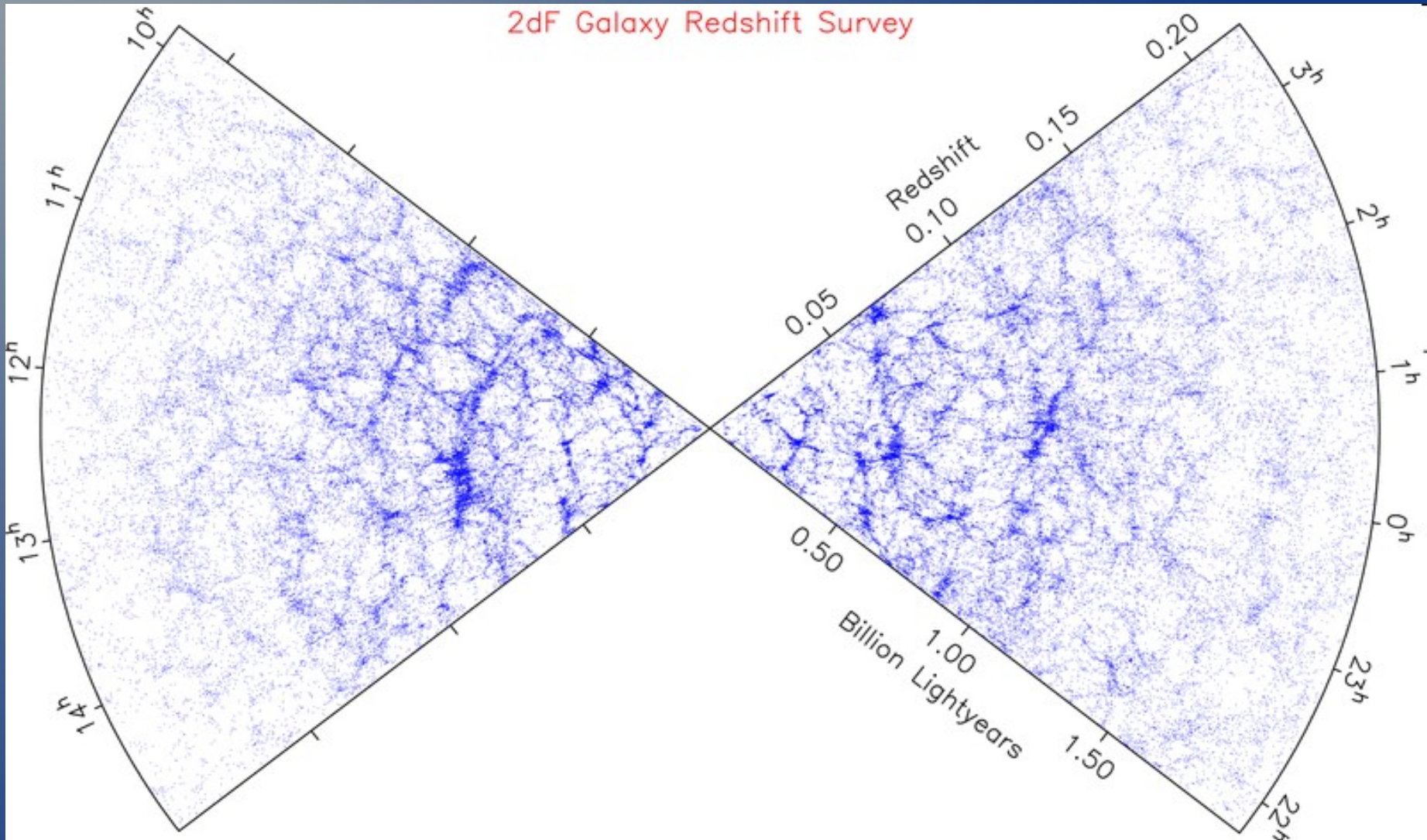


# A vizinhança cósmica: o *Grupo Local*

A Via Láctea e Andrômeda, cada uma com seus satélites, formam um sistema binário: o *Grupo Local*

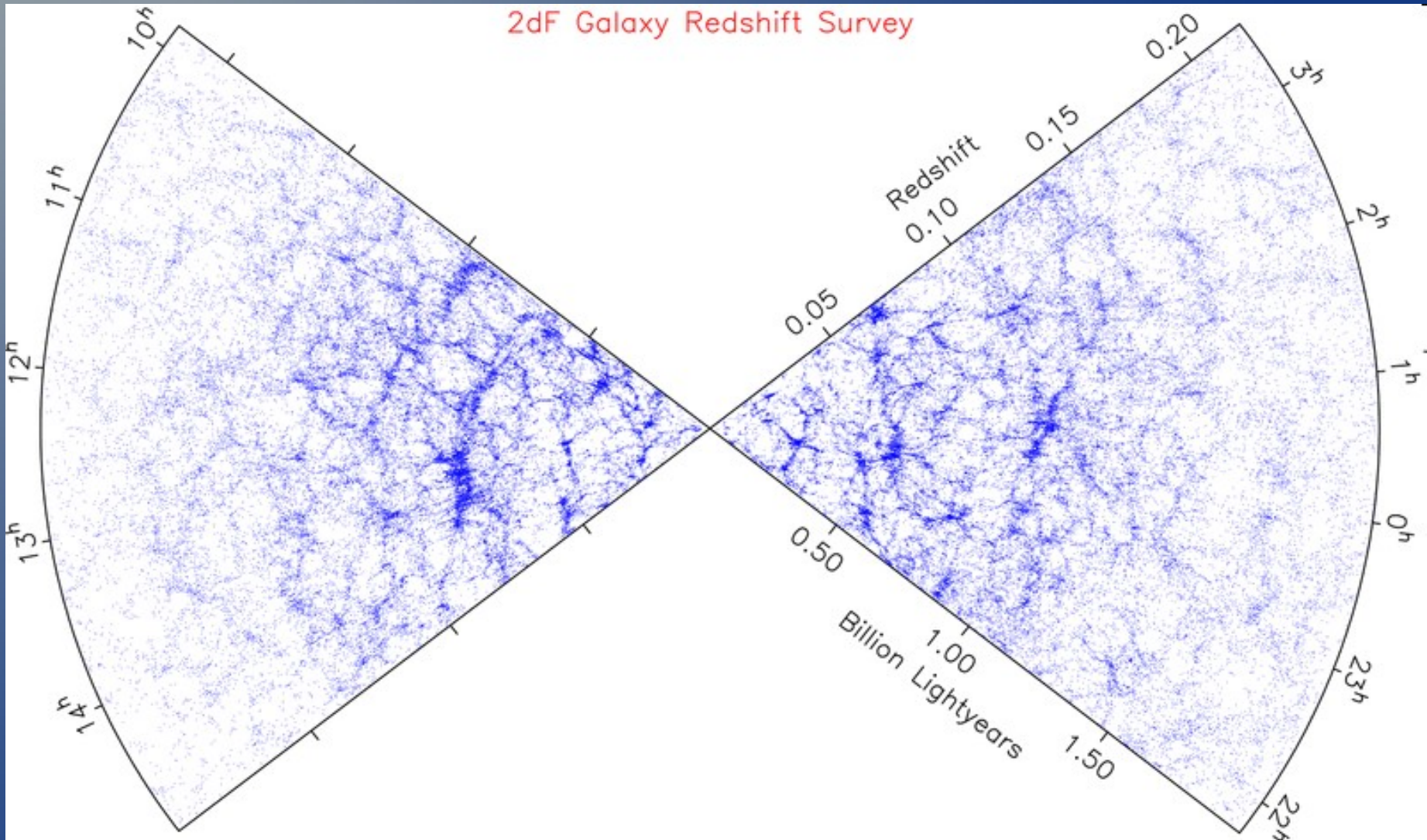


# a teia cósmica: grupos, aglomerados, superaglomerados, vazios



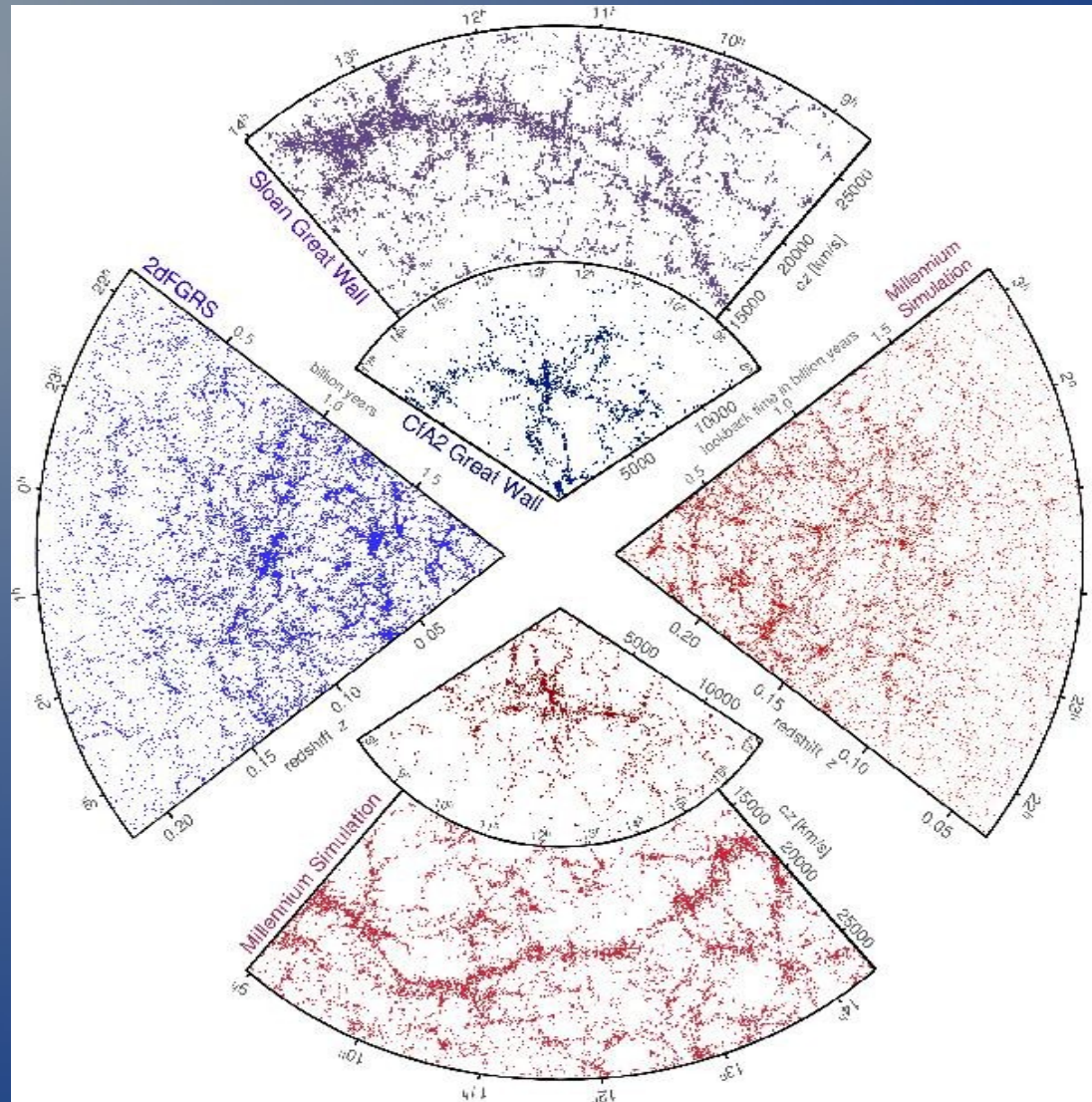


# a teia cósmica: grupos, aglomerados, superaglomerados, vazios



a cosmologia está impressa na distribuição de galáxias

# Modelo $\Lambda$ CDM: explica muito bem o universo em grandes escalas!



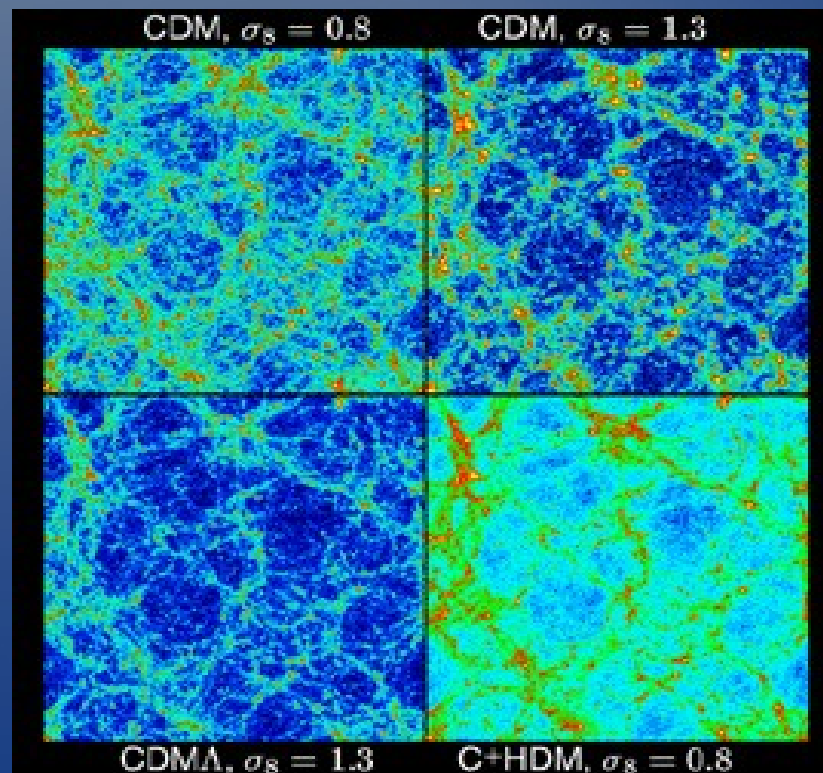
*mas o cenário é ainda altamente incompleto!*



