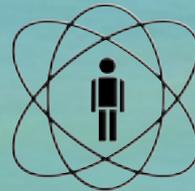


CURSO DE COSMOLOGIA

2013B

MARTÍN MAKLER
CBPF

ICRA



CBPF

MCTI



Ementa curso de Cosmologia

Parte I

Fenomenologia e visão geral da cosmologia. Da expansão do Universo à formação não-linear de estruturas.

Parte II

O modelo de Friedmann: geometria, dinâmica e observações

Parte III

História térmica do Universo

Parte IV

Evolução linear de perturbações e formação de estruturas

Parte V

Radiação cósmica de fundo

Parte VI

Evolução não-linear de estruturas

Parte VII

Lentes Gravitacionais

Parte VIII

Tópicos de cosmologia observacional

Parte IX

Apresentação de trabalhos de fim do curso

Método de avaliação: listas de exercício (60%) e trabalho final (40%)

Cosmologia

O estudo da estrutura,
evolução e origem do
Universo

Fenomenologia





Fenomenologia

Universo do Cosmólogo Teórico:
Homogêneo e isotrópico
Dominado por matéria/energia escura



Fenomenologia

Universo do Cosmólogo Teórico:
Homogêneo e isotrópico
Dominado por matéria/energia escura

Universo do Astrônomo:
Galáxias, gás, estrelas, etc.





Fenomenologia

Universo do Cosmólogo Teórico:
Homogêneo e isotrópico
Dominado por matéria/energia escura

Universo do Astrônomo:
Galáxias, gás, estrelas, etc.



Fenomenologia

Universo do Cosmólogo Teórico:
Homogêneo e isotrópico
Dominado por matéria/energia escura

Universo do Astrônomo:
Galáxias, gás, estrelas, etc.

- *Ponte entre teoria e observação*



Fenomenologia

Universo do Cosmólogo Teórico:
Homogêneo e isotrópico
Dominado por matéria/energia escura

Universo do Astrônomo:
Galáxias, gás, estrelas, etc.

- *Ponte entre teoria e observação*
- *Análise estatística*



Fenomenologia

Universo do Cosmólogo Teórico:
Homogêneo e isotrópico
Dominado por matéria/energia escura

Universo do Astrônomo:
Galáxias, gás, estrelas, etc.

- *Ponte entre teoria e observação*
- **Análise estatística**
- **Modelagem, incluindo todos os processos físicos (simulações, aproximações)**



Fenomenologia

Universo do Cosmólogo Teórico:
Homogêneo e isotrópico
Dominado por matéria/energia escura

Universo do Astrônomo:
Galáxias, gás, estrelas, etc.

- *Ponte entre teoria e observação*
- *Análise estatística*
- *Modelagem, incluindo todos os processos físicos (simulações, aproximações)*
- *Observáveis: onde posso esperar detectar um dado fenômeno?*



Fenomenologia

Universo do Cosmólogo Teórico:
Homogêneo e isotrópico
Dominado por matéria/energia escura

Universo do Astrônomo:
Galáxias, gás, estrelas, etc.

- *Ponte entre teoria e observação*
- *Análise estatística*
- *Modelagem, incluindo todos os processos físicos (simulações, aproximações)*
- *Observáveis: onde posso esperar detectar um dado fenômeno?*
- *Área interdisciplinar*

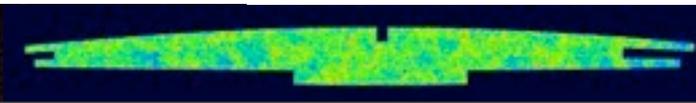
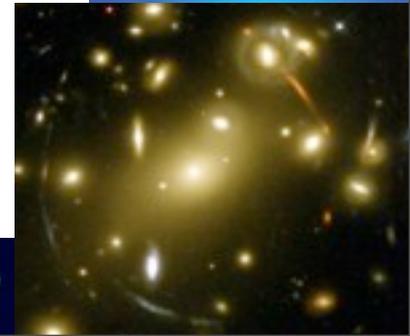
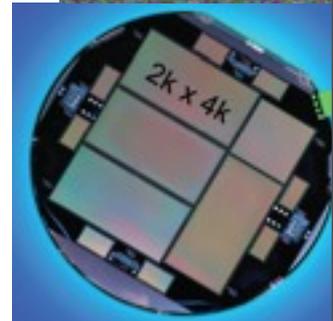
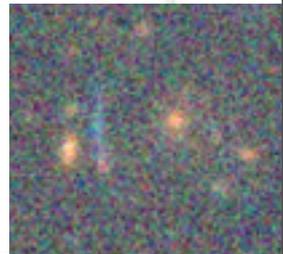
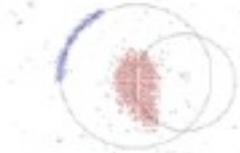
Plano do módulo



Fenomenologia:

conexão entre teoria e observações

- Parte I: Introdução ao Universo
 - A expansão do Universo
 - Matéria escura
 - Estruturas em grandes escalas
- Parte II: O Universo Homogêneo
 - Dinâmica
 - Cinemática
- Parte III: História térmica
- Parte IV: O Universo perturbado
- Parte V: Tópicos



Galáxias

“Traçadores” do Universo



Galáxia espiral



Galáxia elíptica

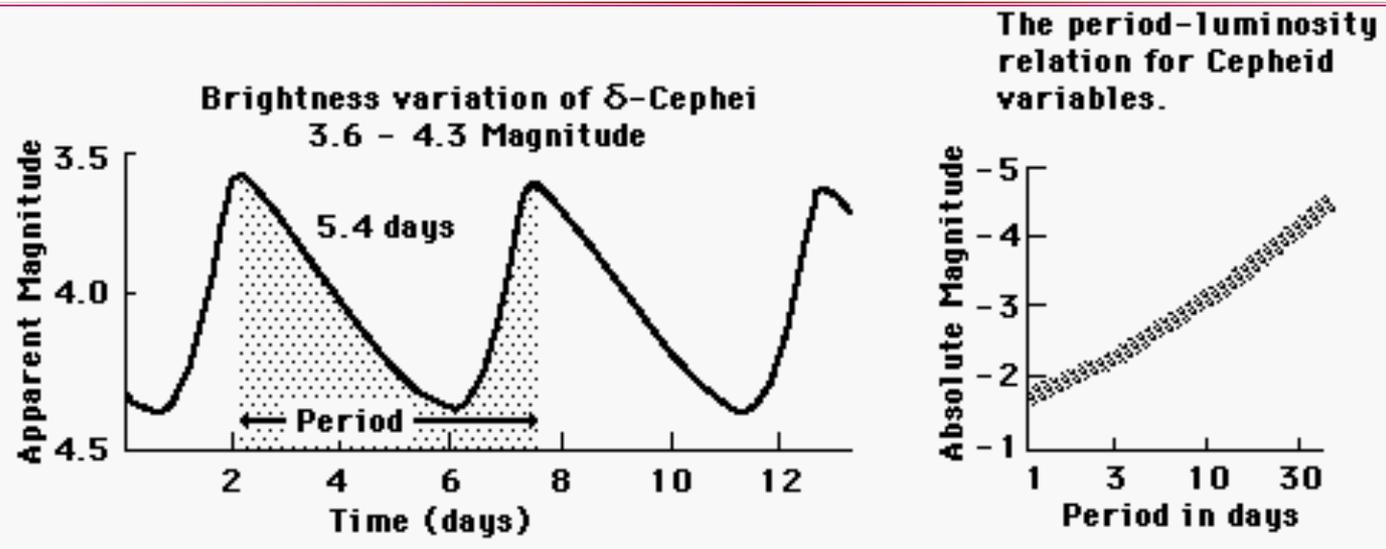


Natureza das Galáxias

- Galileo Galilei (1610): a Via Láctea é formada por estrelas
- Wilhelm Herschel (1785): habitamos uma nebulosa e as outras são externas
- William Parsons (1845): “nebulosas espirais”
- Henrietta Leavitt (1912): relação entre período de estrelas variáveis cefeidas e sua luminosidade intrínseca
- Edwin Hubble (1923): determina a distância da “nebulosa” de Andrômeda (M31), usando uma estrela cefeida



Natureza das Galáxias



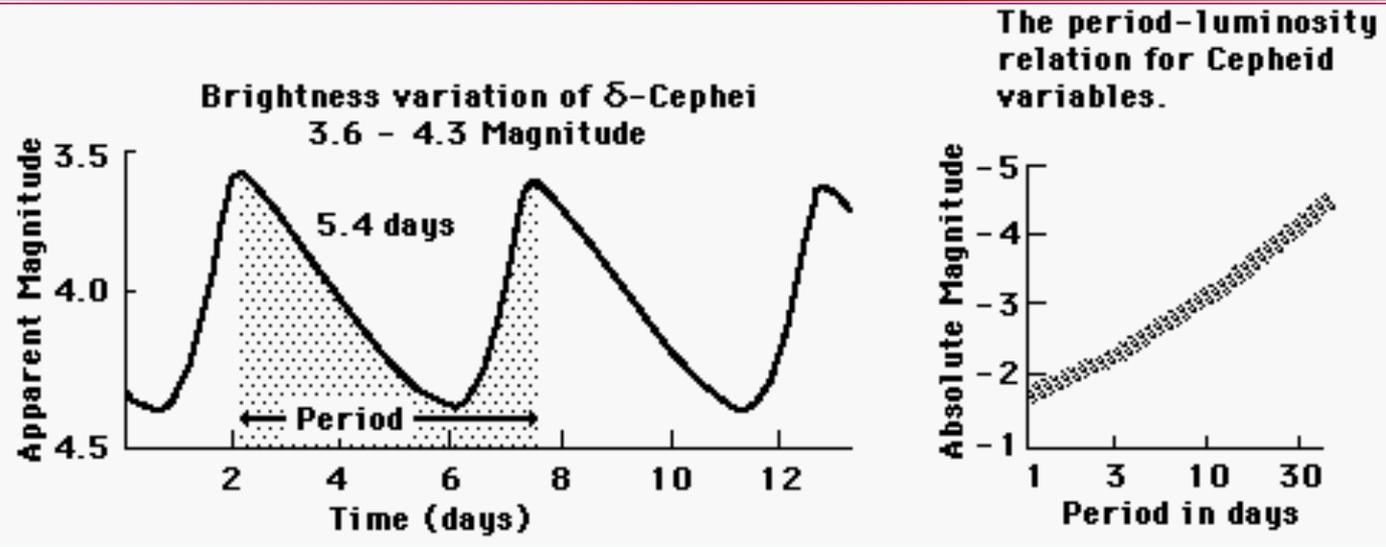
ada

is”

- Henrietta Leavitt (1912): relação entre período de estrelas variáveis cefeidas e sua luminosidade intrínseca
- Edwin Hubble (1923): determina a distância da “nebulosa” de Andrômeda (M31), usando uma estrela cefeida



Natureza das Galáxias



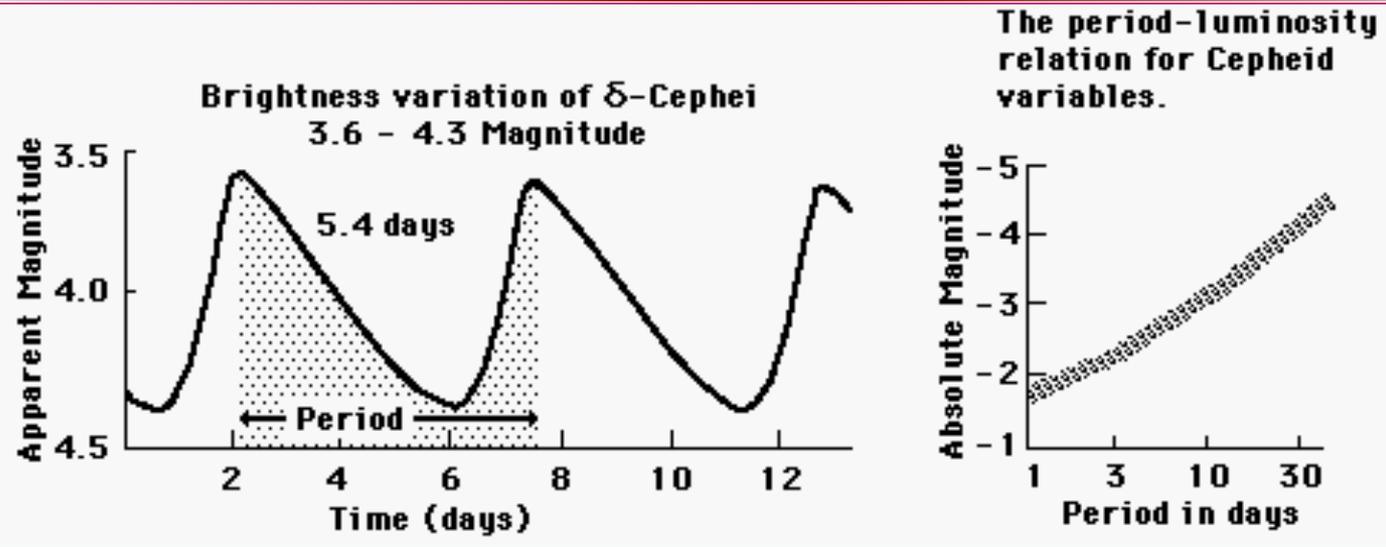
ada

is”

