

Matéria Escura

Aula 2

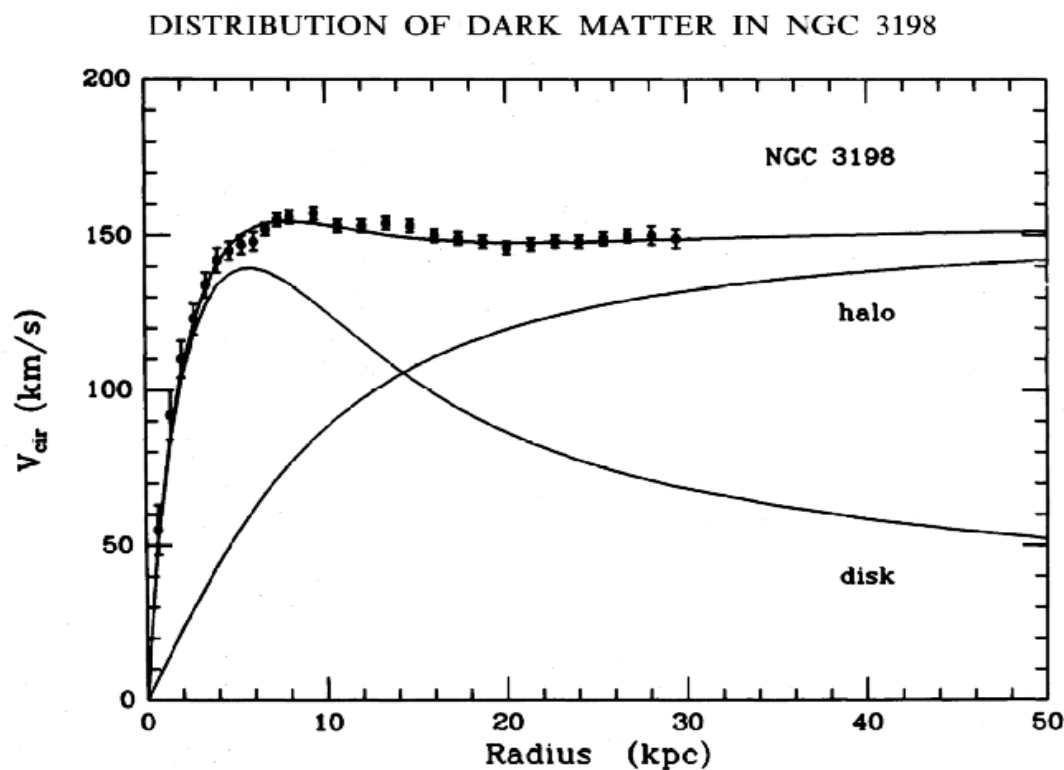
Introdução à Cosmologia

2012/02

Aula passada

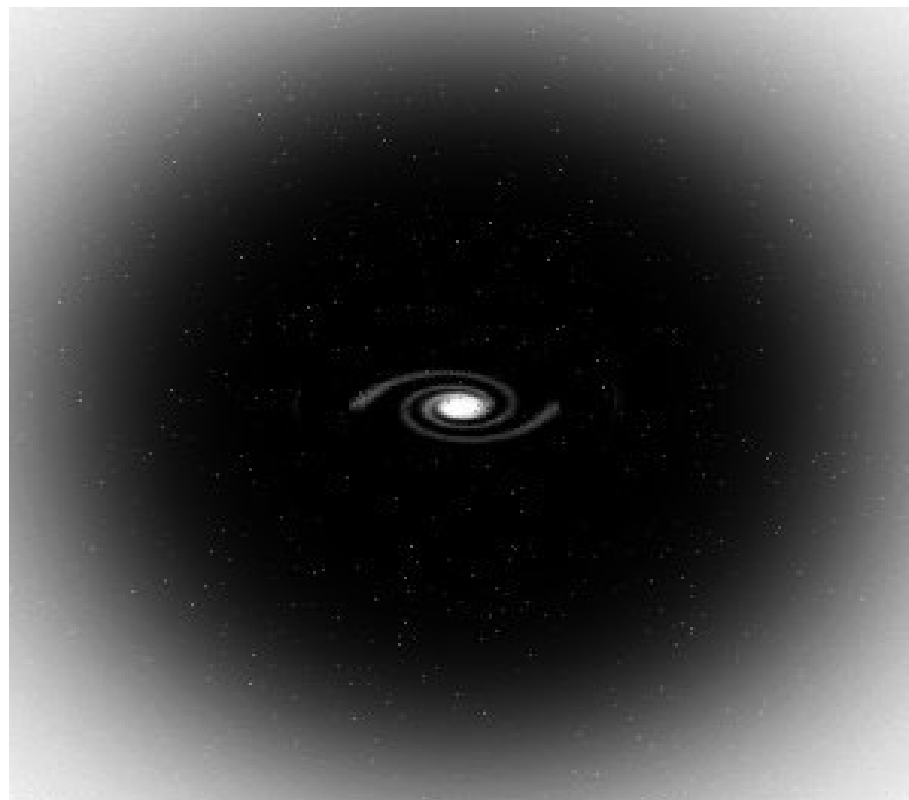
As previsões da nucleossíntese primordial indicam que:

$$\Omega_{bary,0} = 0.04 \pm 0.01$$



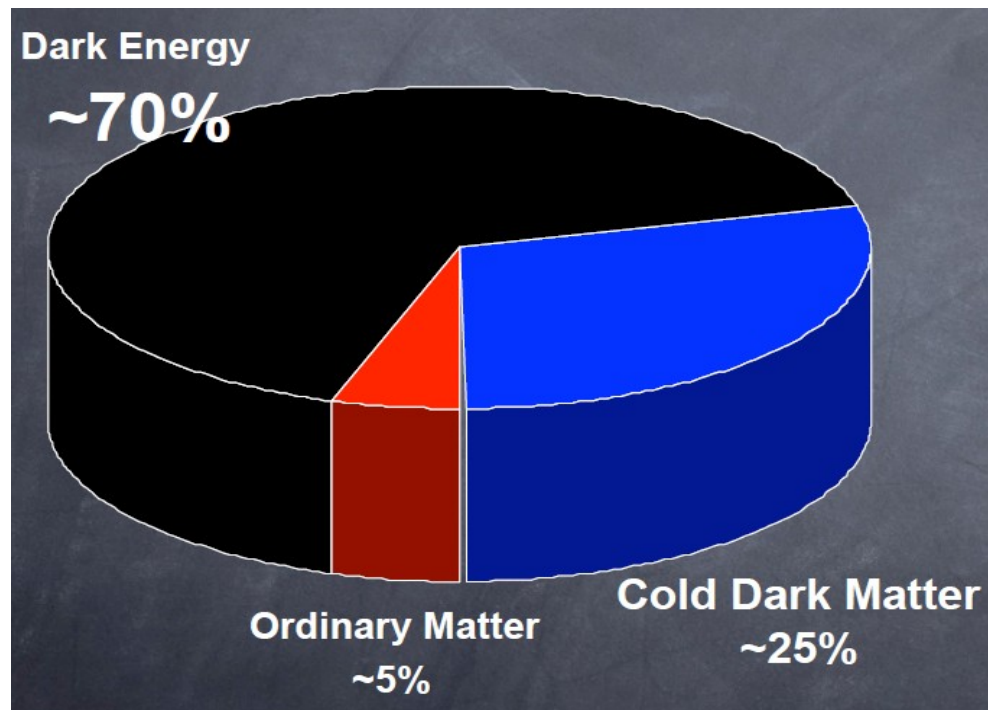
Curva de rotação de galáxias espirais

Acredita-se que as galáxias estão cercadas por um halo de matéria escura, muito maior do que o tamanho visível do disco:



O halo da nossa galáxia parece ser entre 10 e 40 vezes mais massivo do que a sua parte luminosa.

Evidência para a existência de matéria escura não bariônica.



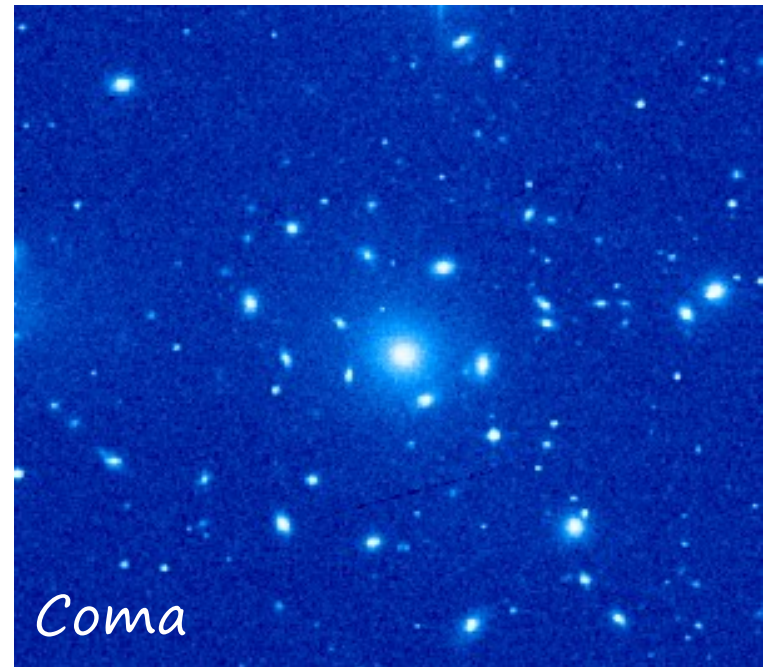
Matéria escura em aglomerados de galáxias