# A grande ferramenta astrofísica da atualidade: os levantamentos de redshifts

Objetivo- fazer mapas 3D da distribuição de galáxias

*a cosmologia está impressa na distribuição de galáxias!*

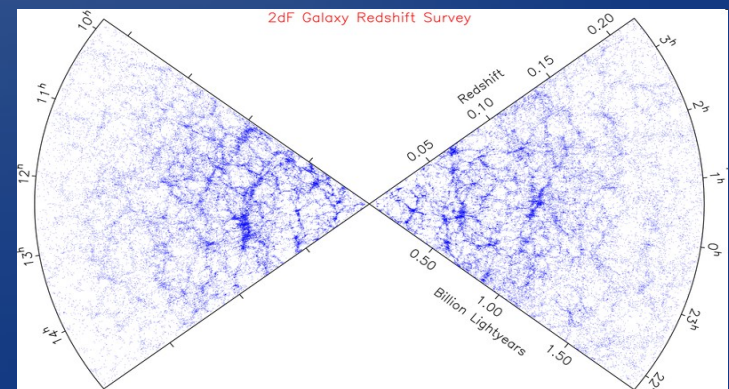
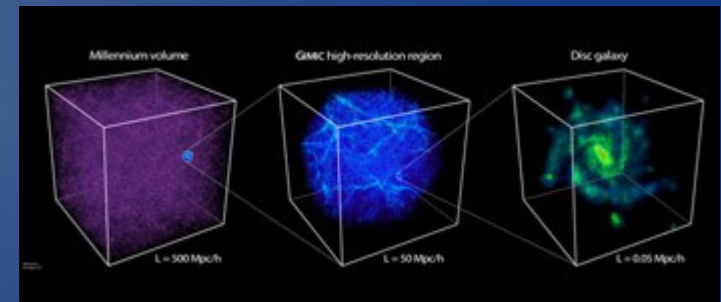
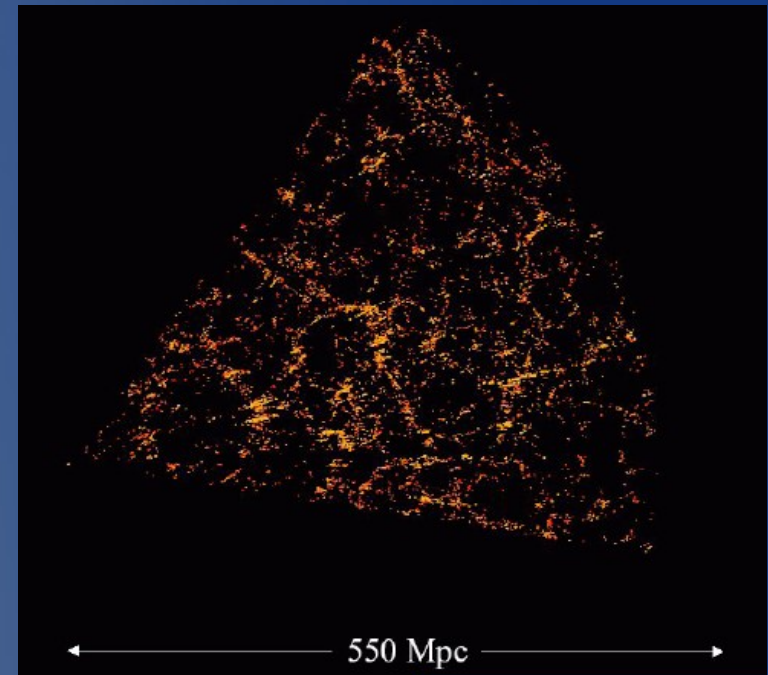
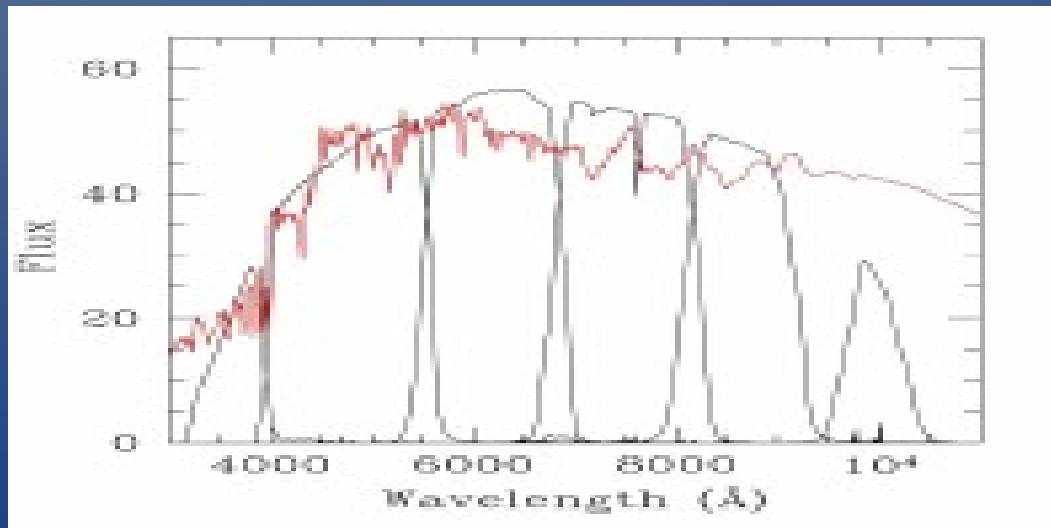


# O que é um levantamento de galáxias?

Parâmetros de um levantamento de redshifts:

- Volume: area e profundidade
- Fluxo ou luminosidade limite
- Precisão nas distâncias:

redshifts *espectroscópicos* ou *fotométricos*

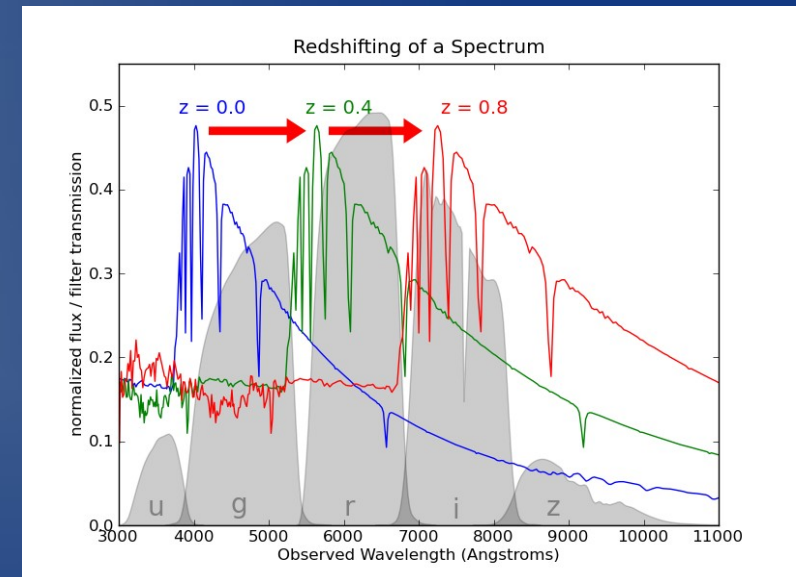


# O que observamos nos levantamentos?

Medimos o desvio espectral  $z$ :

- em geral, redshifts ( $z > 0$ )
- $z$  mede a expansão do universo:  
 $1+z = R_0/R$  onde  $R(z)$  é o fator de escala
- distâncias são função de  $z$  (e de outros parâmetros cosmológicos):  $d(z)$
- lei de Hubble:  $v = cz = H_0 d$

$$z \equiv \frac{\lambda_0 - \lambda_e}{\lambda_e}$$



Mas  $z$  é afetado pelas velocidades peculiares:

$$v = v_H + v_{pec}$$

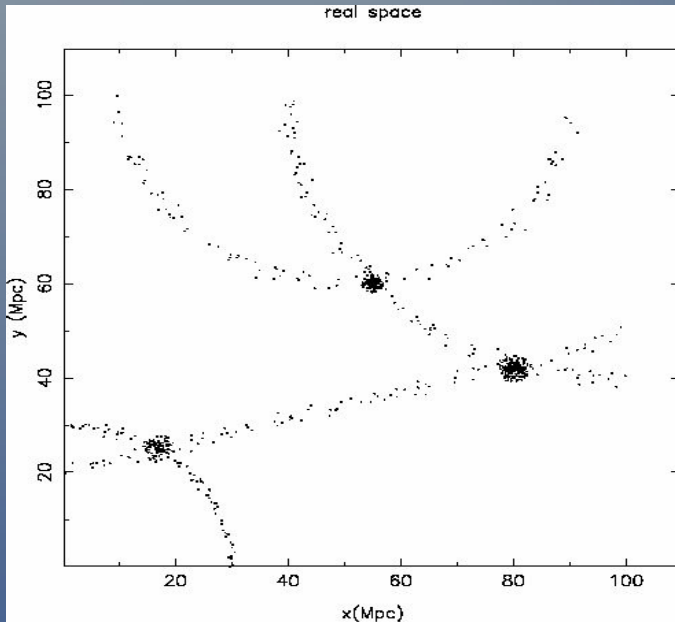




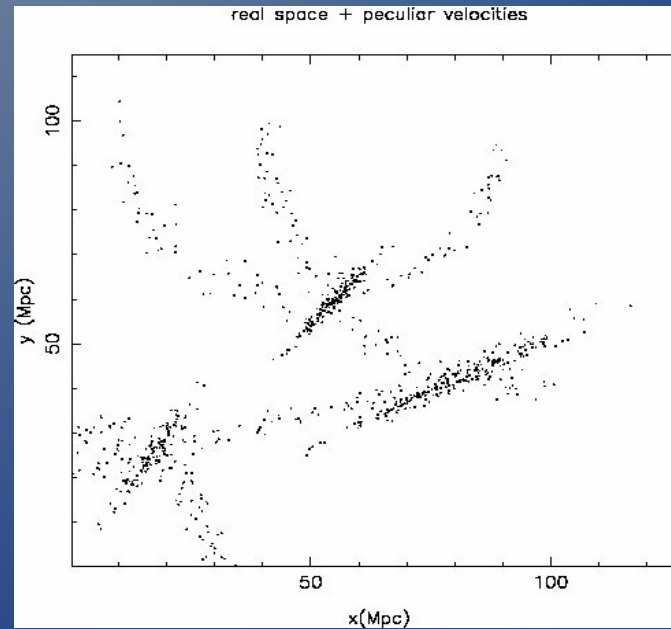


# Mas o que observamos?

“simulação 3-D”

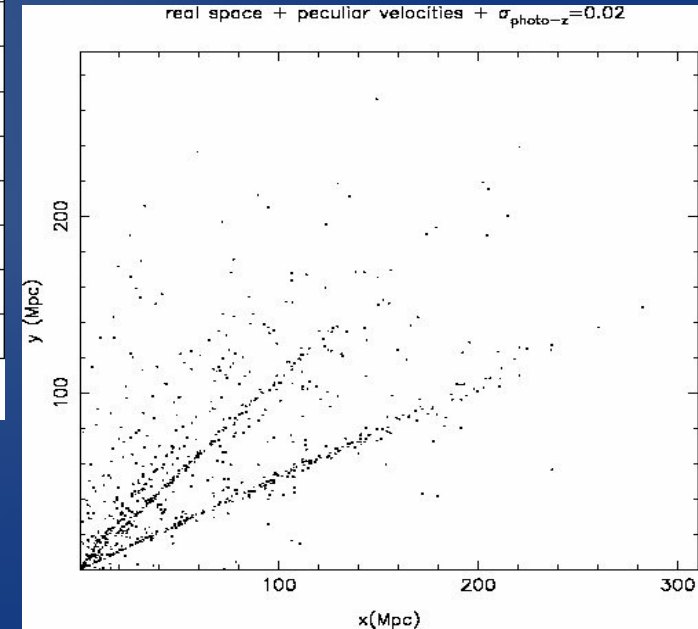


introduzindo velocidades peculiares



espectroscopia

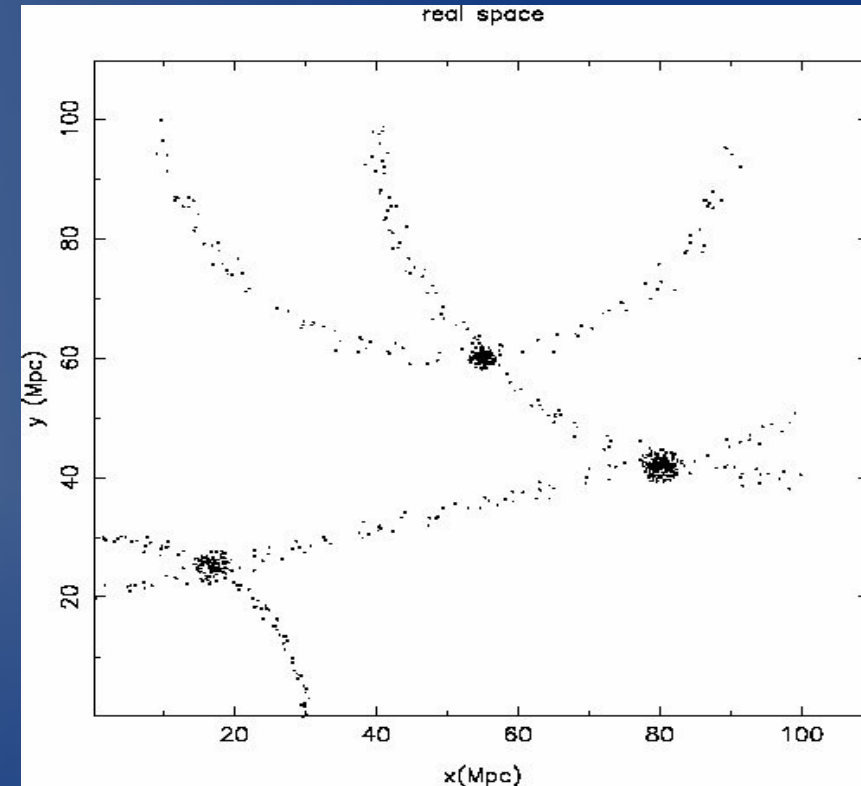
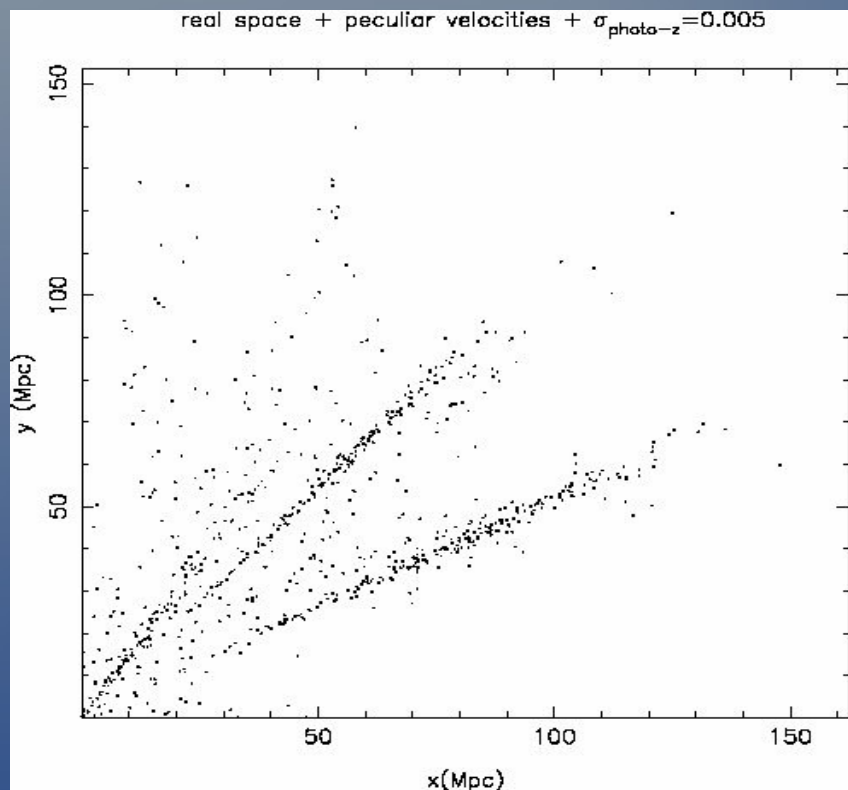
+ erros nos redshifts fotométricos (0.02)