- Henrietta Leavitt (1912): relação entre período de estrelas variáveis cefeidas e sua luminosidade intrínseca



Natureza das Galáxias



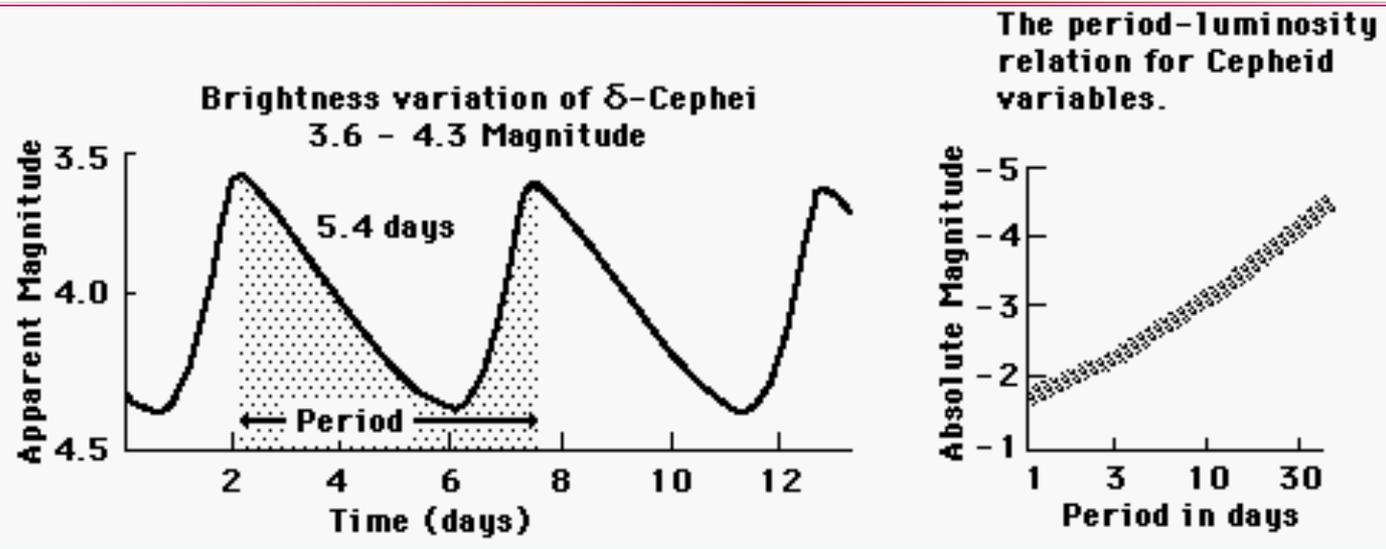
ada

is”

- Henrietta Leavitt (1912): relação entre período de estrelas variáveis cefeidas e sua luminosidade intrínseca



Natureza das Galáxias



ada

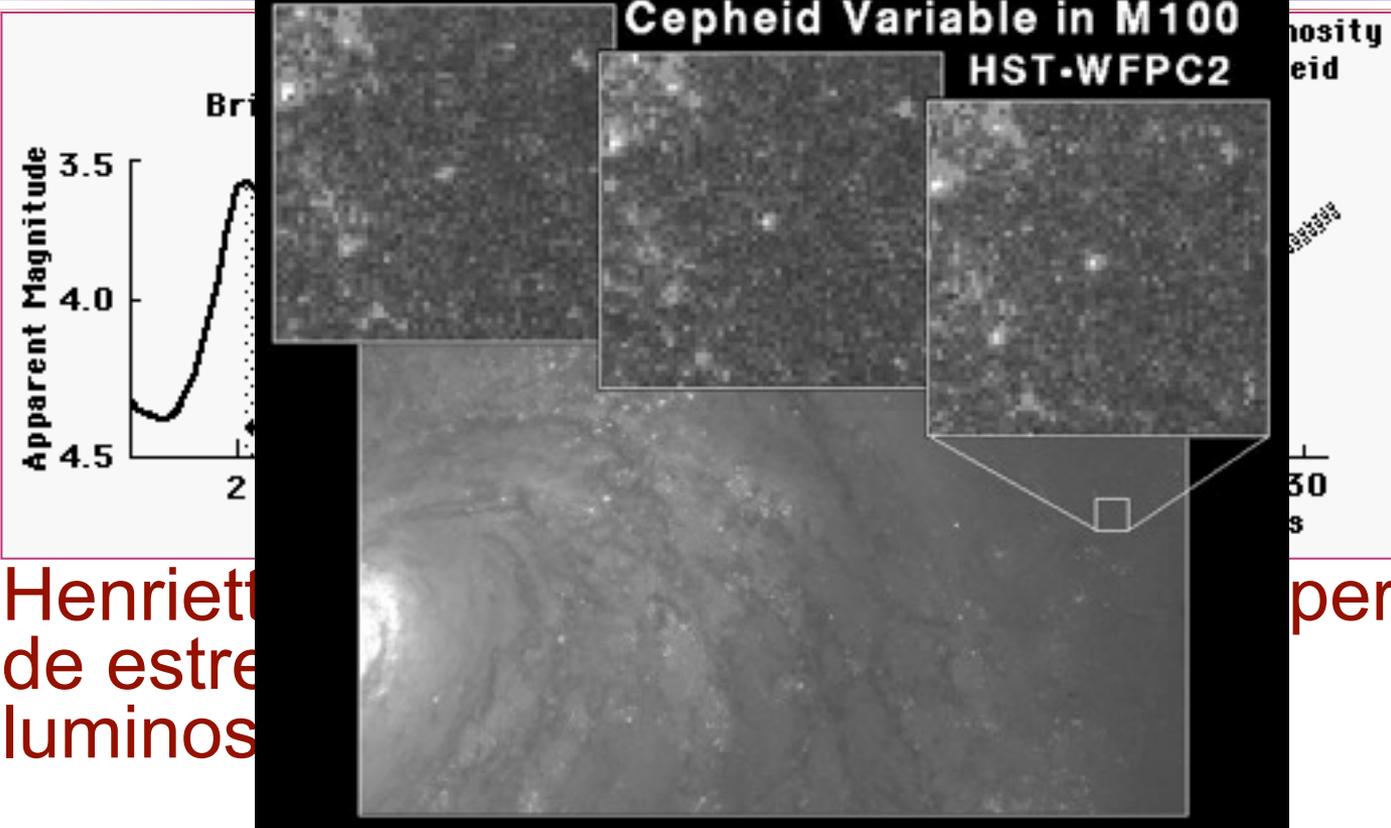
is”

- Henrietta Leavitt (1912): relação entre período de estrelas variáveis cefeidas e sua luminosidade intrínseca
- Edwin Hubble (1923): determina a distância da “nebulosa” de Andrômeda (M31), usando uma estrela cefeida



Natureza das Galáxias

-
-
-
- **Henrietta Swan Leavitt** descobriu a relação entre o período de oscilação e a luminosidade intrínseca das estrelas cefeidas, permitindo a medição de distâncias astronômicas.
- **Edwin Hubble (1923)**: determina a distância da “nebulosa” de Andrômeda (M31), usando uma estrela cefeida.



ada

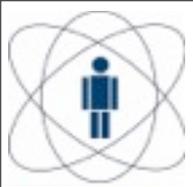
is”

período



O Cosmos Dinâmico

O Universo em Expansão



O Cosmos Dinâmico

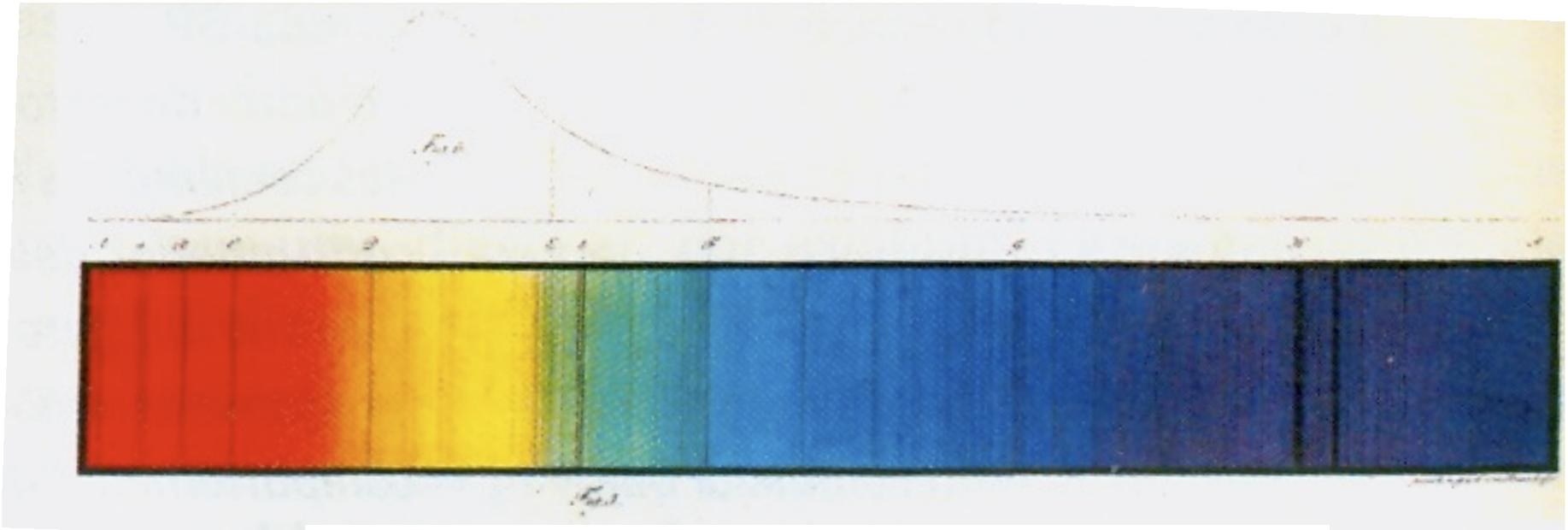
O Universo em Expansão

“O universo não é uma idéia minha.
A minha idéia do Universo é que é uma idéia minha.”