A primeira evidência para a existência de matéria escura foi obtida por Fritz Zwicky na década de 30, quando ele estudava o aglomerado de Coma.

Aglomerados são formados por galáxias ligadas gravitacionalmente.

Podem ser detectados pela observação de várias galáxias numa mesma região do céu que possuem desvio para o vermelho similar.

Podem ser detectados pela observação em raios-X do gás quente que permeia essas estruturas.



Teorema do Virial

Galáxias em aglomerados possuem velocidades não-relativísticas.

Portanto, podemos utilizar física newtoniana.

Consideremos um aglomerado de N galáxias de massa m_i e posição \vec{x}_i .
A energia cinética total devido ao movimento de todas as galáxias é dada por:

$$K = \frac{1}{2} \sum_i^N m_i |\dot{\vec{x}}_i|^2 = \frac{1}{2} M \langle v^2 \rangle$$

onde

$$M = \sum_i^N m_i \quad , \quad \langle v^2 \rangle \equiv \frac{1}{M} \sum_i^N m_i |\dot{\vec{x}}_i|^2$$

A energia potencial gravitacional do aglomerado é:

$$W = -\frac{G}{2} \sum_{i,j} \frac{m_i m_j}{|\vec{x}_j - \vec{x}_i|},$$

e o seu momento de inércia

$$I \equiv \sum_i^N m_i |\vec{x}_i|^2$$

$$\Rightarrow \ddot{I} = 2 \sum_i^N m_i (\vec{x}_i \cdot \ddot{\vec{x}}_i + \dot{\vec{x}}_i \cdot \dot{\vec{x}}_i)$$

Substituindo as expressões para W e K no resultado acima, temos:

$$\ddot{I} = 2W + 4K,$$

que é o Teorema do Virial.

Se o sistema é estacionário ($I = \text{constante}$), então:

$$K = -\frac{W}{2}$$

Sistemas para os quais o Teorema do Virial pode ser aplicado:

Aglomerados de estrelas em fase de evolução avançada;

Galáxias elípticas;

Aglomerados de galáxias em fase de evolução avançada.

Sistemas para os quais o Teorema do Virial NÃO pode ser aplicado:

Aglomerados de estrelas jovens;

Galáxias em colisão;

Aglomerados de galáxias em fase de formação.

Aplicação a aglomerados de galáxias

A energia potencial de um aglomerado pode ser escrita como:

$$W = -\alpha \frac{GM^2}{r_h}$$

onde

r_h = “raio de meia massa” do aglomerado, que corresponde ao raio da esfera que contém metade da sua massa.

$\alpha \sim 0.4$ é um fator que depende do perfil de densidade do aglomerado.

Usando o Teorema do Virial na forma: $K = -\frac{W}{2}$

Obtemos: $\frac{1}{2}M\langle v^2 \rangle = \frac{\alpha GM^2}{2 r_h}$

$$M = \frac{\langle v^2 \rangle r_h}{\alpha G}$$

Conhecendo a velocidade quadrática média das galáxias em um aglomerado e seu raio de meia massa, podemos estimar sua massa!

1. Medindo a velocidade quadrática média:

Na prática, podemos medir somente a velocidade quadrática média de uma galáxia ao longo da linha de visada.

Para o aglomerado de Coma, temos:

$$\langle z \rangle = 0,0232$$

$$\langle v_r \rangle = c \langle z \rangle = 6960 \text{ km/s}$$

A chamada “dispersão de velocidades” é dada por:

$$\sigma_r = \langle (v_r - \langle v_r \rangle)^2 \rangle^{1/2}$$

Admitindo que a dispersão de velocidades é isotrópica, podemos estimar a velocidade quadrática média como:

$$\langle v^2 \rangle = 3\sigma_r^2$$

Para o aglomerado de Coma, temos:

$$\sigma_r = 880 \text{ km/s}$$

$$\langle v^2 \rangle = 3\sigma_r^2 = 3(880 \text{ km/s})^2 = 2,32 \times 10^{12} \text{ m}^2/\text{s}^2$$

2. Medindo o raio de meia massa:

Para estimar r_h , admitimos que:

- O aglomerado é esférico;
- A razão massa-luminosidade é constante (onde há mais luz, há também mais matéria escura).