fotometria

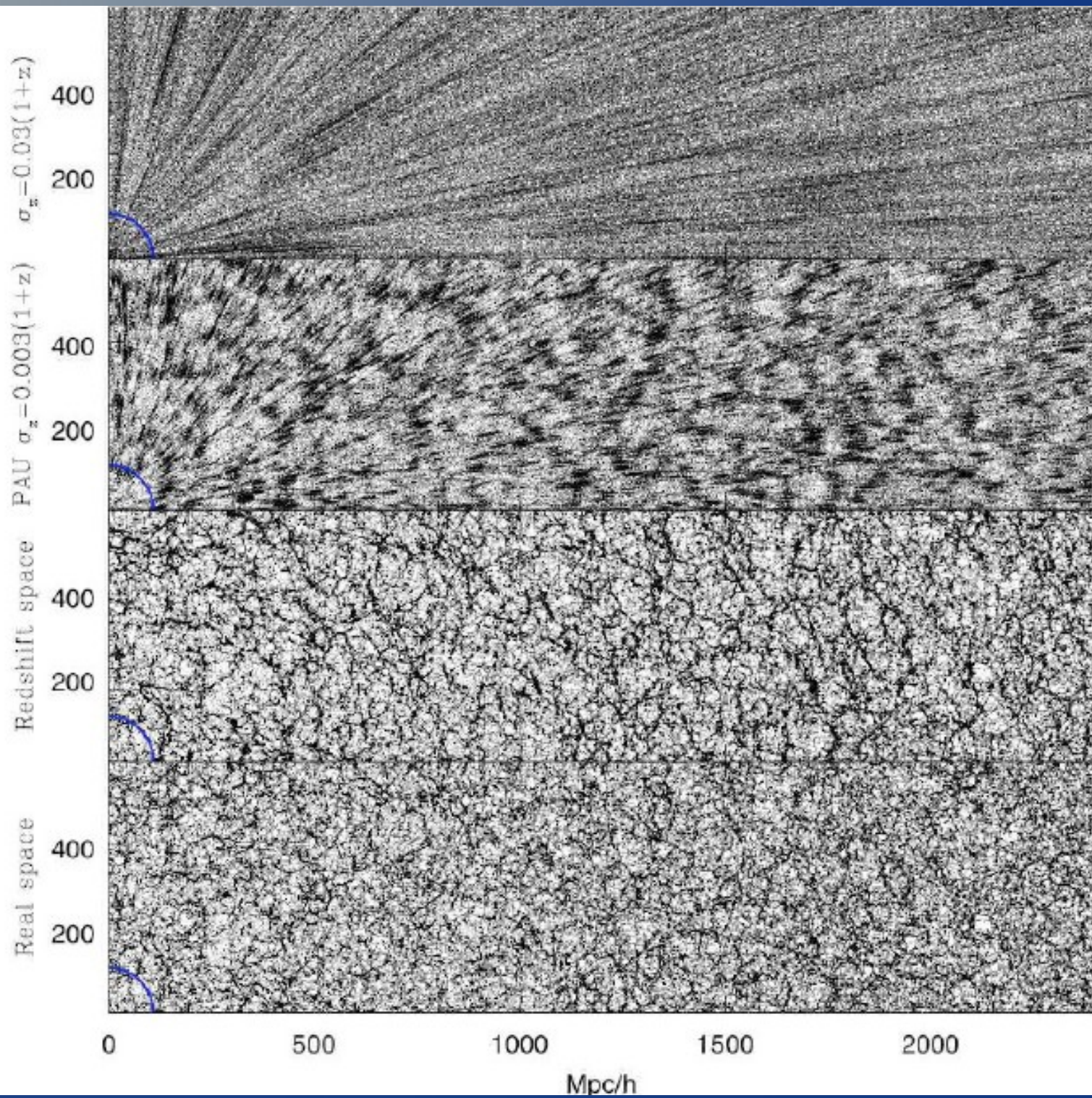
# Mas o que observamos?

- a análise de dados é um desafio!



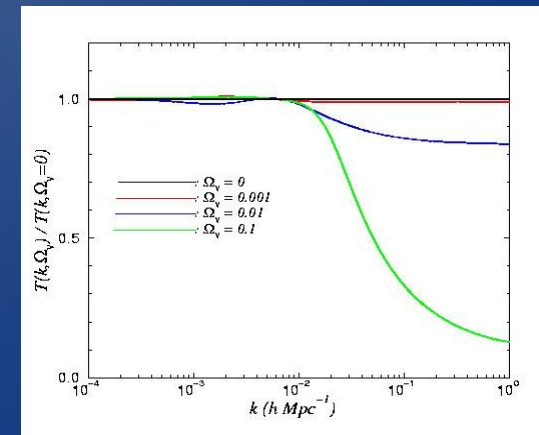
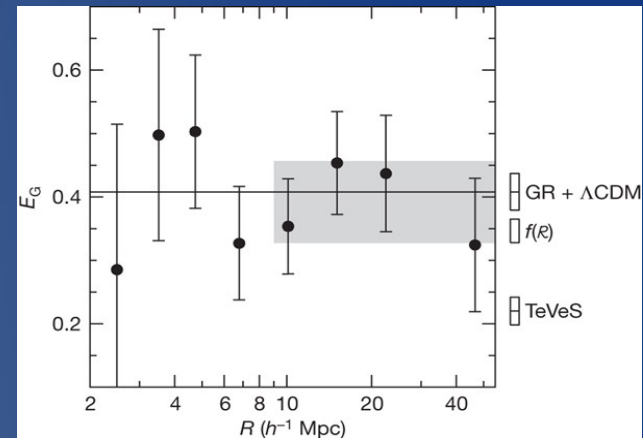
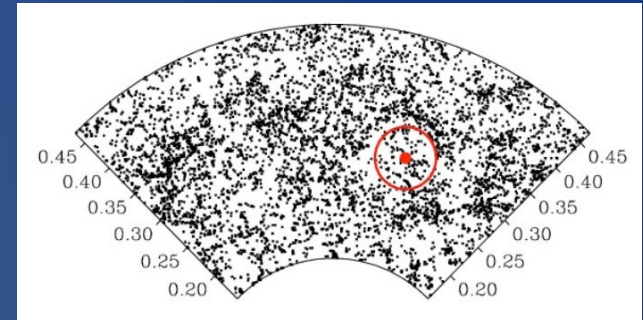
**Métodos bayesianos são uma necessidade!**





# Algumas aplicações dos grandes levantamentos

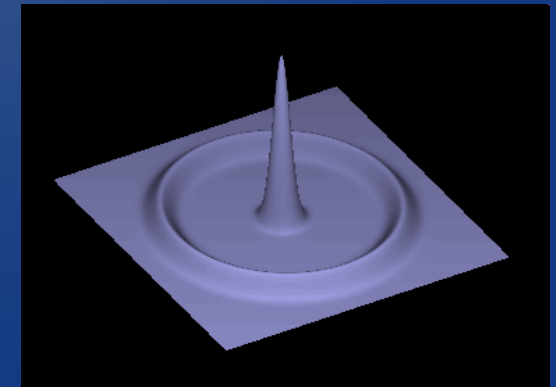
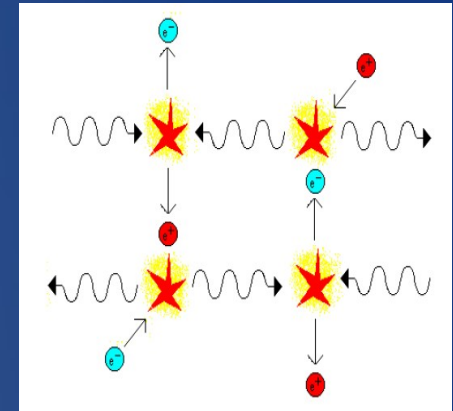
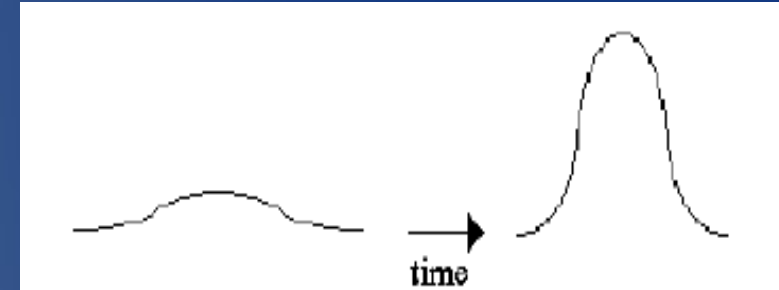
- Cosmologia:
- *oscilações acústicas de bárions* (BAOs)
- Testes da TRG
- Massa dos neutrinos
- Evolução das galáxias





# BAOs: Formação de estruturas com CDM

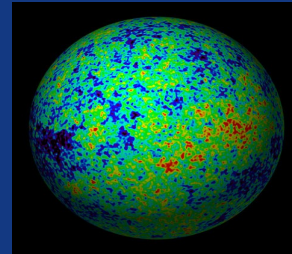
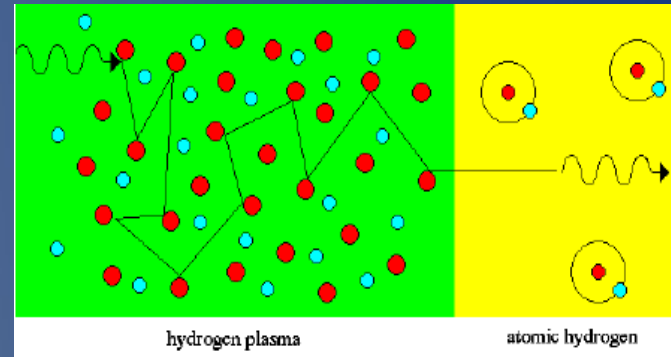
- estruturas se formam pela evolução gravitacional de pequenas flutuações de densidade
- logo depois do Big-Bang o universo está num estado quente e denso, com fótons e bárions fortemente acoplados: plasma fóton-bárion
- flutuações de ME “colapsam” e atraem flutuações do plasma fóton-bárion, mas a pressão de radiação impede o colapso e estas flutuações se propagam como ondas sonoras: as *oscilações acústicas de bárions*



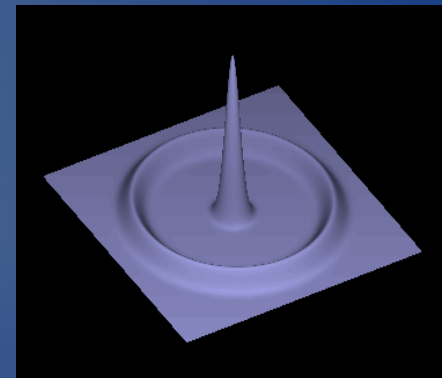


# BAOs

- $z \sim 1000$  ( $t \sim 400$  Myr): o universo é suficientemente frio e os átomos podem se formar: *época da recombinação*



- O universo fica eletricamente neutro, fótons e bárions se desacoplam e a propagação das ondas sonoras é interrompida



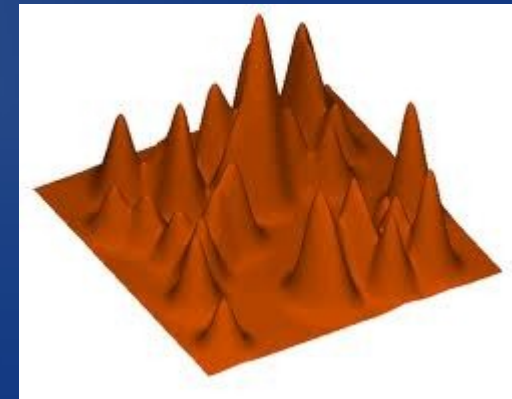
- *Raio das ondas:*

$$l \sim c/3^{1/2} t \sim 150 \text{ Mpc}$$

(em unidades comóveis)