Alberto Caserio



A natureza da luz

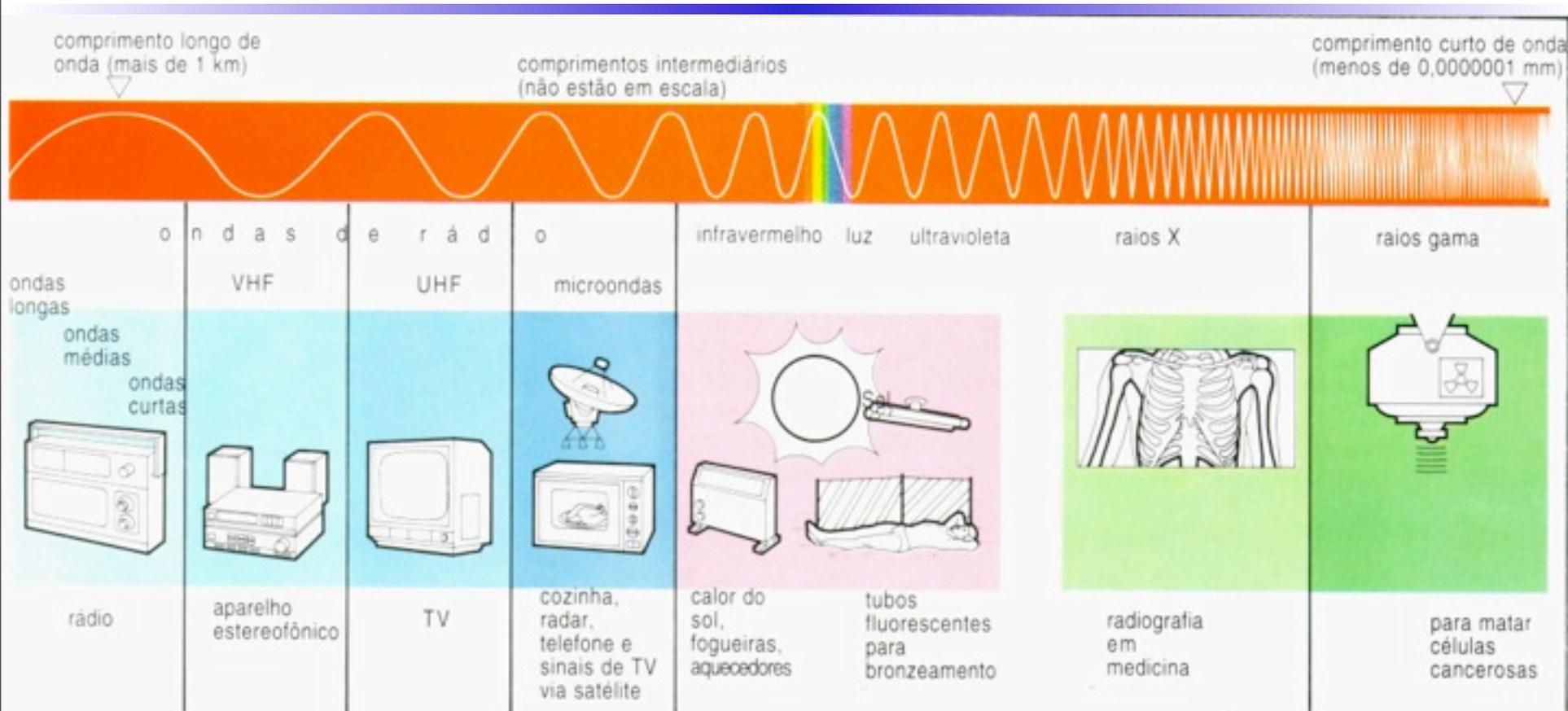


American Institute of Physics

O Espectro do Sol por Joseph von Fraunhofer



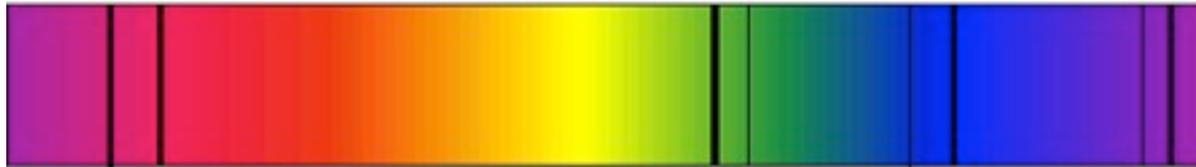
Espectro Eletromagnético



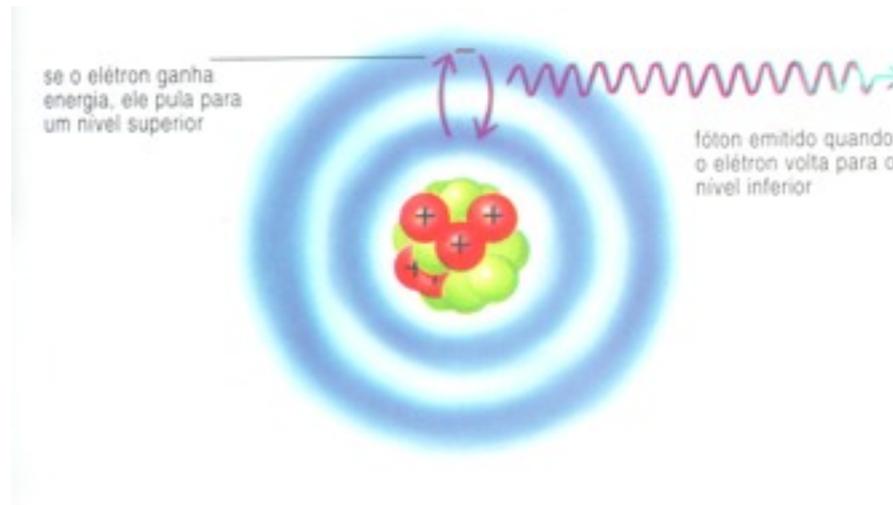
- Hoje o universo é observado em todos os comprimentos de onda
- Espectro típico: corpo negro + linhas de absorção e emissão



Espectro de Linhas

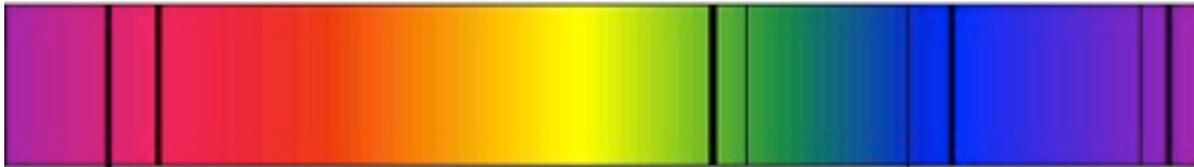


Linhas de absorção devido à presença de gás





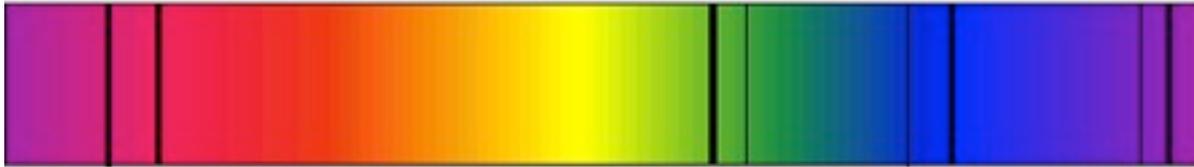
Espectro de Linhas



Linhas de absorção devido à presença de gás



Espectro de Linhas

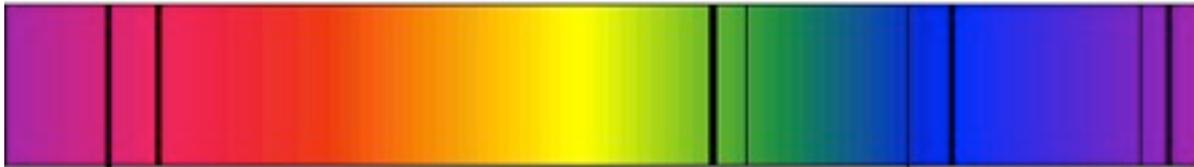


Linhas de absorção devido à presença de gás

- Cada elemento químico possui linhas características



Espectro de Linhas

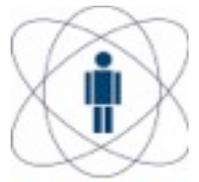


Linhas de absorção devido à presença de gás

- Cada elemento químico possui linhas características
- Instrumento central em Astronomia
 - Composição química....
 - e
 - Velocidade!