Então a esfera que contém metade da luminosidade é também aquela que contém metade da massa do aglomerado.

Para o aglomerado de Coma: $r_h \approx 1,5 \text{ Mpc}$

Substituindo em

$$M = \frac{\langle v^2 \rangle r_h}{\alpha G}$$

Obtemos:

$$M_{Coma} \approx 2 \times 10^{15} M_{\odot}$$

A ser comparado com:

$$M_{Coma,\star} \approx 3 \times 10^{13} M_{\odot}$$

$$M_{Coma,gas} \approx 2 \times 10^{14} M_{\odot}$$

Assim como o aglomerado de Coma, outros aglomerados são dominados por matéria escura.

Somando a contribuição de todos, obtemos:

$$\Omega_{clus,0} \approx 0,2$$

Matéria escura bariônica

E se o que conhecemos como “matéria escura” fossem simplesmente objetos bariônicos “invisíveis”, como estrelas compactas e buracos negros no halo das galáxias?

MACHOs – MASSive Compact Halo Objects

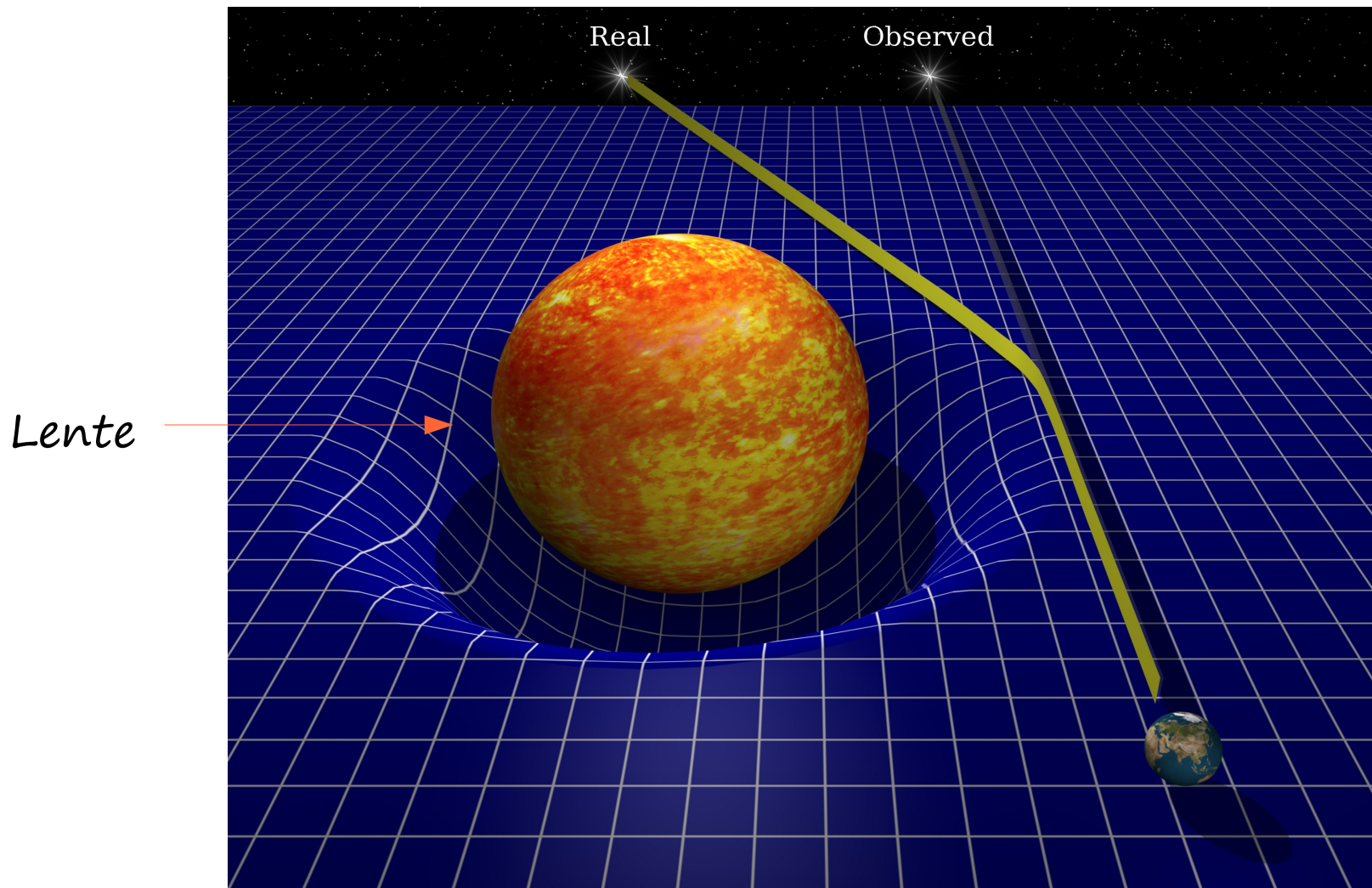
Na década de 90 surgiram alguns experimentos para testar essa hipótese.