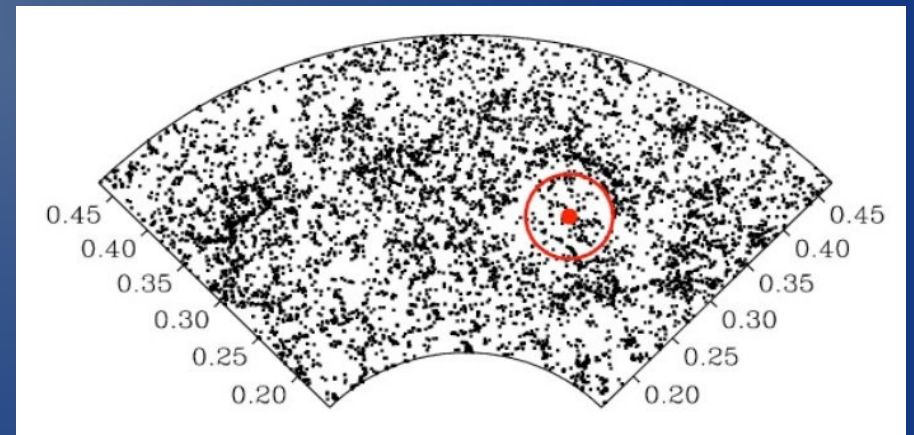
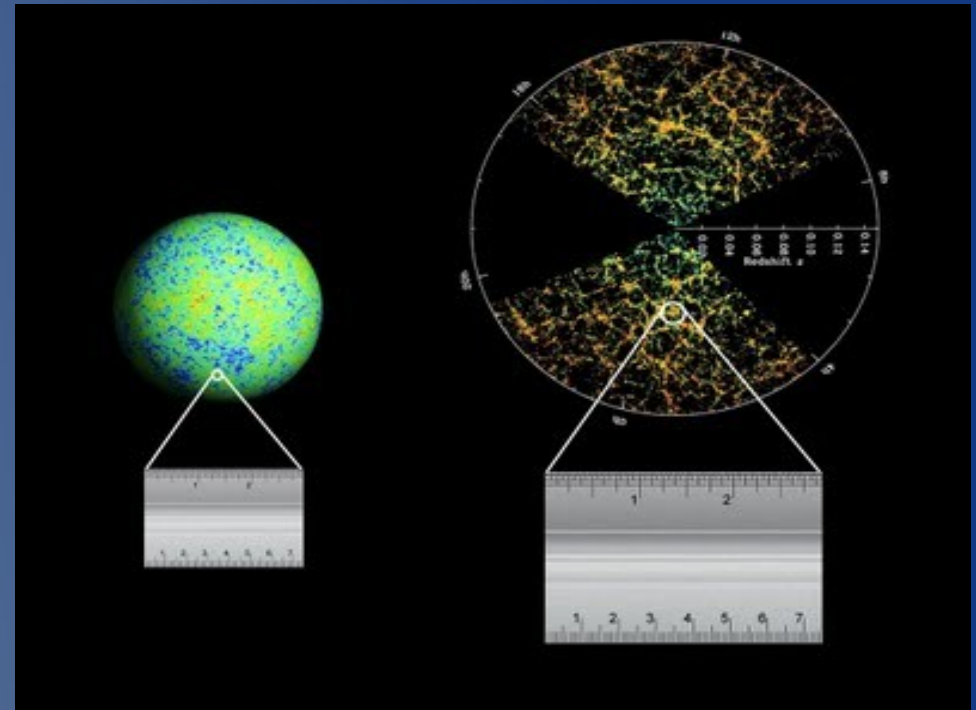
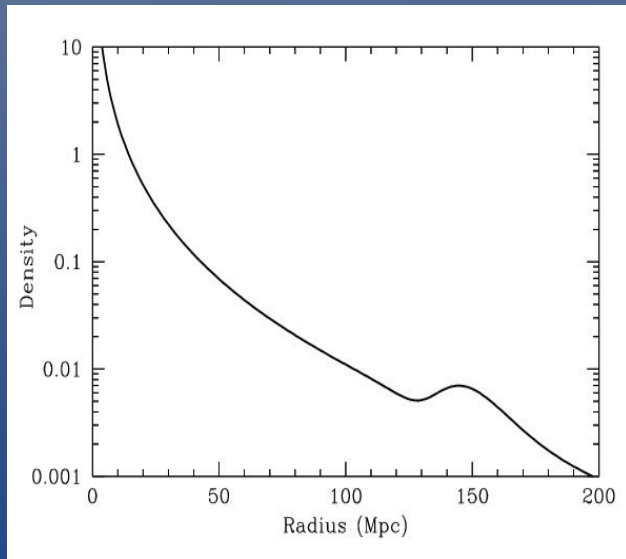


- **RÉGUA PADRÃO!**



# BAOs como observáveis cosmológicos

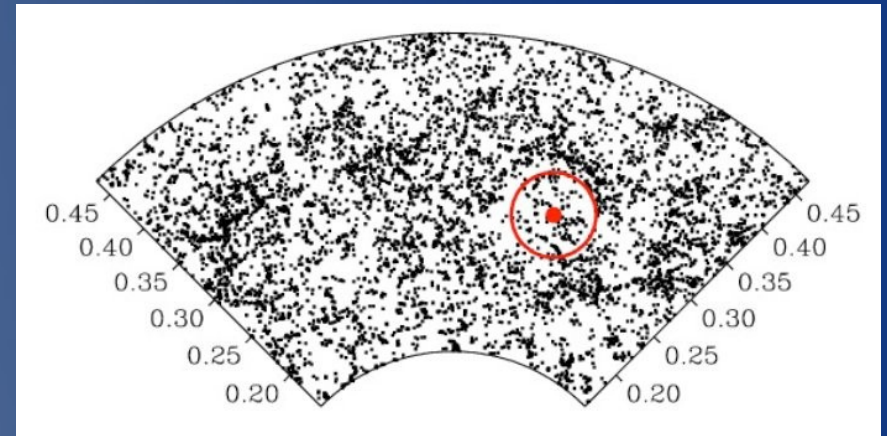
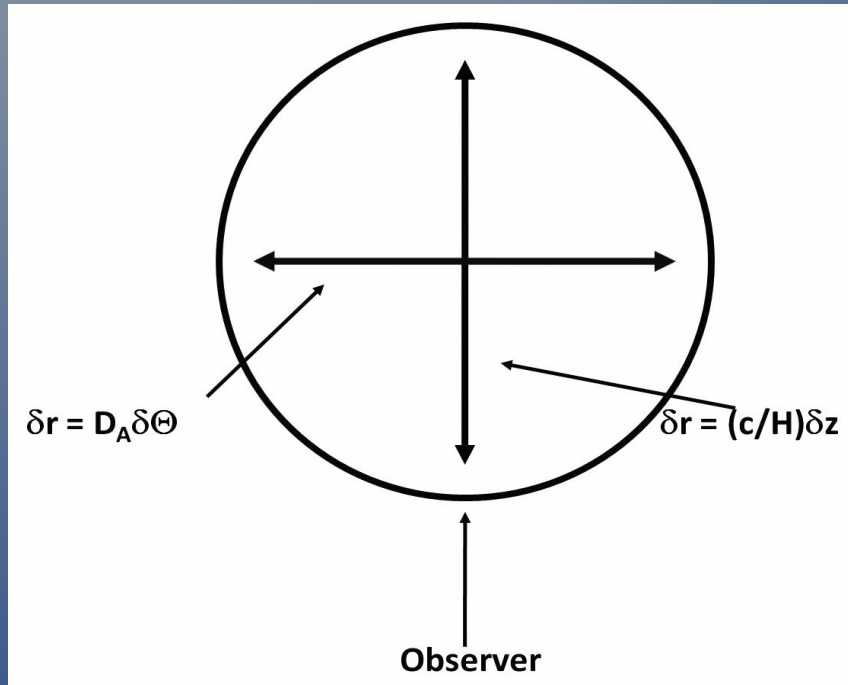
- A escala de BAOs é uma régua padrão
- Como há o “anel de bárions”, prevê-se que, em média, a  $\sim 150$  Mpc de uma galáxia deve haver um excesso de galáxias!



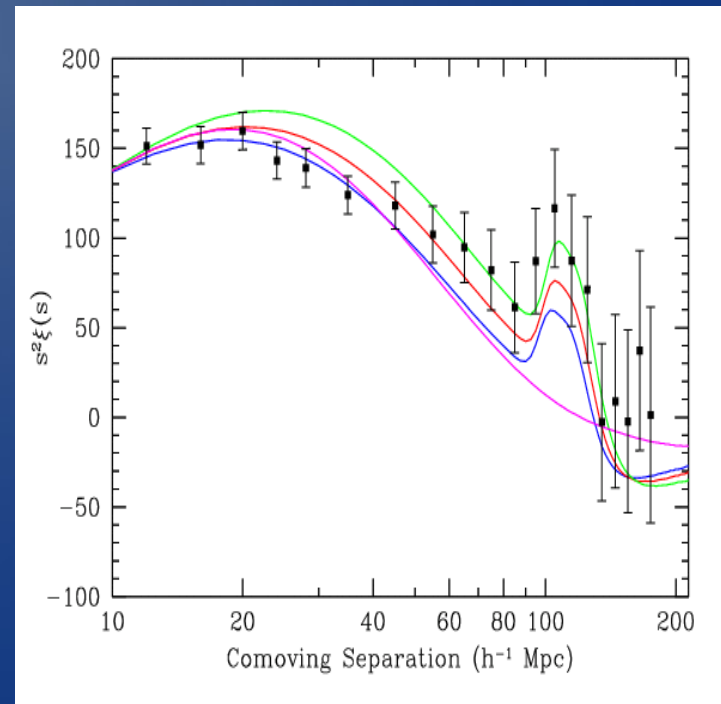
**A dependência do tamanho angular de BAOs com  $z$  depende fortemente das propriedades da ME e da EE**

# A escala de BAOs está impressa na distribuição de galáxias

## BAOs radiais e transversais



## Detecção de BAO transversal no SDSS (Eisenstein et al. 2005)



A variação do tamanho aparente da régua padrão com  $z$  depende fortemente da cosmologia e das propriedades da EE



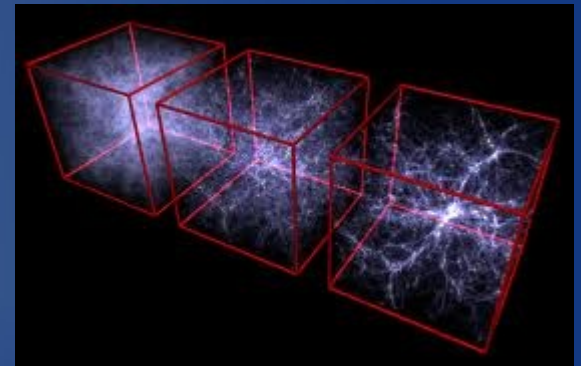
# Testes cosmológicos

- A gravidade afeta a expansão do universo

$$H(z) = H_0 [\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_\lambda + \Omega_k (1+z)^2]^{1/2} \quad (\Lambda\text{CDM})$$

- A gravidade afeta a formação e evolução das estruturas

$$\ddot{\delta}_k + 2\frac{\dot{a}}{a}\dot{\delta}_k = 4\pi G\bar{\rho}\delta_k$$

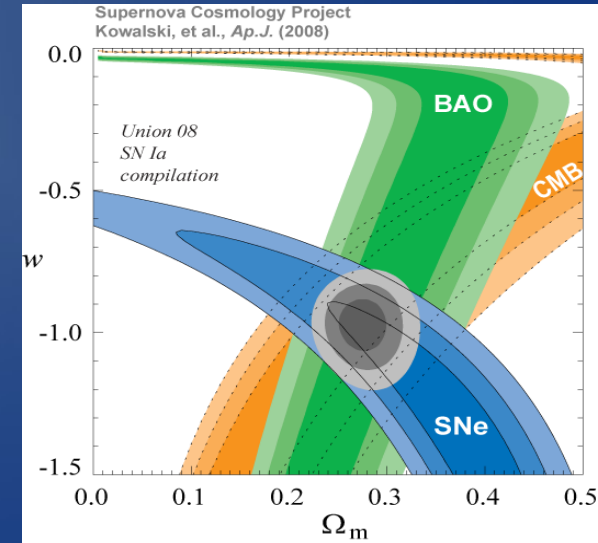
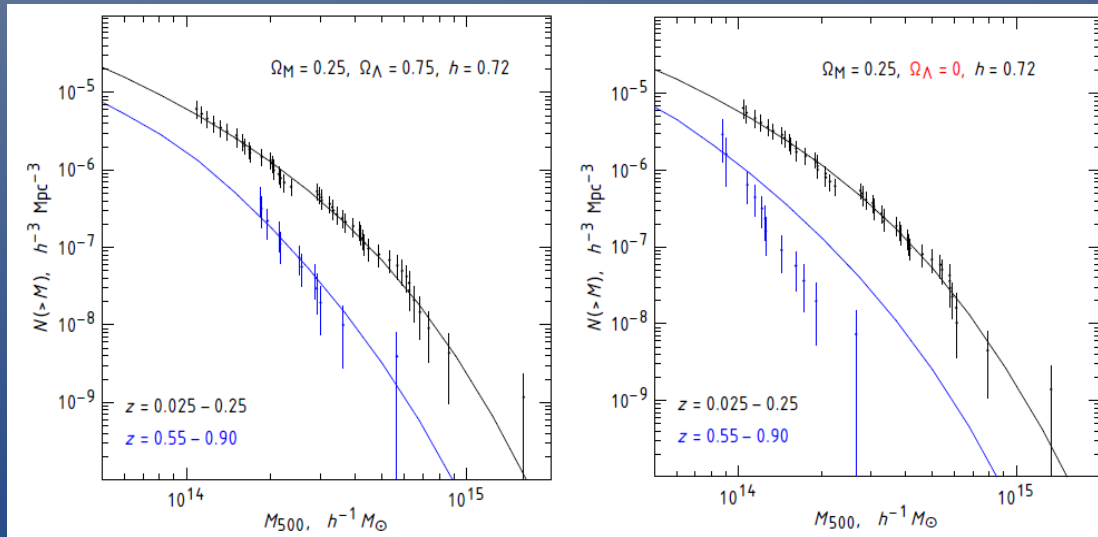
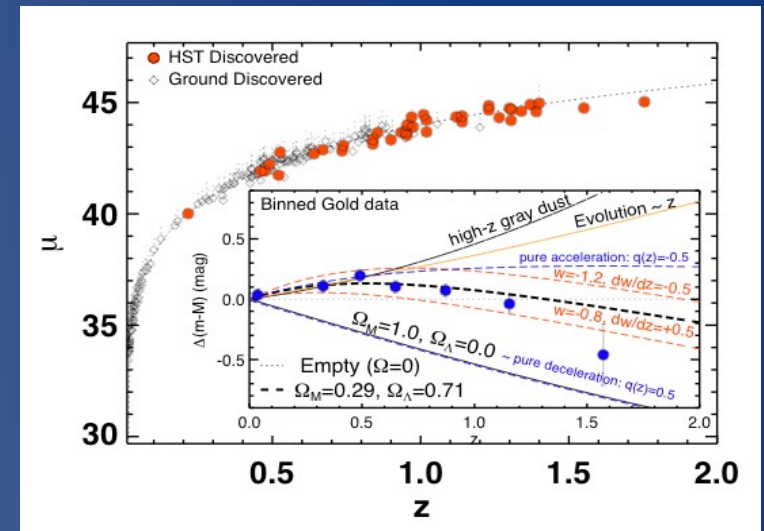


- *O estudo dos dois efeitos combinados permite estudar a natureza da energia escura e testar a teoria da gravitação*