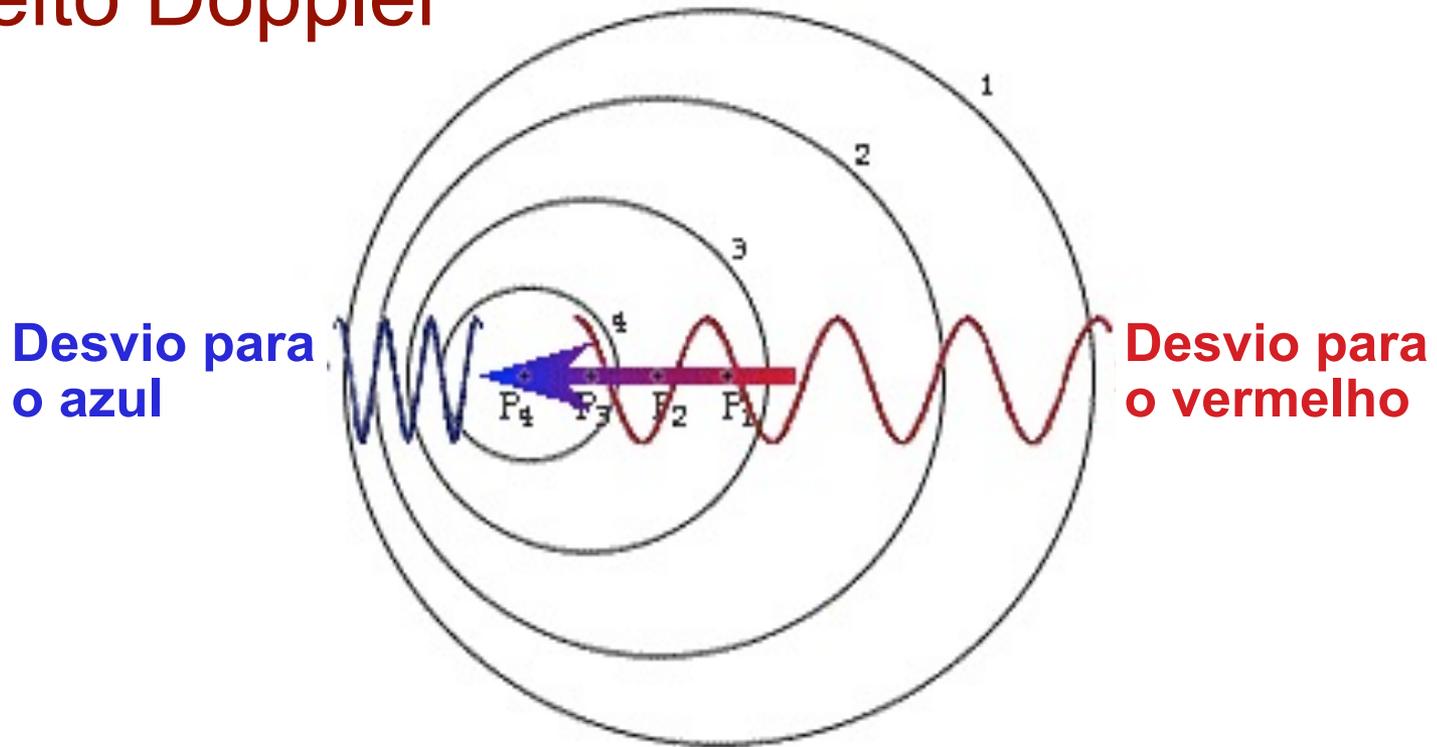
O Desvio para o Vermelho





O Desvio para o Vermelho

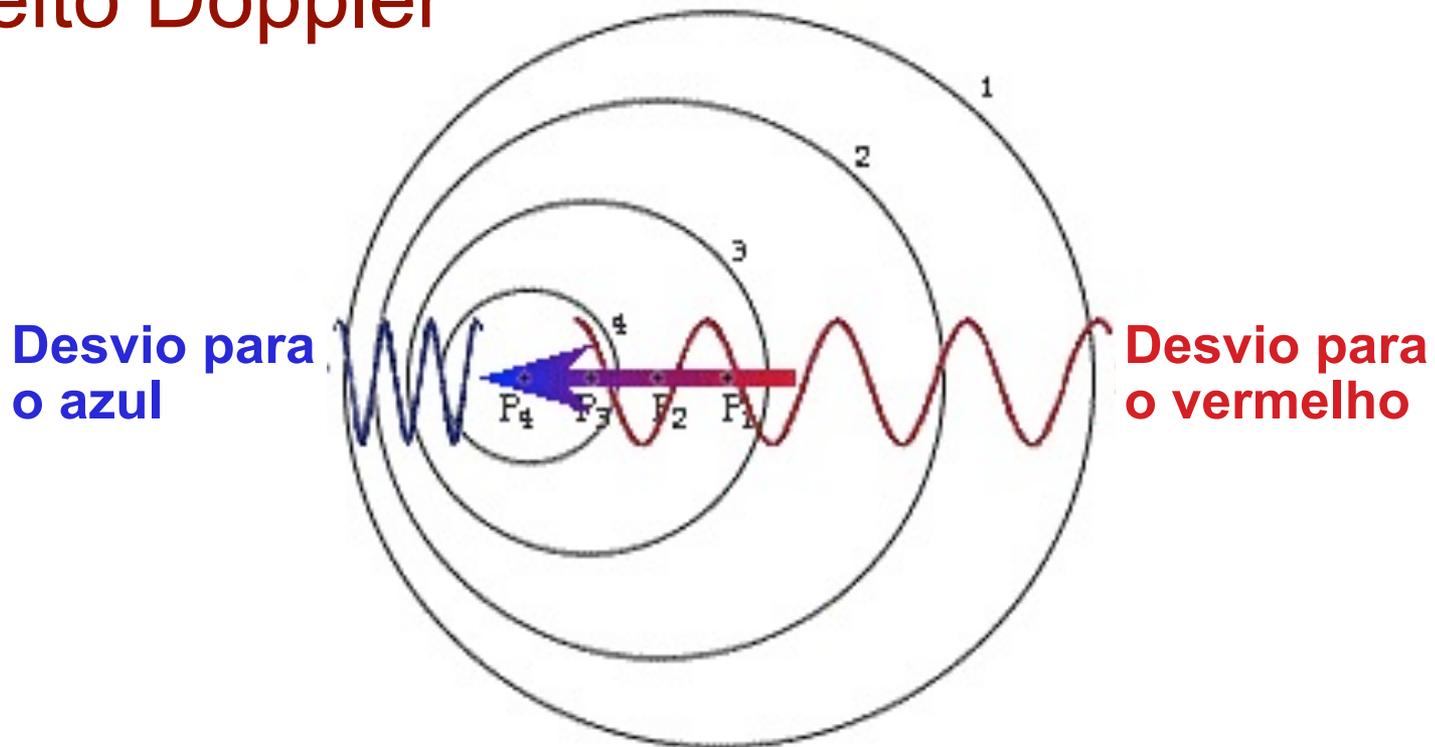
- Efeito Doppler





O Desvio para o Vermelho

- Efeito Doppler

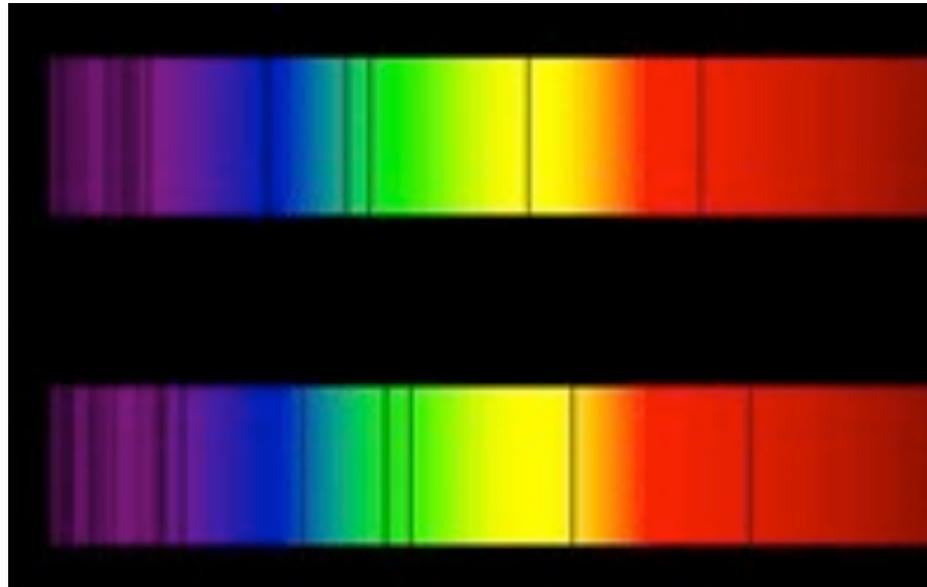


$$z := \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}} - 1 \approx v/c, \text{ para } v \ll c$$

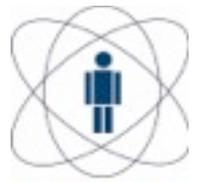


O desvio para o vermelho

Espectro “de referência”



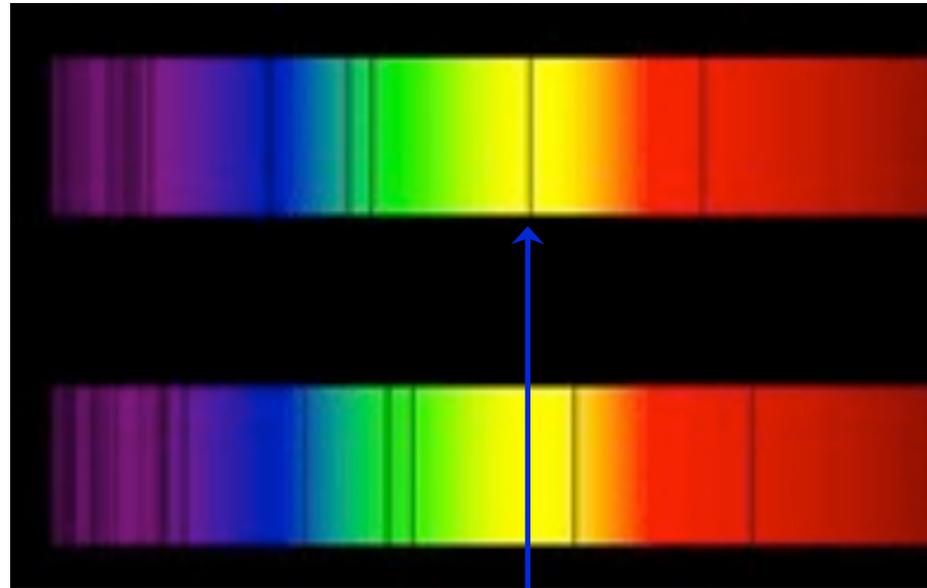
Espectro observado



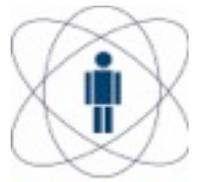
O desvio para o vermelho

Espectro “de referência”

Espectro observado



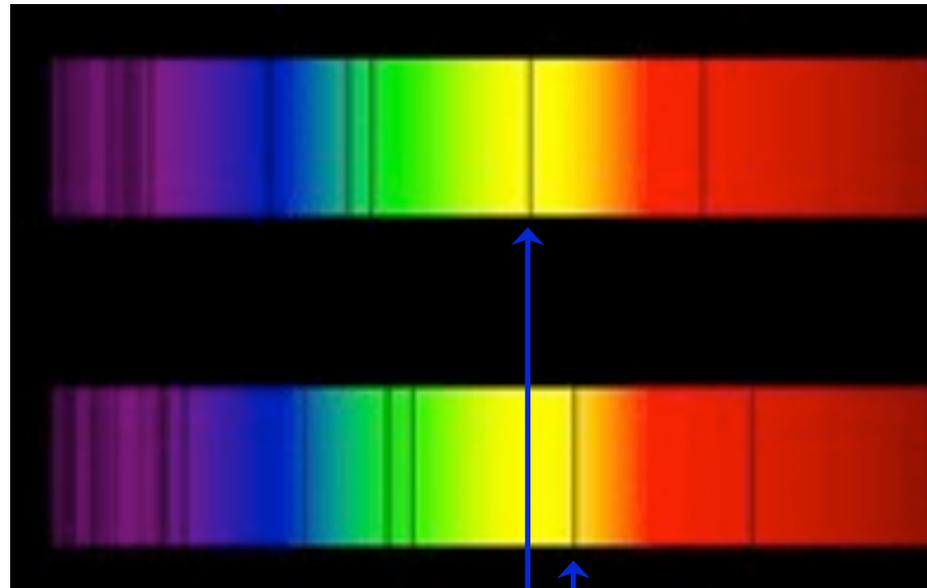
λ_e



O desvio para o vermelho

Espectro “de referência”

Espectro observado



λ_e

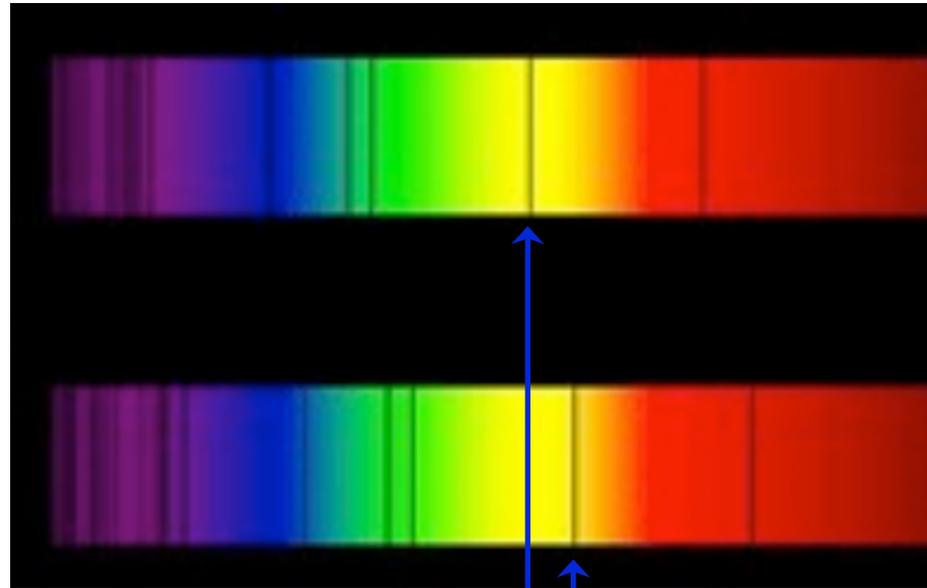
λ_r



O desvio para o vermelho

Espectro “de referência”

Espectro observado

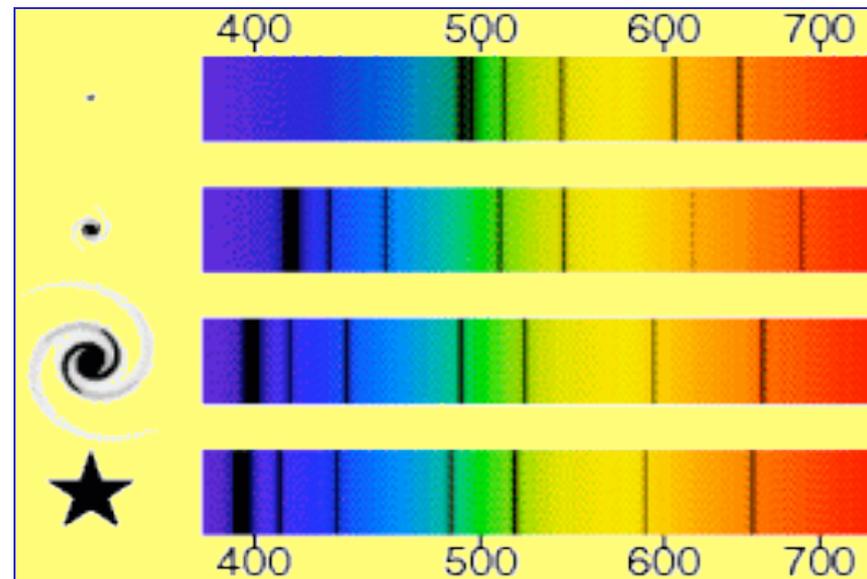


$$z = \frac{\lambda_r - \lambda_e}{\lambda_e}$$



A Expansão do Universo

- Vesto Slipher (1917): desvio para o vermelho de galáxias (13 de 15)



- Hubble (1929): descobre a expansão do universo



A Expansão do Universo

- Vesto Slipher (1917): desvio para o vermelho de galáxias (13 de 15)

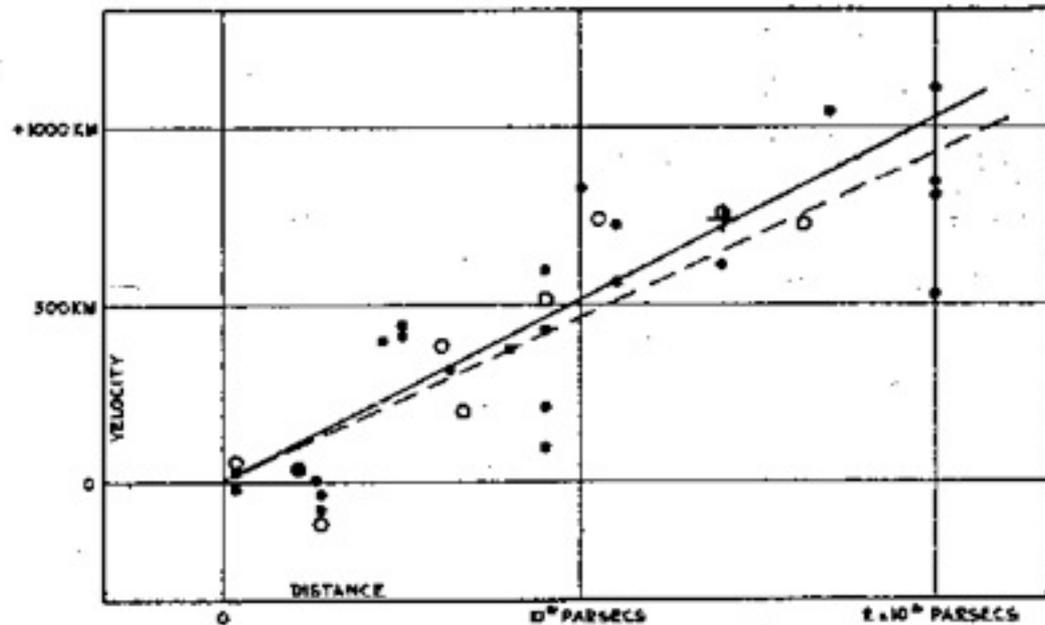


FIGURE 1

- Hubble (1929): descobre a expansão do universo



A Expansão do Universo

- Vesto Slipher (1917): desvio para o vermelho de galáxias (13 de 15)