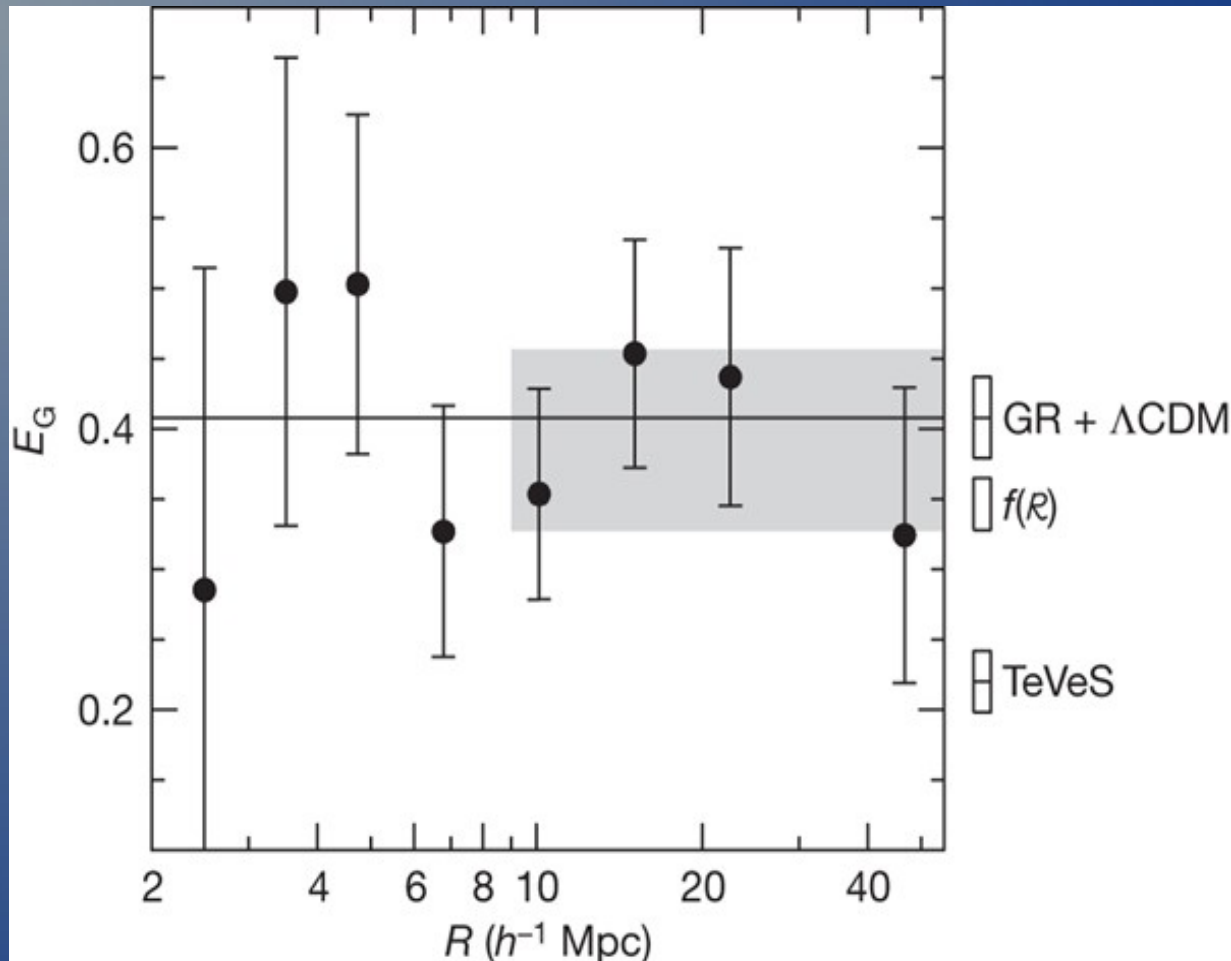
# A natureza da Energia Escura

Dados consistentes com constante cosmológica

- Evolui? Depende de  $z$ ?
- É homogênea/isotrópica?
- ...



# Comparação de vínculos observacionais com predições da teoria da relatividade geral e teorias de gravitação modificada



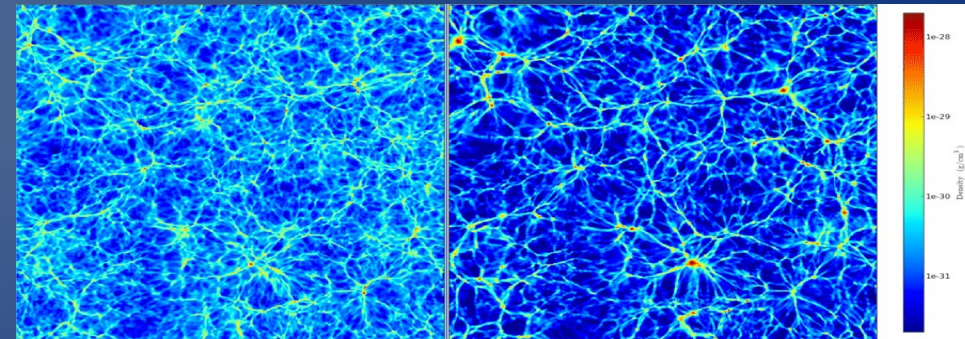
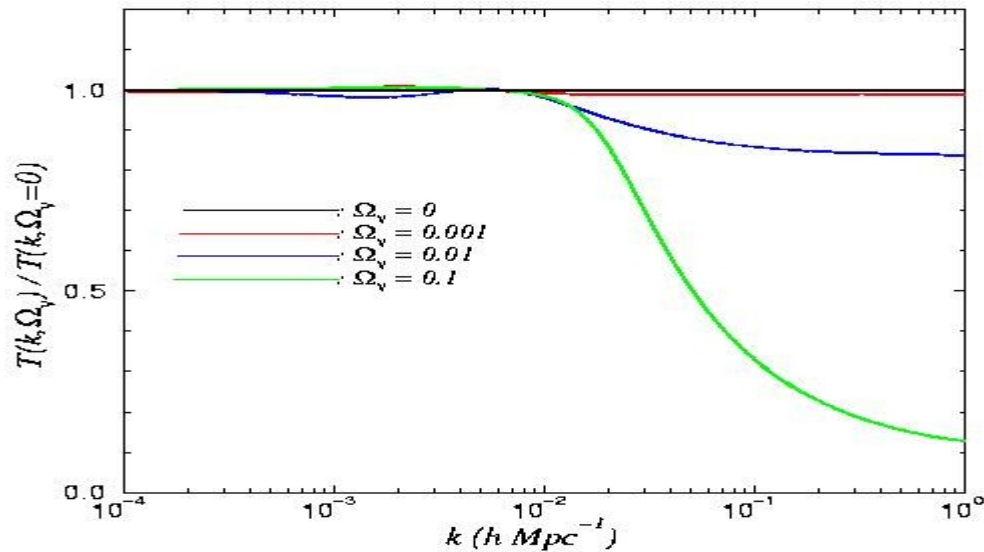


# A massa dos neutrinos

- Neutrinos: matéria escura quente – são relativísticos quando se desacoplam
- Como consequência, destroem pequenas flutuações de densidade (“free streaming”):



$$P(k) = A k^n T^2(k)$$



$$\frac{\Delta P(k)}{P(k)} = -8 \frac{\Omega_\nu}{\Omega_m} \quad (\text{Hu et al. 1998})$$

$$0.05 \text{ eV} < M_\nu < 0.28 \text{ eV}$$

(Thomas, Abdalla, Lahav 2010, 2011)

# Evolução de galáxias

- Como as galáxias se formam e evoluem?
- Como os buracos negros supermassivos se formam, evoluem e afetam a evolução das galáxias hospedeiras?

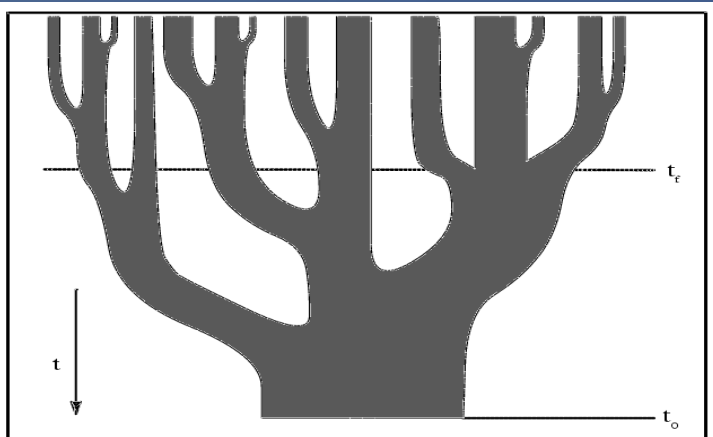
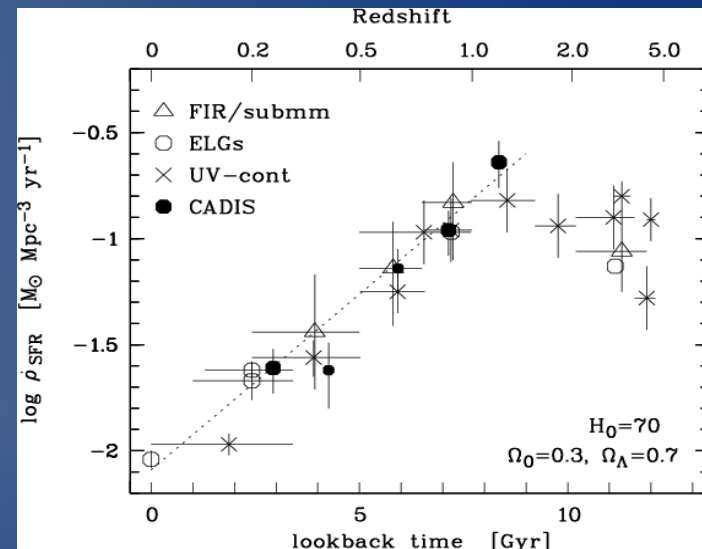
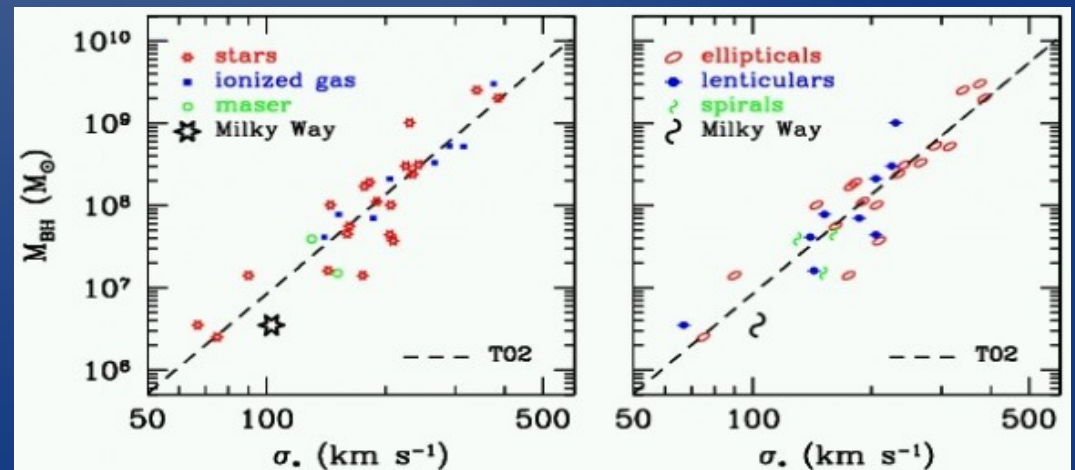


Figure 6. A schematic representation of a "merger tree" depicting the growth of a halo as the result of a series of mergers. Time increases from top to bottom in this figure and the widths of the branches of the tree represent the masses of the individual parent halos. Slicing through the tree horizontally gives the distribution of masses in the parent halos at a given time. The present time  $t_0$  and the formation time  $t_f$  are marked by horizontal lines, where the formation time is defined as the time at which a parent halo containing in excess of half of the mass of the final halo was first created.

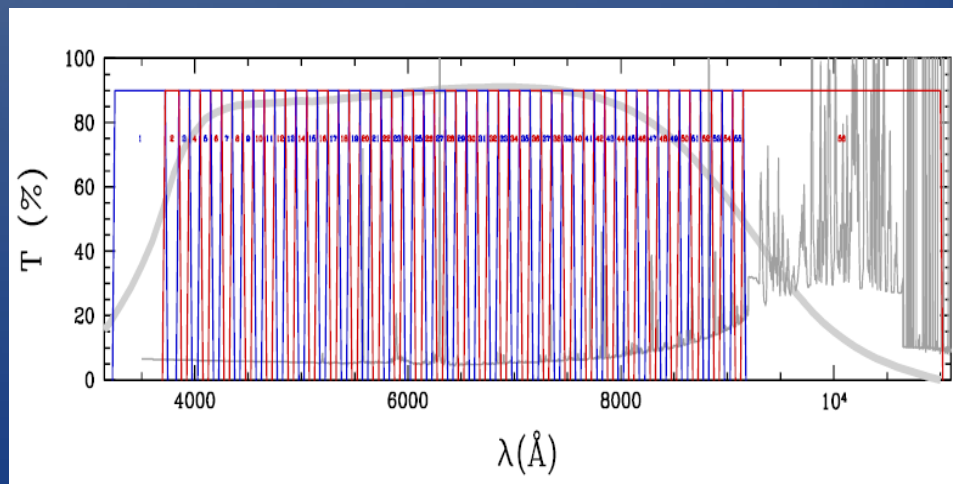




# JPAS

## Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey

- Um novo conceito de levantamento:
- vamos observar  $\sim 8000$  graus quadrados em 56 filtros estreitos ( $I < 22.5$ ) a fotometria corresponde a um espectro de baixa resolução!
- poderemos medir redshifts fotométricos para mais de 100 milhões de galáxias com precisão  $\sim 0.003(1+z)$
- Vai medir BAO radial e transversal
- Aglomerados, SN, lentes fracas, quasares, evolução de galáxias, estrelas, asteróides...