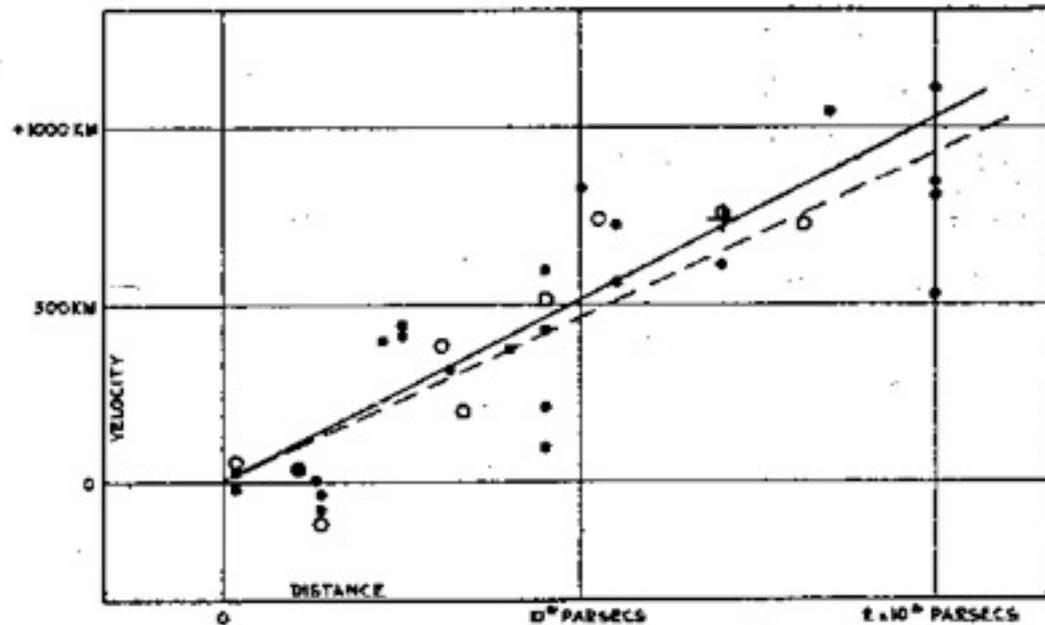
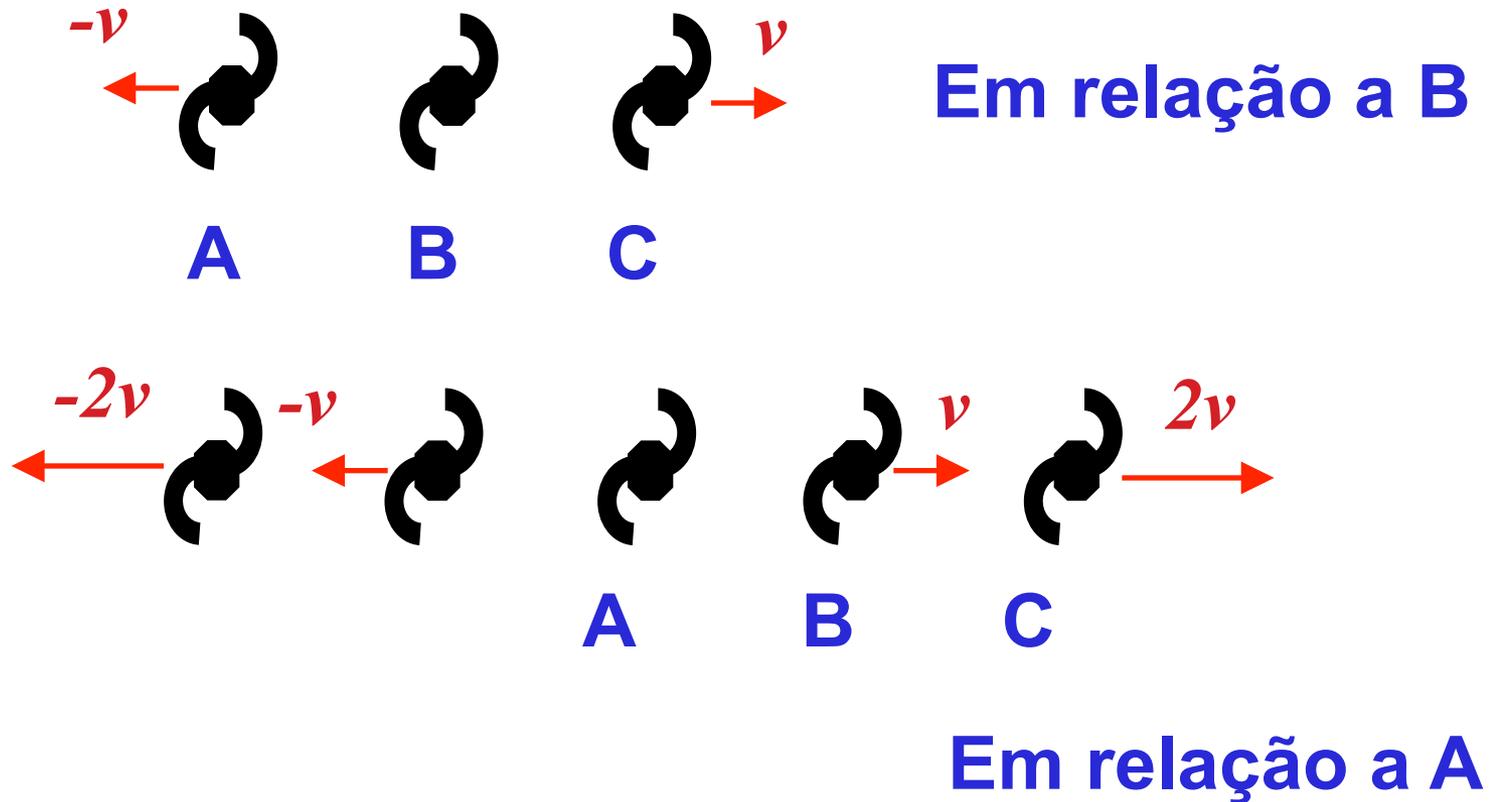


FIGURE 1

- Hubble (1929): descobre a expansão do universo

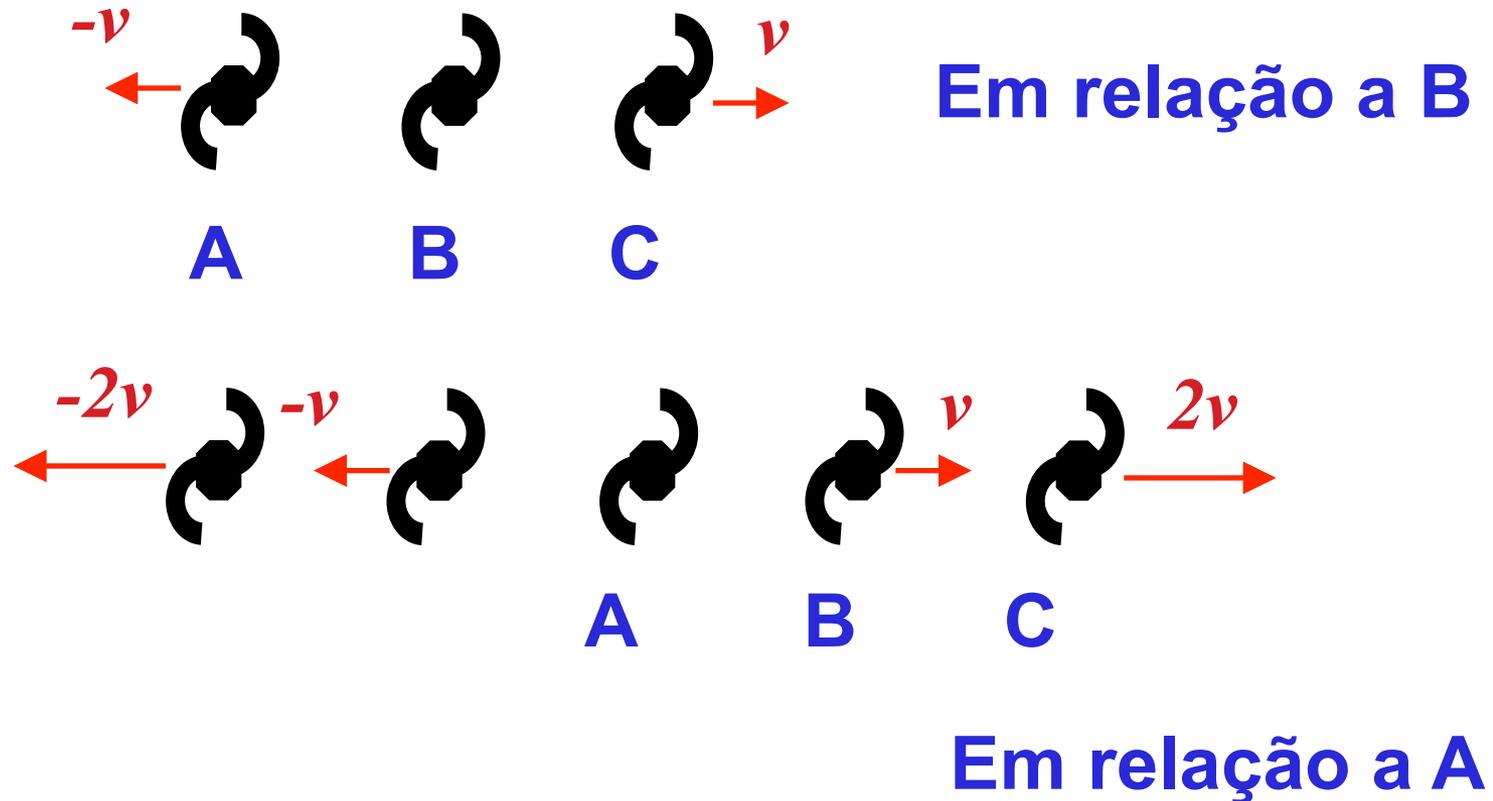


A Expansão do Universo



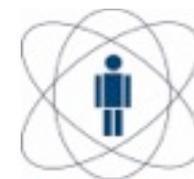


A Expansão do Universo

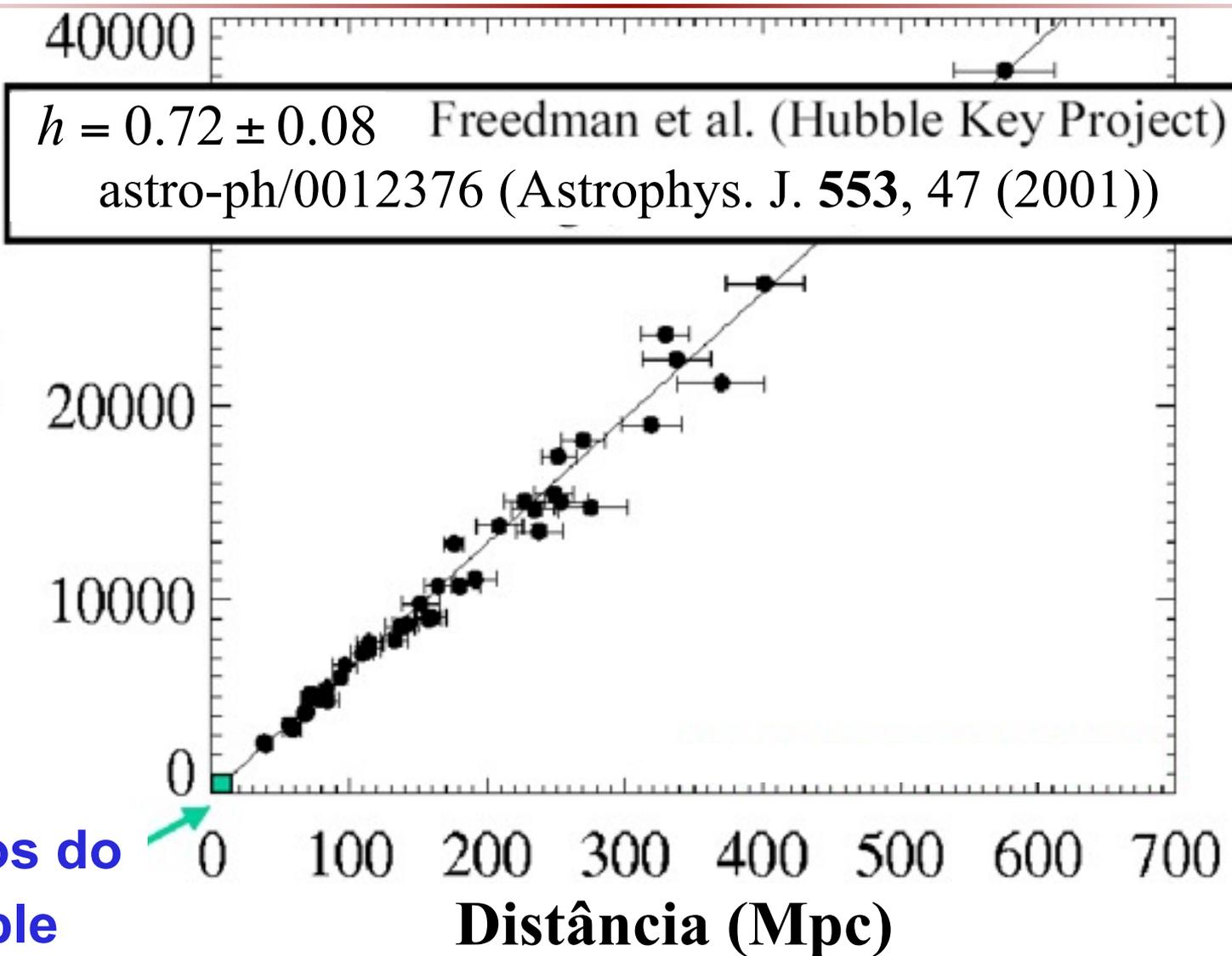


Homogênea e Isotrópica em Grandes Escalas
Não é explosão! Não possui centro!