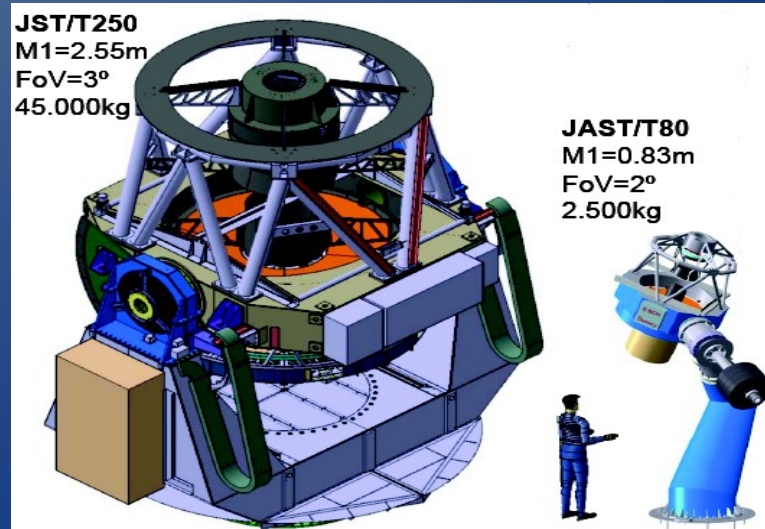
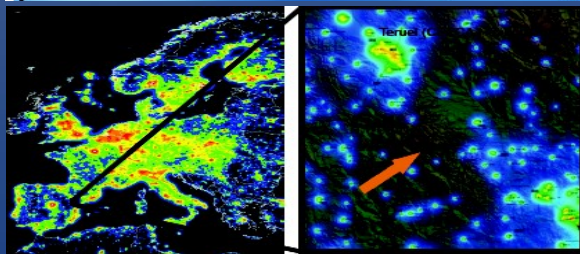
# JPAS

## Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey

- Colaboração entre Brasil e Espanha:
- Brasil: ON, CBPF, UFRJ, IAG, IF, INPE, UFRGS, UFSC,...
- Espanha: IAA, CEFCO, IAC, UCM,...
- JAO: Javalambre Astrophysical Observatory, Teruel, Aragón

### WHERE?

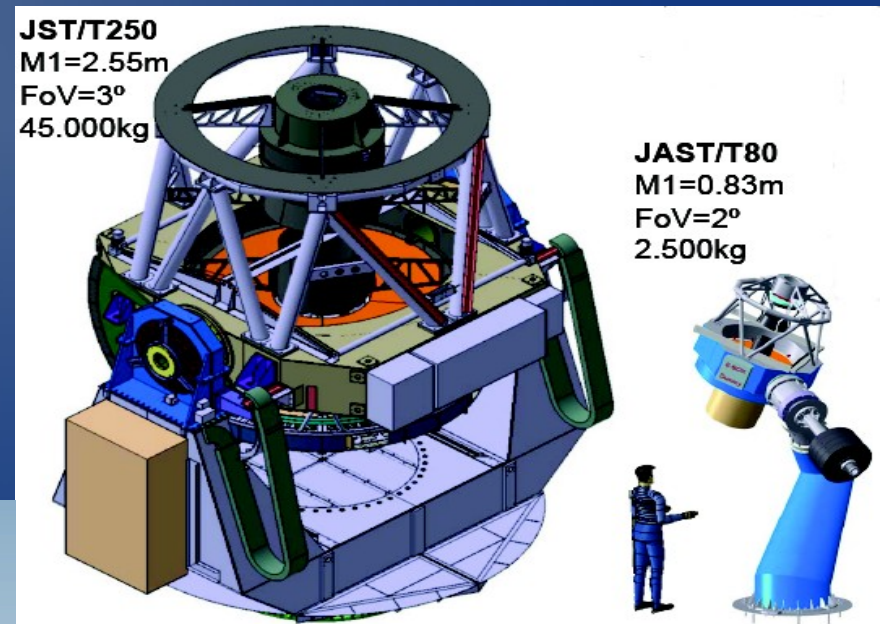
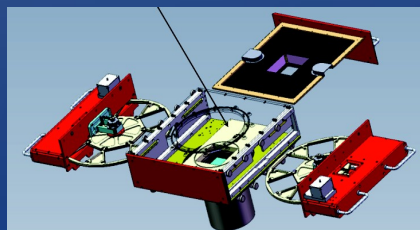
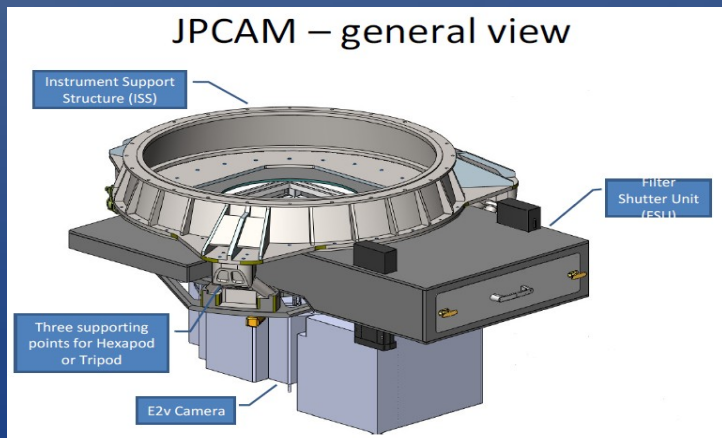
Sierra de Javalambre, Teruel, Spain  
Site testing since 2007 @ Moles et al.  
(2010), PASP, Vol. 122, 889, 363



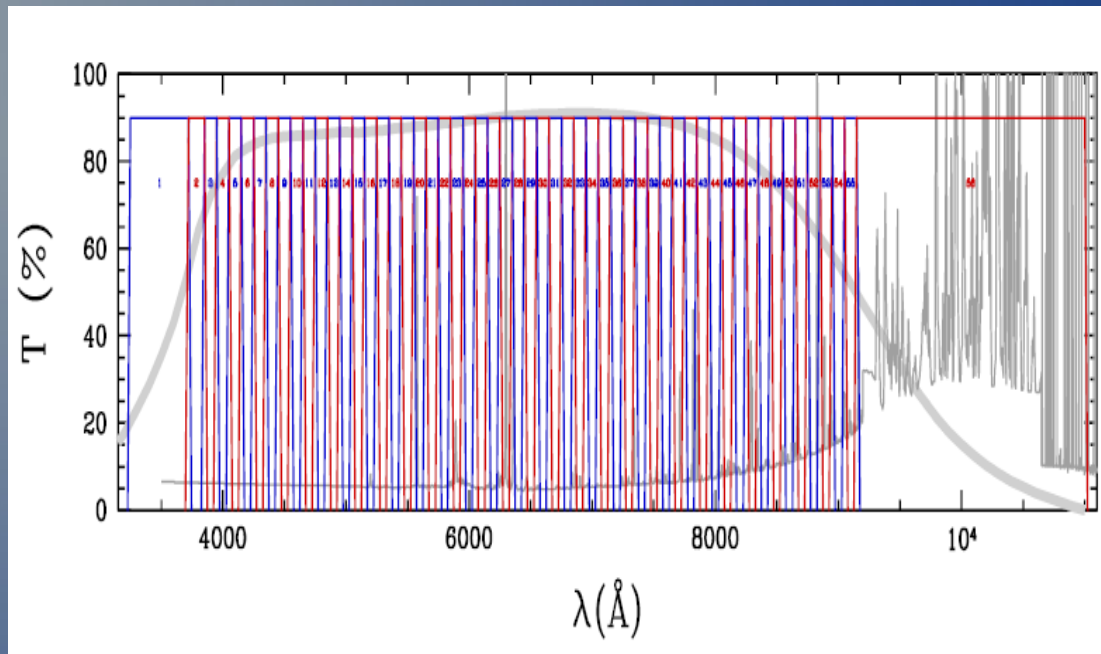
# JPAS

## Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey

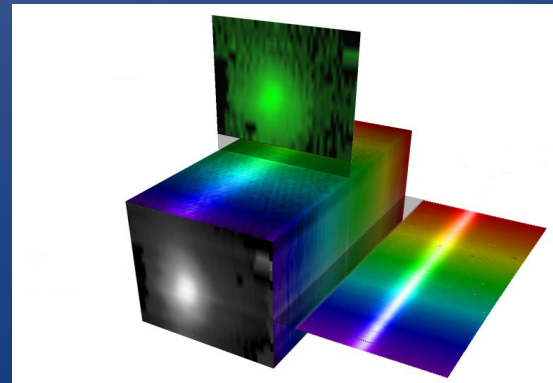
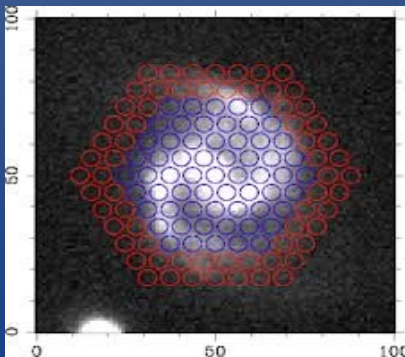
- Telescópio de 2.5m de diâmetro+ câmera de 5 graus quadrados com 1.2 Gpixel
- Telescópio de 80cm + câmera de 2 graus quadrados para calibração



# 56 filtros- precisão em photo-z: $\sim 0.003(1+z)$

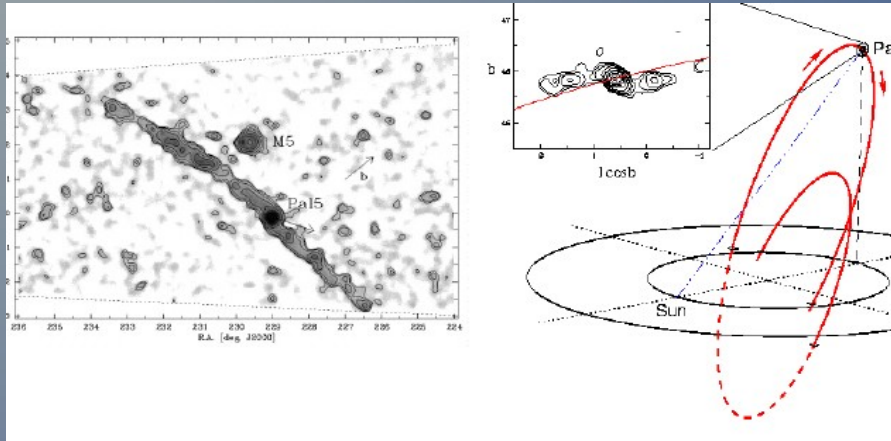


- JPAS: vai produzir um espectro de baixa resolução para todos os *pixels* de uma imagem!!!
- Vai permitir *IFU science*!

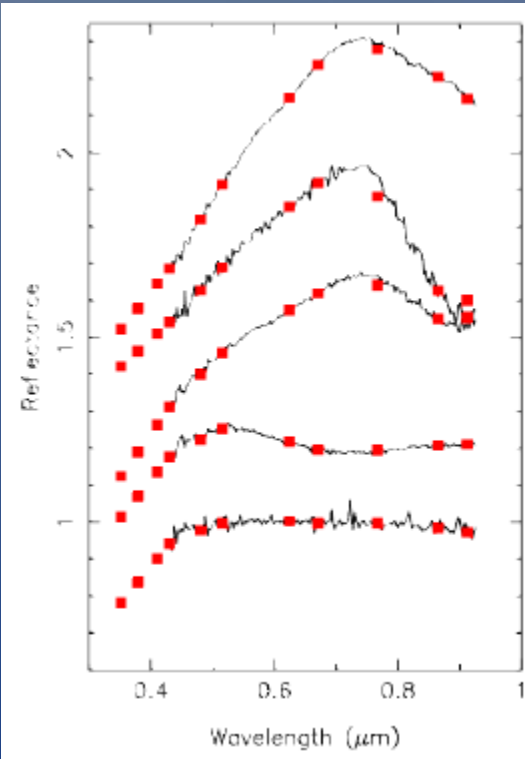




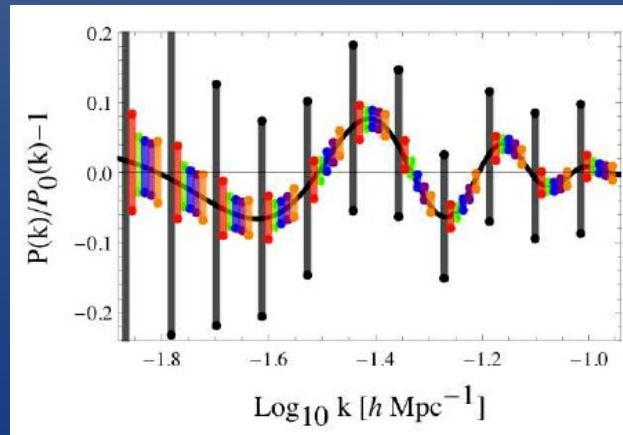
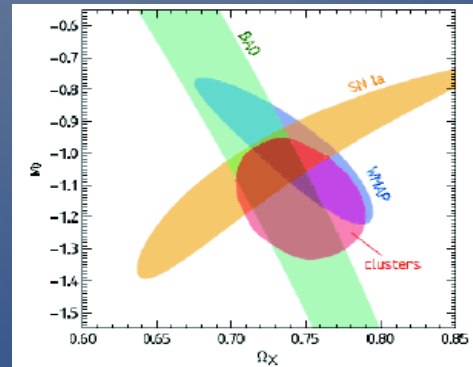
# Formação da Via Láctea pela observação de estrelas do halo



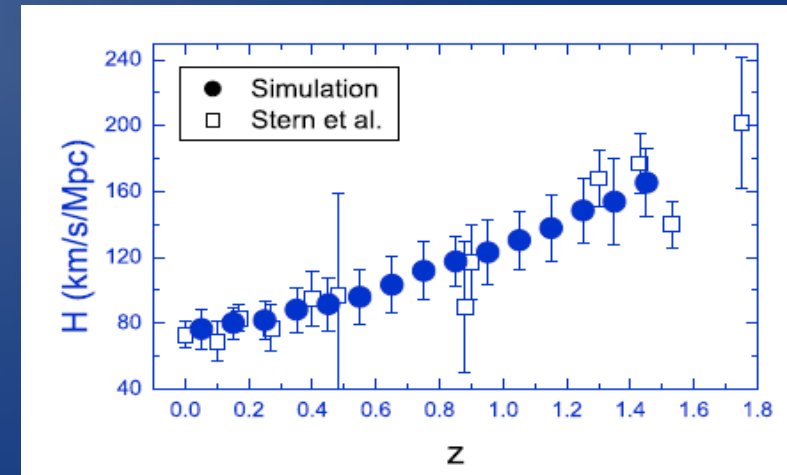
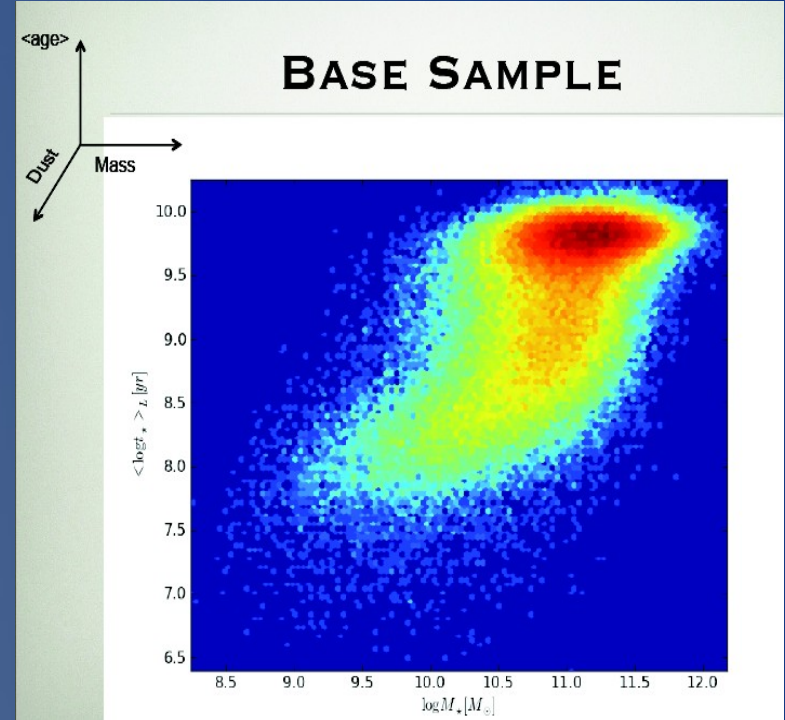
# Pequenos corpos no Sistema Solar

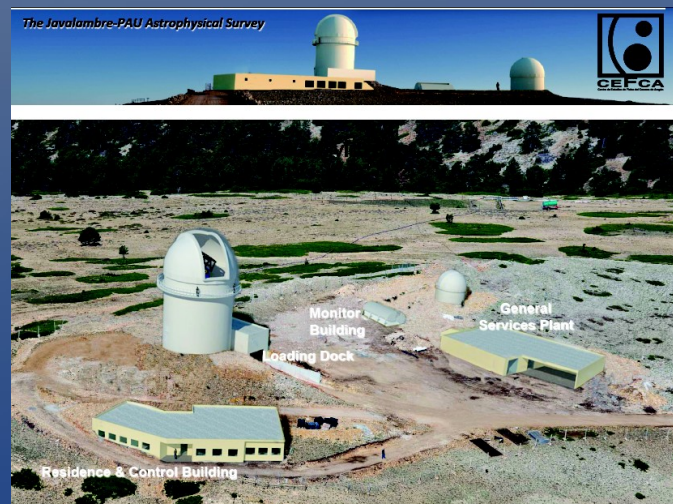


# cosmologia



# Evolução de galáxias





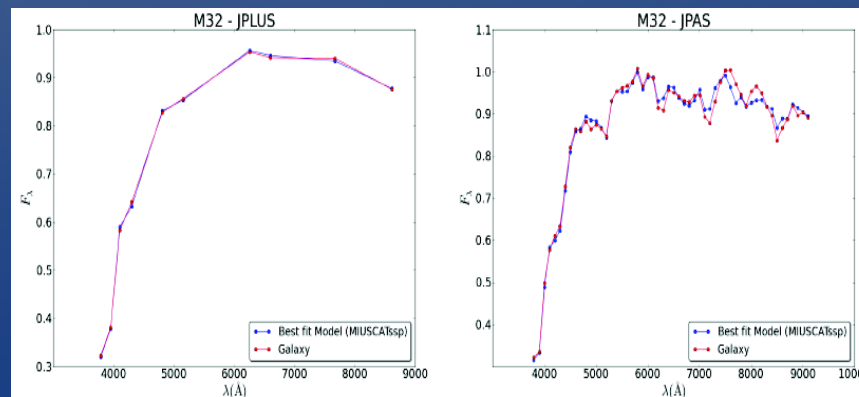
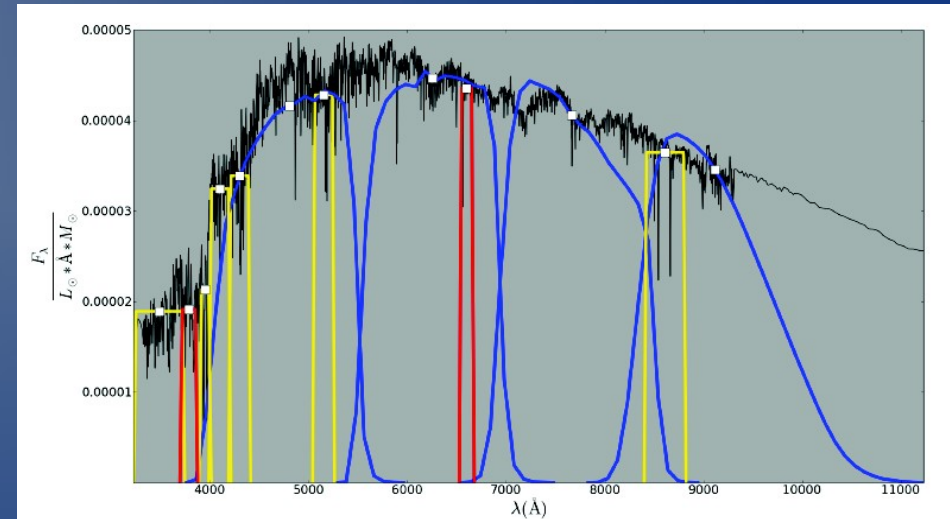
## Quando?

- T80 – setembro 2012  
J-PLUS: agosto 2013
- T250 – junho 2013  
JCam: agosto 2014  
Levantamento principal:  
2015 - 2021

# J-PLUS/T80

## The Javalambre Photometric Local Universe Survey

- Motivação:
- Prover a calibração fotométrica para o JPAS
- Testar o sistema científico, tecnológico e gerencial do JPAS
- Início: agosto 2013
- Tempo de execução: 2-2,5 anos
- 12 filtros: 4 do SDSS + 8 estreitos/intermediários
- 5000 graus quadrados, AB~22-23 (S/N >5)





# SMAPS

## Southern massive astrophysical panchromatic survey

- Extensão do JPAS para o hemisfério sul
- Ideia: clonar telescópios, câmeras, etc do JPAS e instalá-los em Cerro Tololo (Chile)
- Custo < US\$30M
- SMAPS+JPAS: primeiro levantamento óptico de todo o céu!
- *SMAPS+JPAS: primeiro levantamento tipo "IFU" de todo o céu!*
- [www.fma.if.usp.br/smaps](http://www.fma.if.usp.br/smaps)

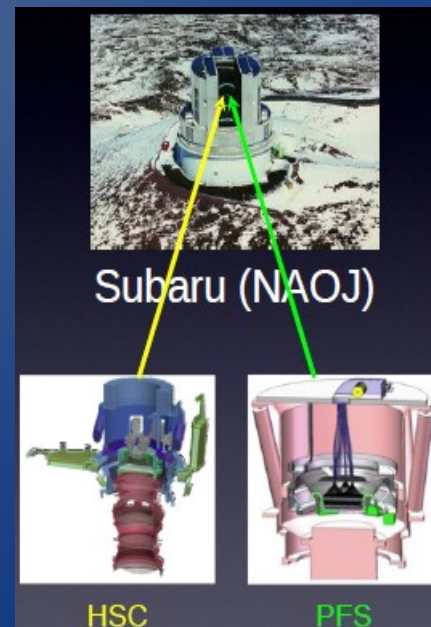
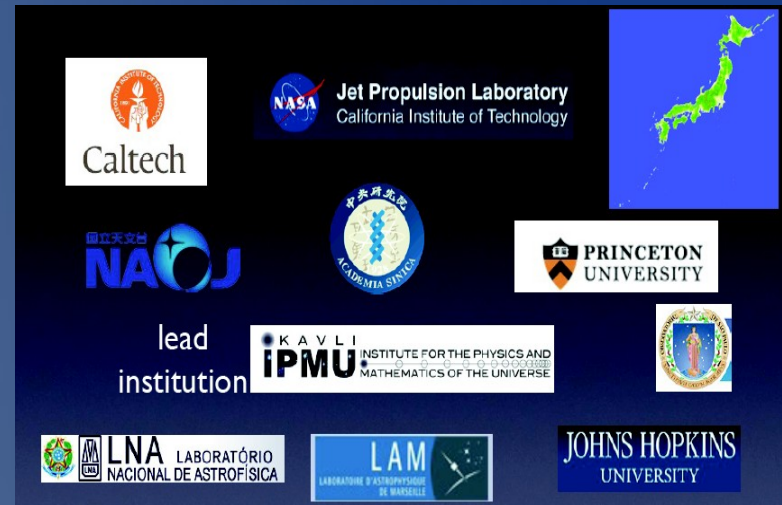


# PFS/SuMIRe

## Prime Focus Spectrograph for the Subaru Measurement of Images and Redshifts survey



- Sucessor do projeto WFMOS, no Gemini
- Liderado por Hitoshi Murayama Kavli IPMU (U. Tokyo)
- + Taiwan, Princeton, Caltech, JPL, Johns Hopkins, LAM/Marseille, Brasil (USP, LNA, ON...)
- Projeto estratégico para a astronomia japonesa
- Período: 2017-2023
- PFS: será o melhor espectrógrafo dos anos 20!
- Brasil- a destacar:
- Tecnologia: subsistema de fibras ópticas (patentes!)
- Ciência: potencial desta colaboração científica

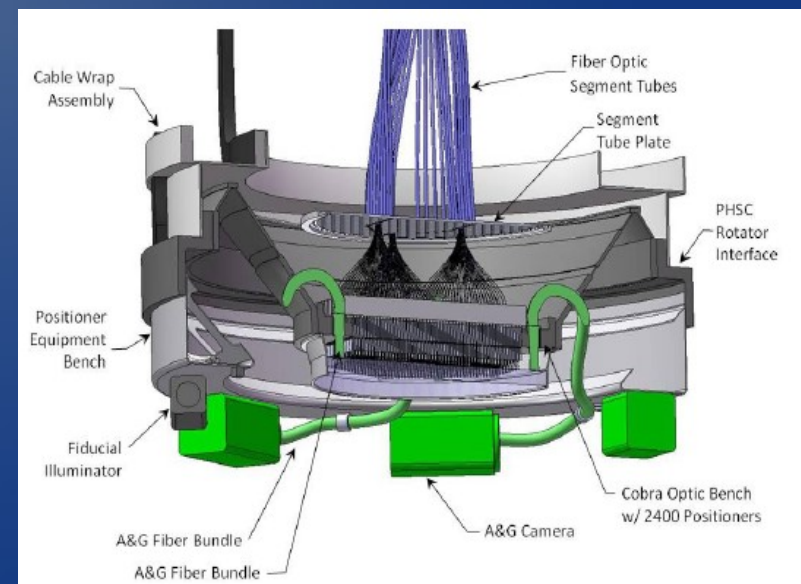
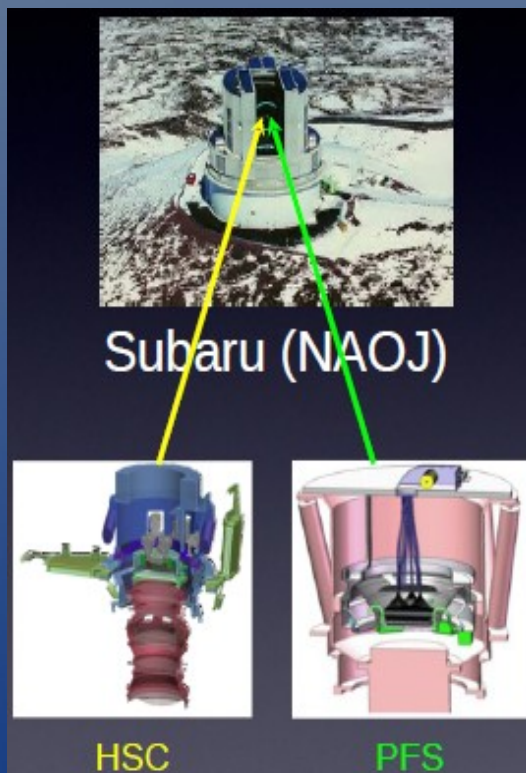
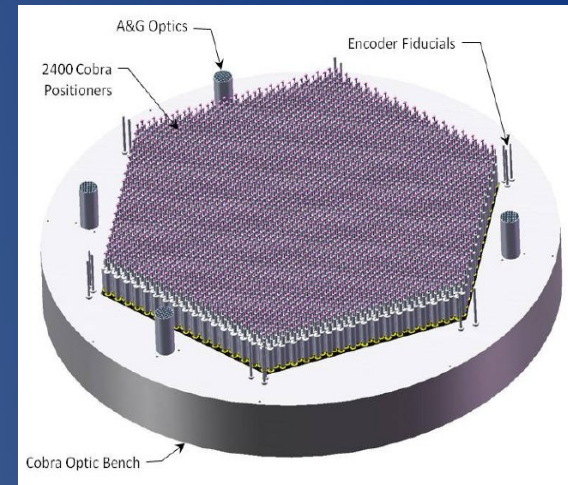


# PFS/SuMIRe

## Prime Focus Spectrograph for the Subaru Measurement of Images and Redshifts survey



- 2400 fibras, num telescópio com campo de 1.3 graus de diâmetro
- Resposta: 0.38 – 1.3 microns,  $R \sim 3000$
- ~500 mil galáxias com  $1 < z < 2$ , 30 mil com  $3 < z < 7$





Fiber cables  
(Route is TBD)

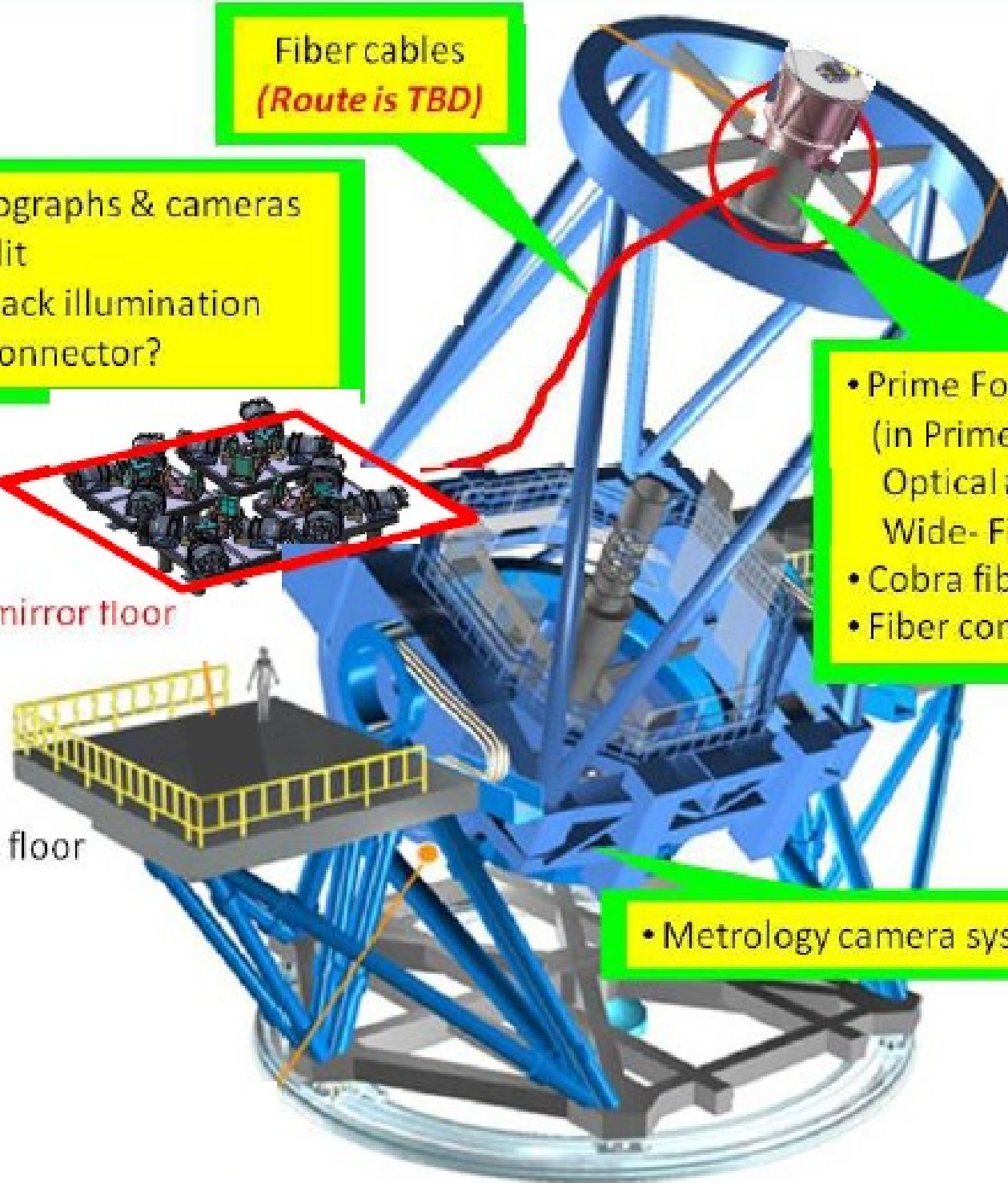
- Spectrographs & cameras
- Fiber slit
- Fiber back illumination
- Fiber connector?