O Diagrama de Hubble (Versão Atual)



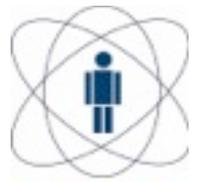
Velocidade (km/s)



A Expansão do Universo I



A Expansão do Universo I



Homogênea e isotrópica em grandes escalas
Não é uma explosão! Não possui centro!

A Expansão do Universo I



Homogênea e isotrópica em grandes escalas
Não é uma explosão! Não possui centro!

Relação linear: $v = H_0 d$

Parâmetro de Hubble:

$$H_0 = 100h \text{Km} / \text{s} / \text{Mpc}$$

A Expansão do Universo I



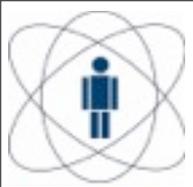
Homogênea e isotrópica em grandes escalas
Não é uma explosão! Não possui centro!

Relação linear: $v = H_0 d$

Parâmetro de Hubble:

$$H_0 = 100h \text{ Km} / \text{s} / \text{Mpc}$$

Dados do Hubble: $h = 5$



Lado Escuro do Universo

Episódio I

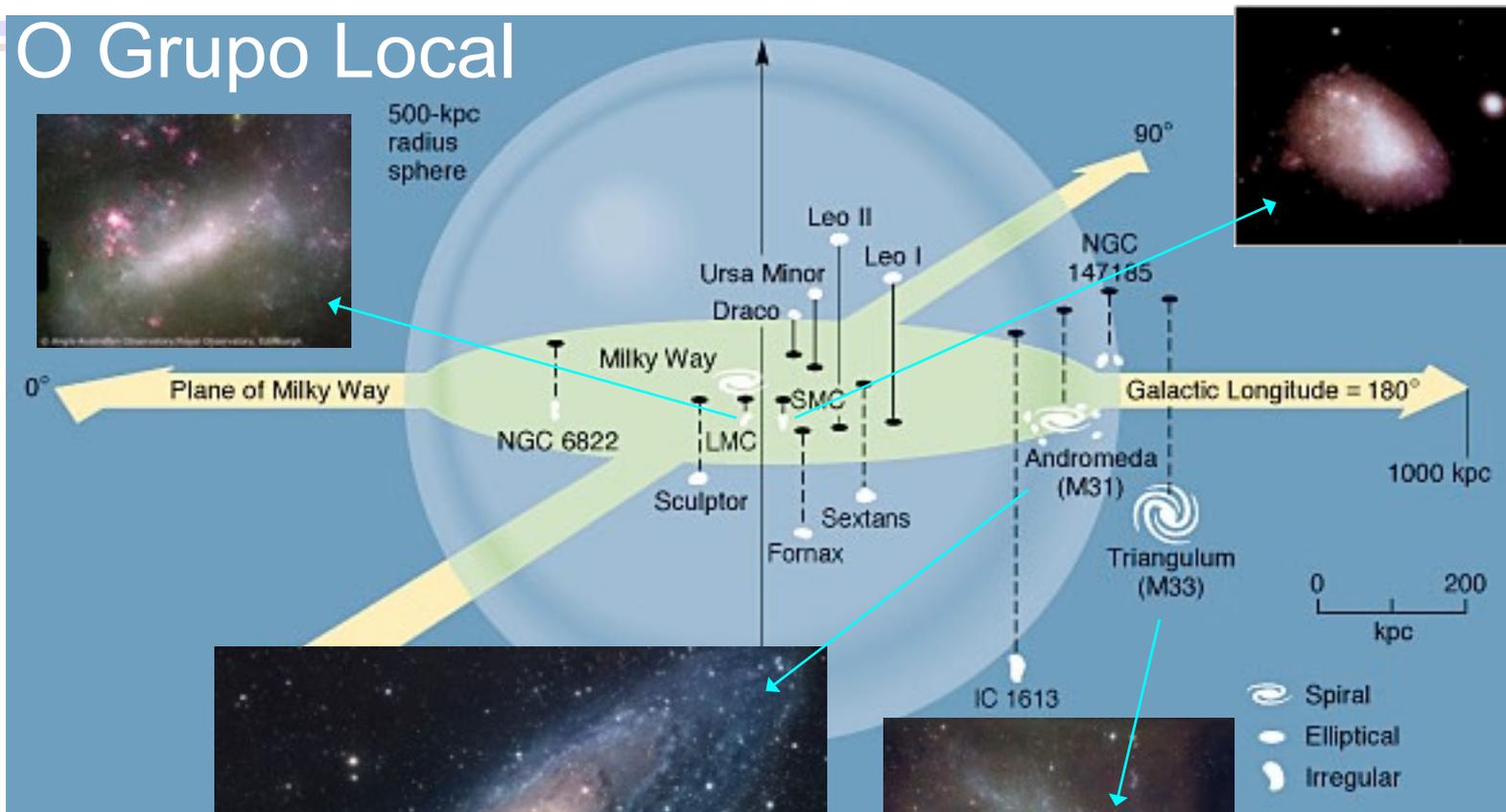
“O único mistério do Universo é o mais e não o menos. [...] O que existe transcende para mim o que julgo que existe.”
[O Único Mistério Do Universo, Poemas Inconjuntos]

Alberto Casiro

Nossa Vizinhança



O Grupo Local

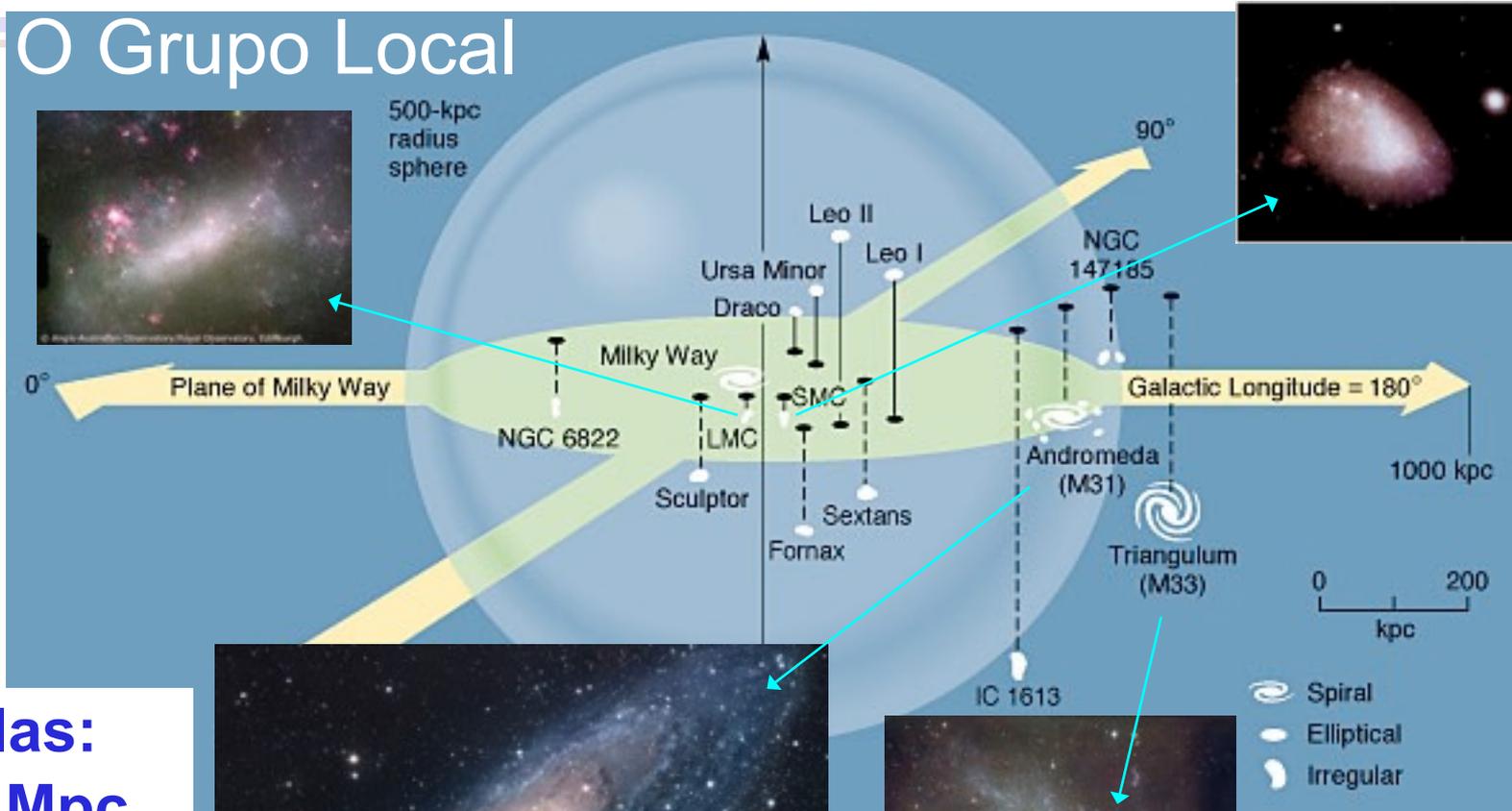


Tamanhos fora de escala

Nossa Vizinhança



O Grupo Local



Escalas:
 $L \sim 1 \text{ Mpc}$
 $M \sim 10^{13} M_{\odot}$
 $N_{\text{gal}} \sim 10$