- Prime Focus Instrument (PFI)  
(in Prime Focus Unit for  
Optical #2 [POpt2] with HSC  
Wide- Field Corrector [WFC])
- Cobra fiber positioner array
- Fiber connector

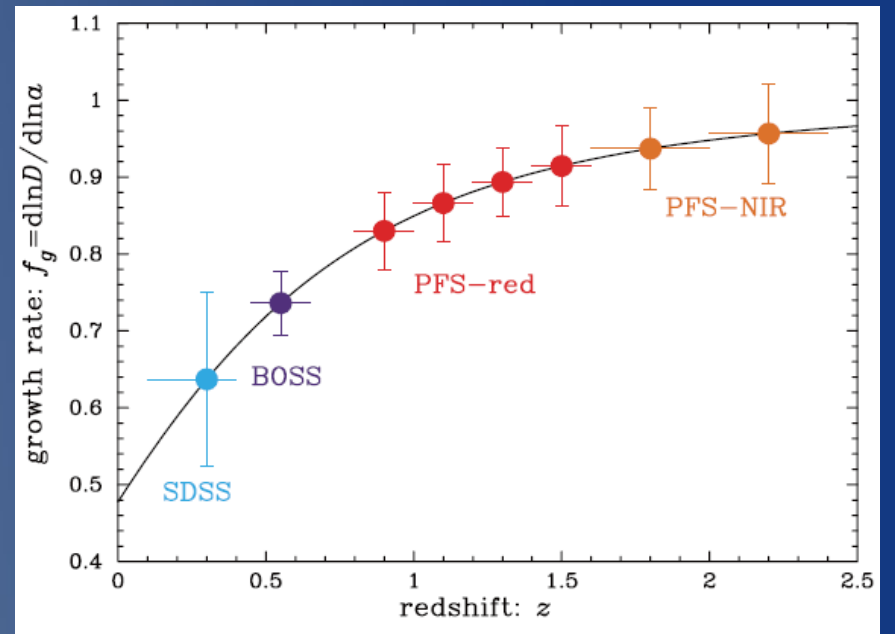
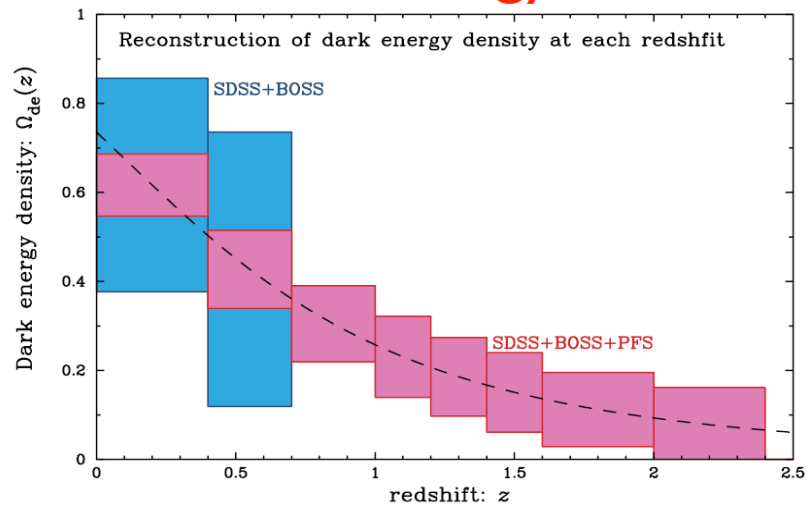
Tertiary mirror floor

Nasmyth floor  
(IR-side)

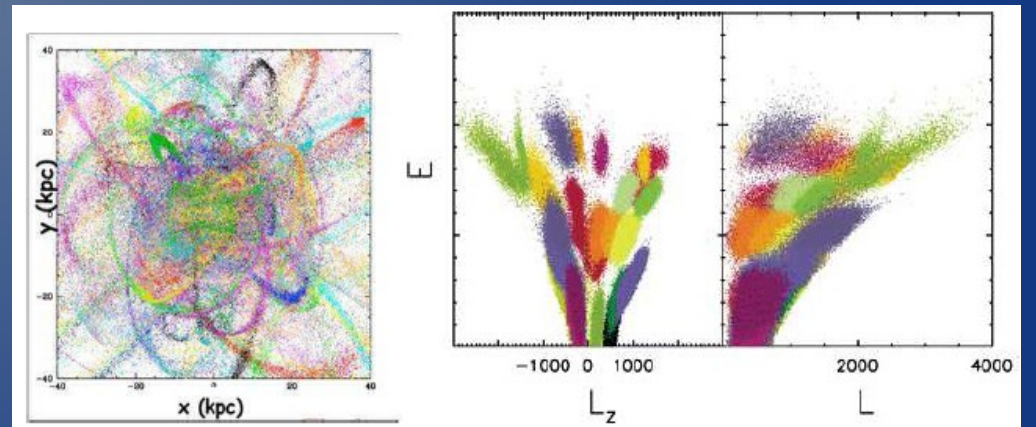
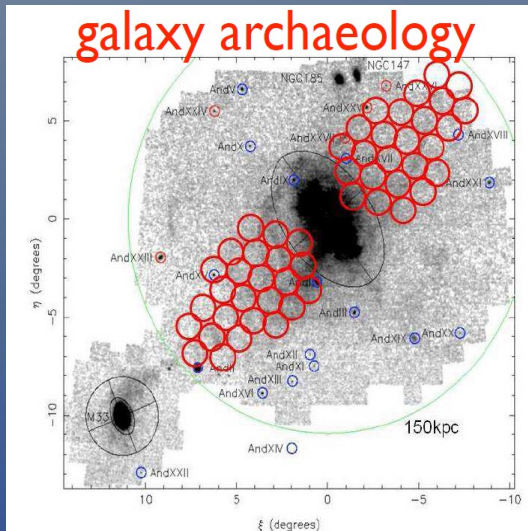
- Metrology camera system



# cosmology



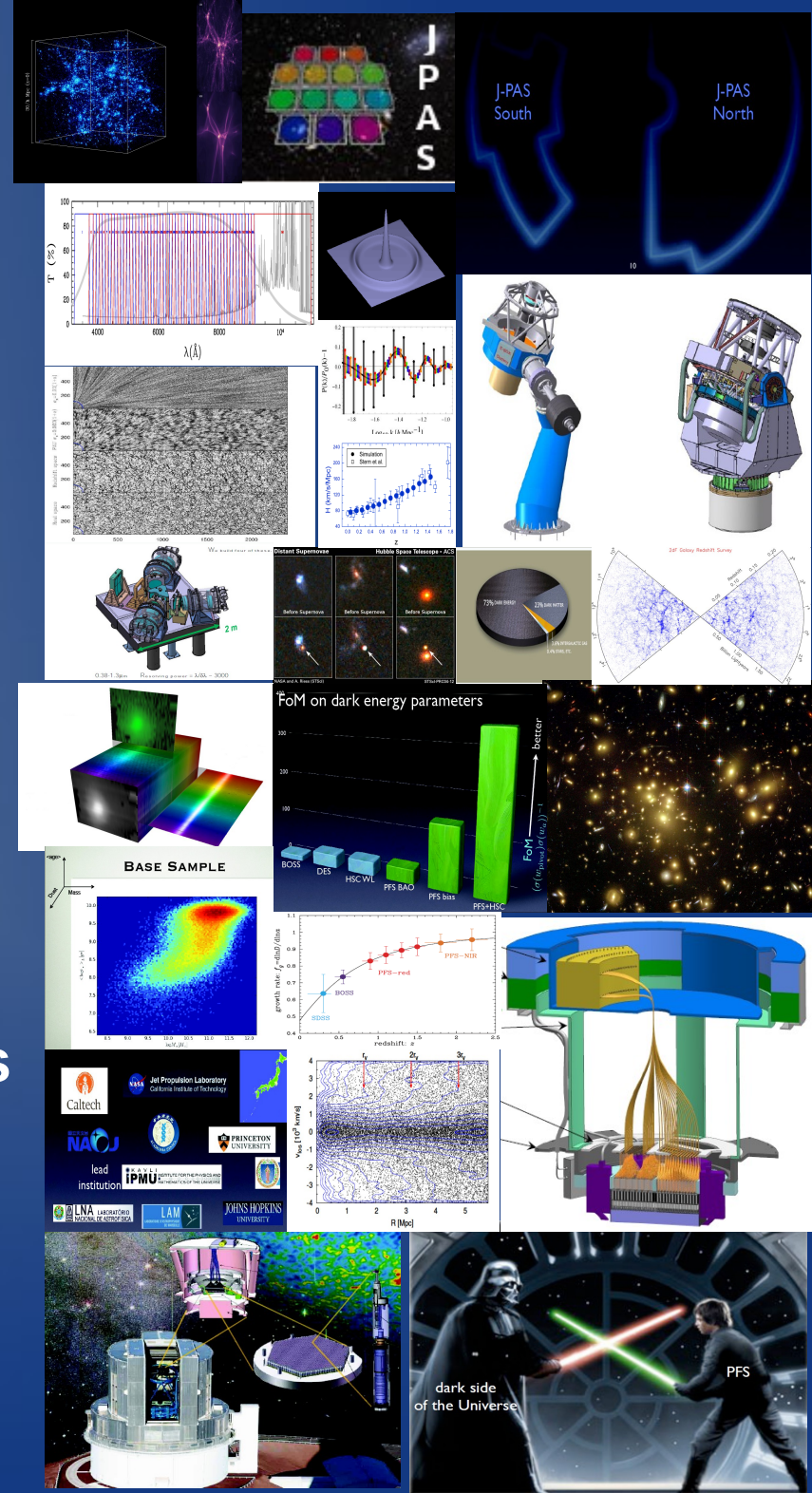
# galaxy archaeology



# Sumário:

- Levantamentos de galáxias são uma das mais importantes ferramentas astrofísicas da atualidade
- Permitem um grande leque de ciências: sistema solar, Galáxia, galáxias, cosmologia, objetos raros...
- *(potencial de descoberta de coisas novas!)*
- Oportunidades acadêmicas: projetos de ponta em colaborações com instituições de ponta
- Oportunidades tecnológicas: projetos tecnologicamente desafiadores!

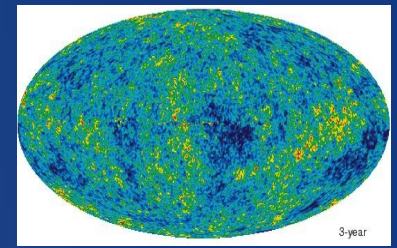
[http://fma.if.usp.br/cosmo/Nucleo\\_de\\_Cosmologia\\_da\\_USP.html](http://fma.if.usp.br/cosmo/Nucleo_de_Cosmologia_da_USP.html)





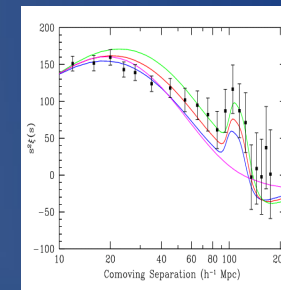
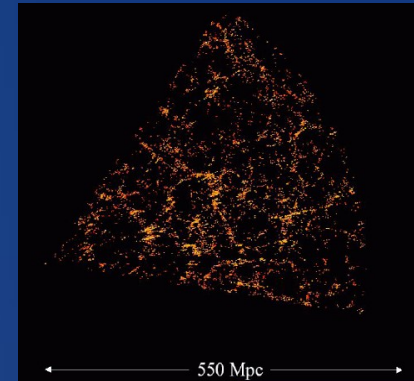
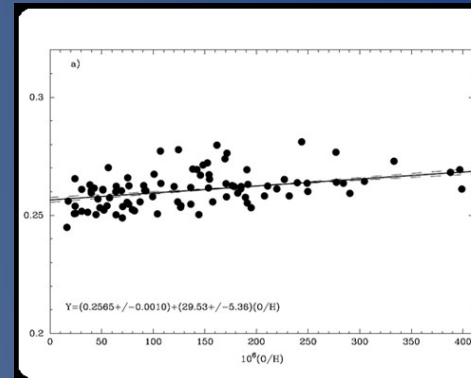


# O paradigma cosmológico @2013: *universo dominado por ME e EE*



Modelo sustentado por uma grande variedade de observações:

- Radiação cósmica de fundo
- Distribuição de galáxias
- Abundância dos elementos leves
- Supernovas Ia
- Lentes gravitacionais
- Emissão de raios-X de aglomerados de galáxias
- Oscilações acústicas de bárions
- ...



*Mas o que é a ME? O que é a EE?*

# O que é um levantamento de galáxias?

- Para se construir mapas 3-D da distribuição de galáxias são necessários “espectros” para se determinar as distâncias
- Adicionalmente: o “espectro” necessário para se estimar as distâncias é útil para muitas outras ciências (evolução de galáxias...)