Tamanhos fora de escala





Aglomerados de Galáxias



Aglomerado no SDSS



Aglomerados de Galáxias

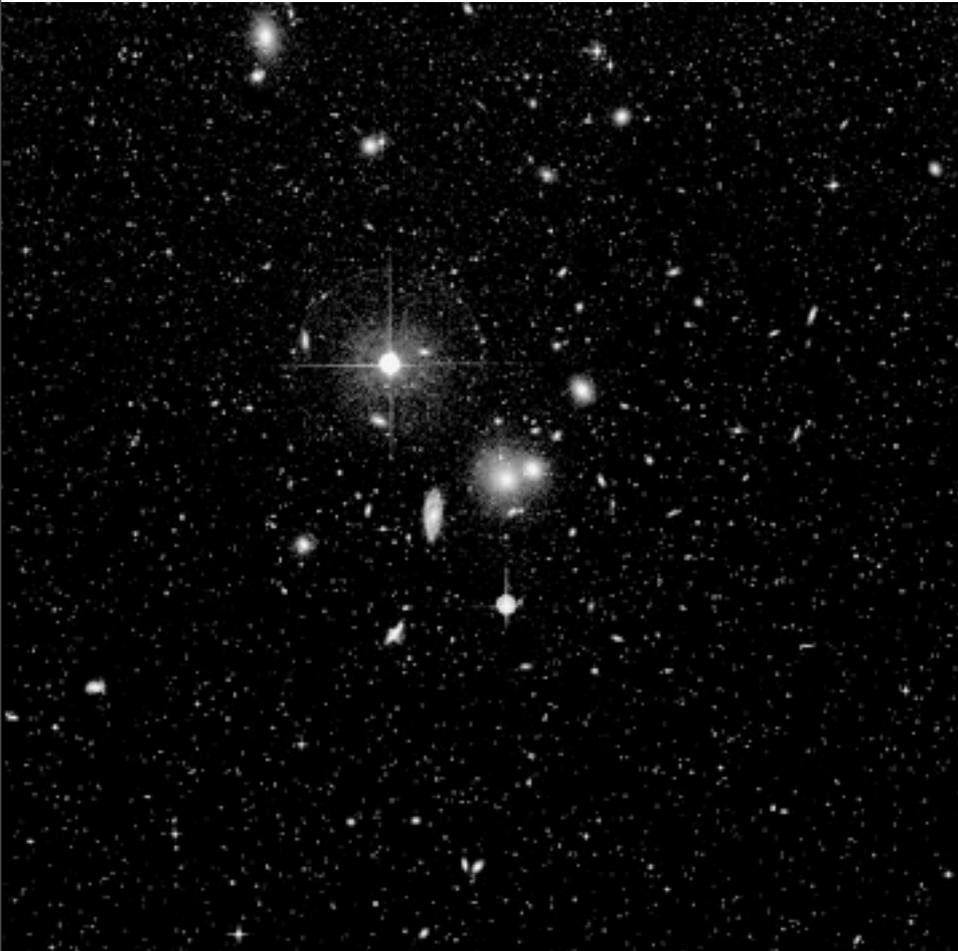


Região qualquer do céu

Aglomerado no SDSS



Aglomerados de Galáxias



Aglomerado de Hydra

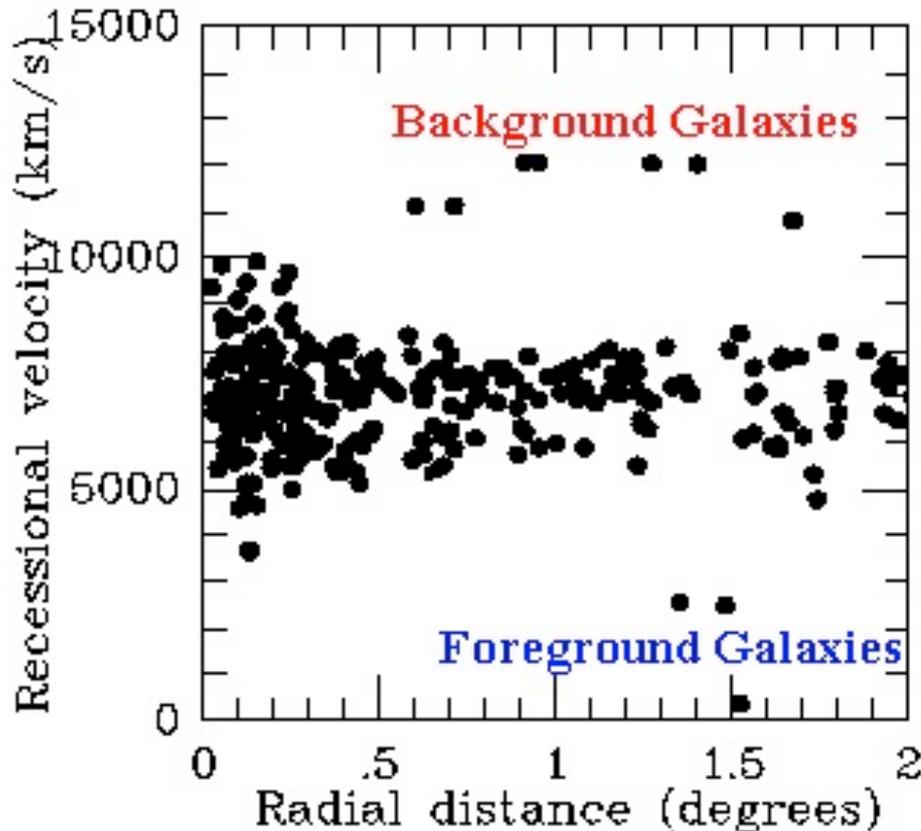


Aglomerado de Coma



Matéria escura

- Dispersão de velocidades em aglomerados (Zwicky 1934)



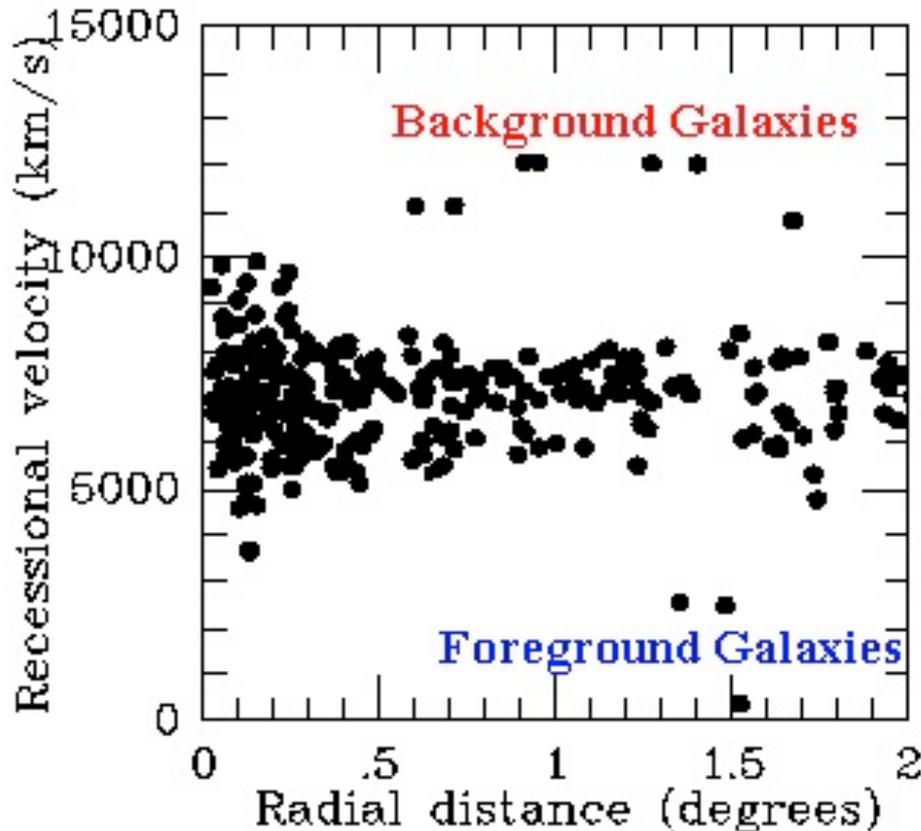
Teorema do Virial

$$2\langle E_K \rangle = -\langle E_G \rangle$$



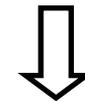
Matéria escura

- Dispersão de velocidades em aglomerados (Zwicky 1934)



Teorema do Virial

$$2\langle E_K \rangle = -\langle E_G \rangle$$

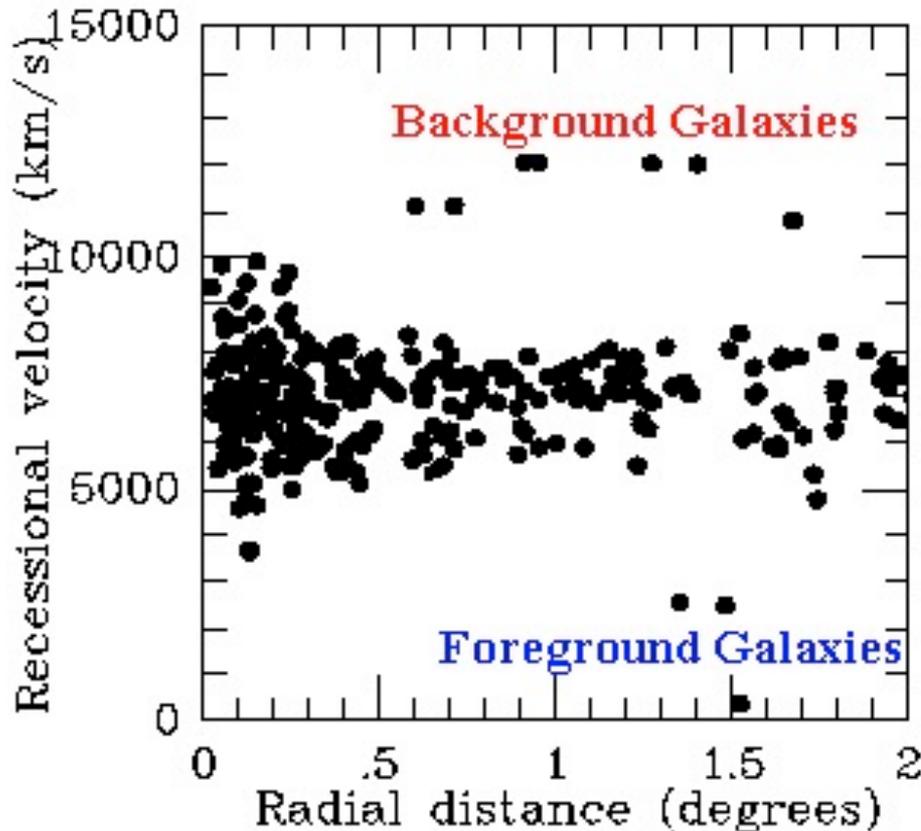


$$\frac{1}{2} \sum_i m_i v_i^2 \sim -\frac{1}{2} \left(-\frac{1}{2} \frac{GM^2}{R} \right)$$



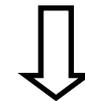
Matéria escura

- Dispersão de velocidades em aglomerados (Zwicky 1934)



Teorema do Virial

$$2\langle E_K \rangle = -\langle E_G \rangle$$



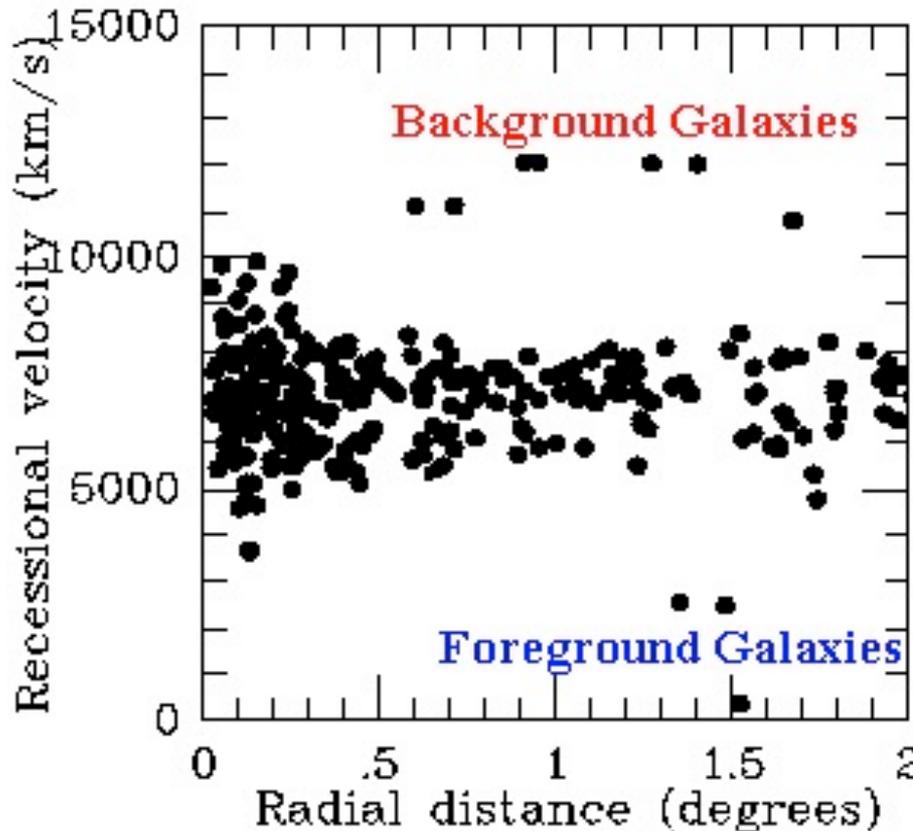
$$\frac{1}{2} \sum_i m_i v_i^2 \sim -\frac{1}{2} \left(-\frac{1}{2} \frac{GM^2}{R} \right)$$

$$M \sim \frac{2Rv^2}{G}$$



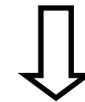
Matéria escura

- Dispersão de velocidades em aglomerados (Zwicky 1934)



Teorema do Virial

$$2\langle E_K \rangle = -\langle E_G \rangle$$



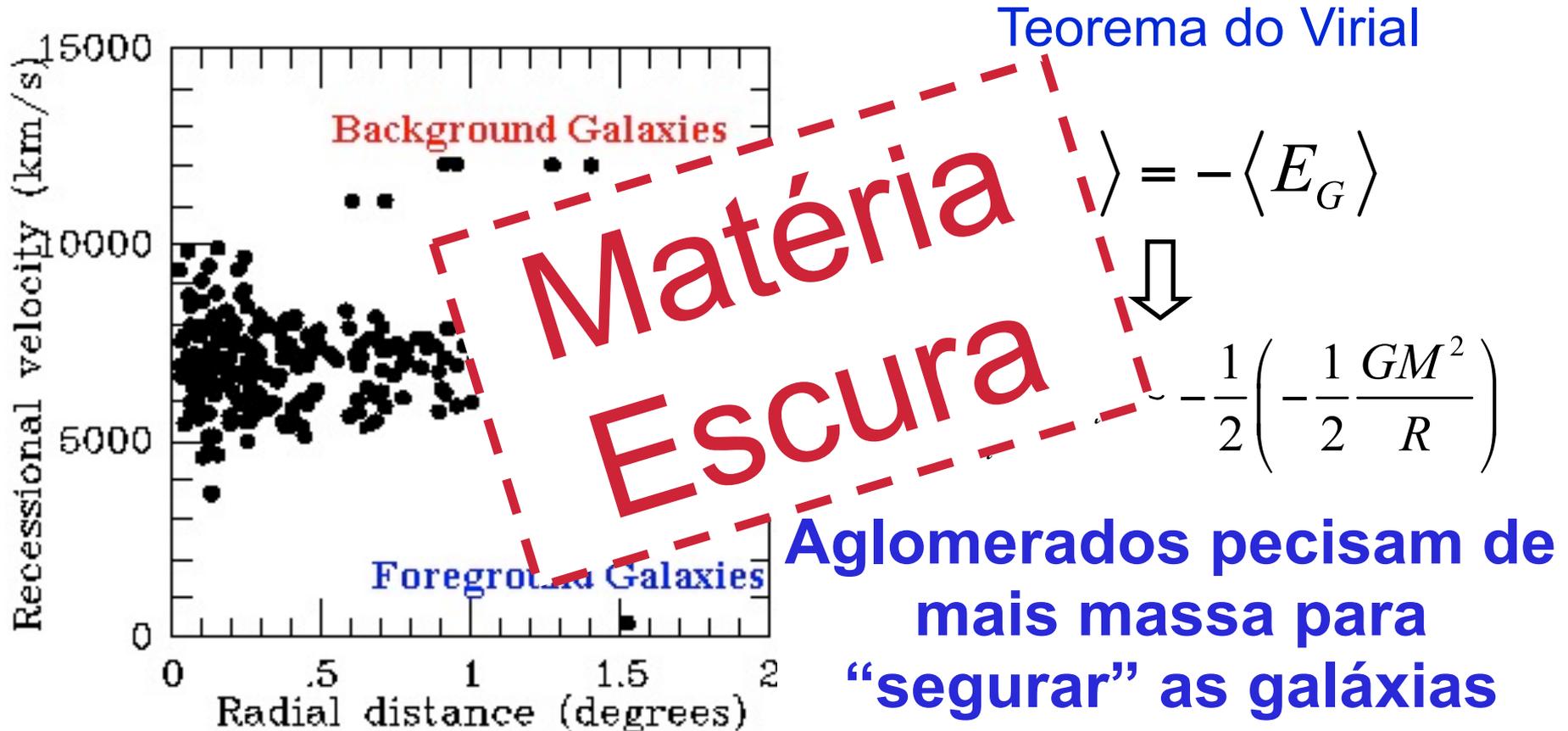
$$\frac{1}{2} \sum_i m_i v_i^2 \sim -\frac{1}{2} \left(-\frac{1}{2} \frac{GM^2}{R} \right)$$

Aglomerados precisam de mais massa para “segurar” as galáxias



Matéria escura

- Dispersão de velocidades em aglomerados (Zwicky 1934)





Gás quente em aglomerados

Gás intra-aglomerado

$T \sim 10.000.000 \text{ } ^\circ\text{C}$



Hydra no ótico



Gás quente em aglomerados

Gás intra-aglomerado

$T \sim 10.000.000 \text{ } ^\circ\text{C}$

→ emissão de raios-x

$$\nabla\phi = -\frac{1}{\rho}\nabla p$$



Hydra no ótico



Gás quente em aglomerados

Gás intra-aglomerado

$T \sim 10.000.000 \text{ } ^\circ\text{C}$

→ emissão de raios-x

Equilíbrio hidrostático

$$\nabla\phi = -\frac{1}{\rho}\nabla p$$



Hydra no ótico



Gás quente em aglomerados

Gás intra-aglomerado

$T \sim 10.000.000 \text{ } ^\circ\text{C}$

→ emissão de raios-x

Equilíbrio hidrostático

$$\nabla\phi = -\frac{1}{\rho}\nabla p$$



Hydra no ótico



Gás quente em aglomerados

Gás intra-aglomerado

$T \sim 10.000.000 \text{ } ^\circ\text{C}$

→ emissão de raios-x

Equilíbrio hidrostático

$$\nabla\phi = -\frac{1}{\rho}\nabla p$$

→ temperatura depende da massa



Hydra no ótico



Gás quente em aglomerados

Gás intra-aglomerado

$T \sim 10.000.000 \text{ } ^\circ\text{C}$

→ emissão de raios-x

Equilíbrio hidrostático

$$\nabla\phi = -\frac{1}{\rho}\nabla p$$

→ temperatura depende da massa

Exemplo



Hydra no ótico



Gás quente em aglomerados

Gás intra-aglomerado

$T \sim 10.000.000 \text{ } ^\circ\text{C}$

→ emissão de raios-x

Equilíbrio hidrostático

$$\nabla\phi = -\frac{1}{\rho}\nabla p$$

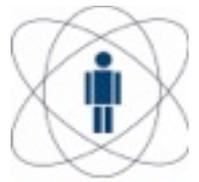
→ temperatura depende da massa

Exemplo $\rho(r) = \frac{kT_e}{2\pi Gm_e r^2}$



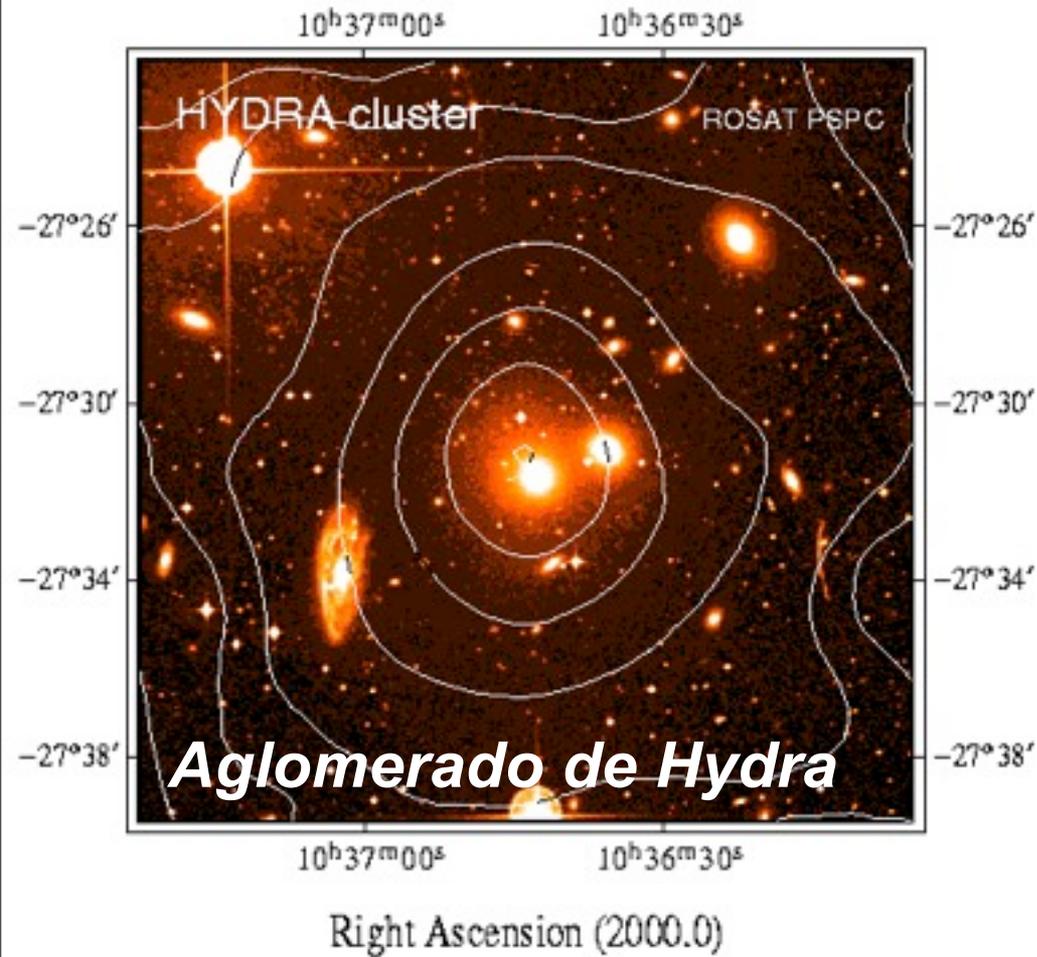
Hydra no ótico

Aglomerado Emitindo raios X



Hydra no ótico

Aglomerado Emitindo raios X

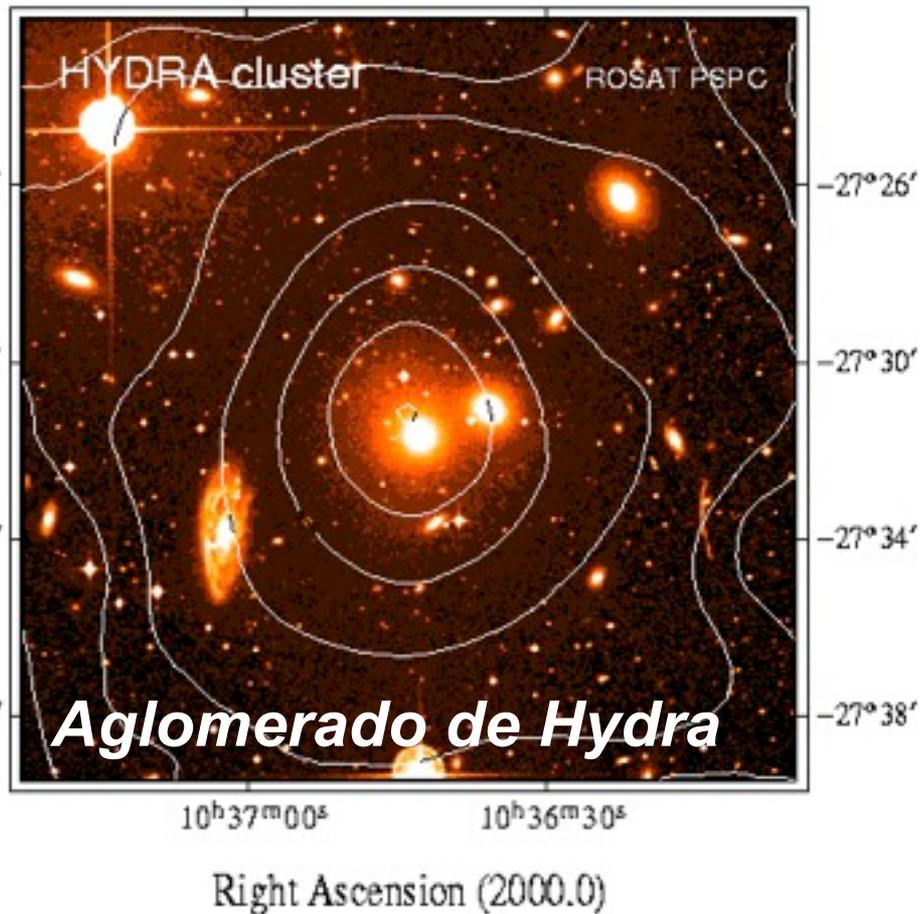


Hydra no ótico



Aglomerado Emitindo raios X

O gás é distribuído de forma mais uniforme



Hydra no ótico

Aglomerado Emitindo raios X



O gás é distribuído de forma mais uniforme



Hydra em raios x



Hydra no ótico

**Matéria
Escura**

Aglomerado Emitindo raios X



O gás é distribuído de forma mais uniforme



Matéria Escura

Hydra em raios x

$$M_{\text{gás}} \sim 20 \times M_{\text{estrelas}}$$

Ainda assim matéria escura é 80%