EROS Experiment

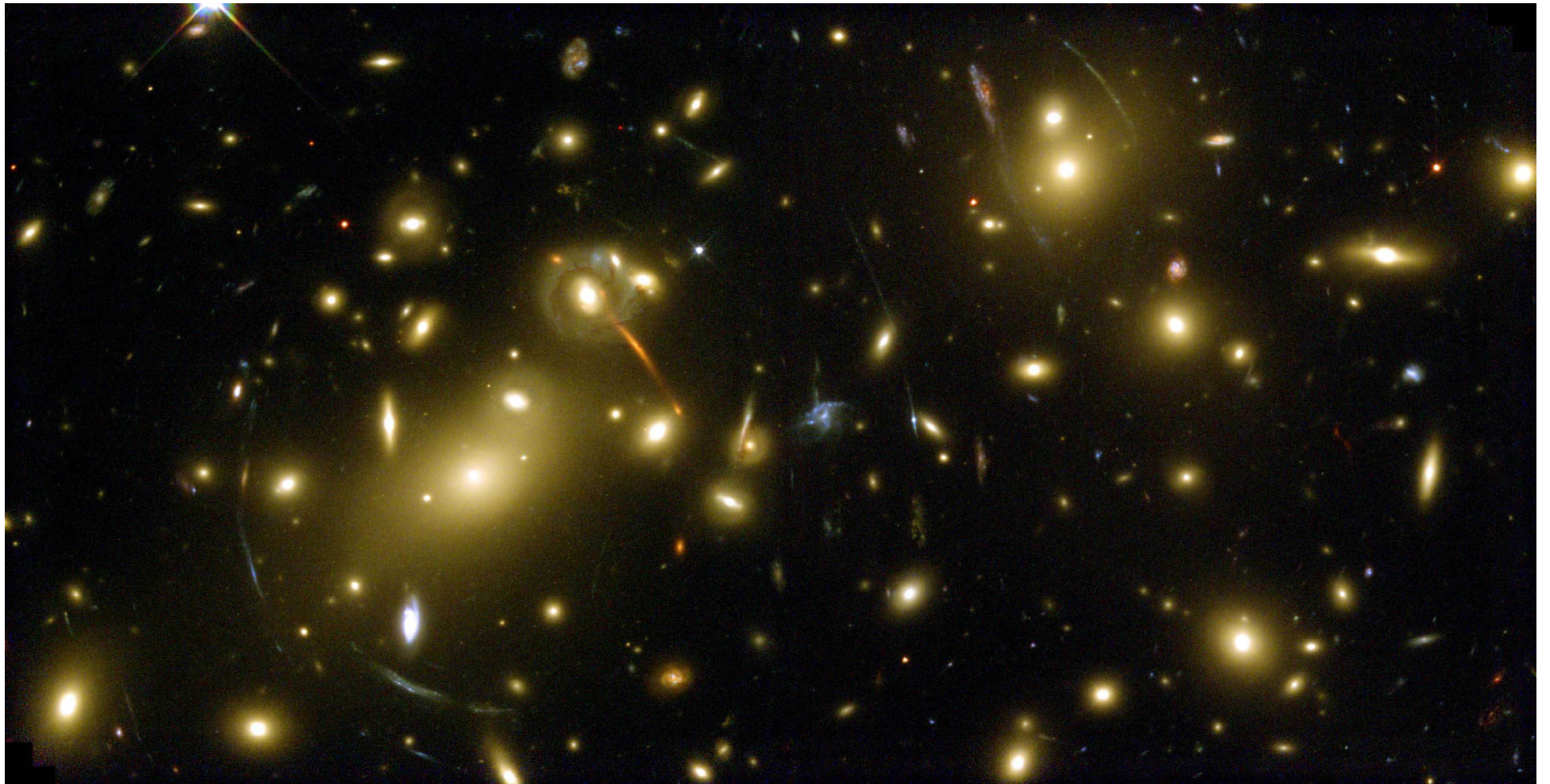


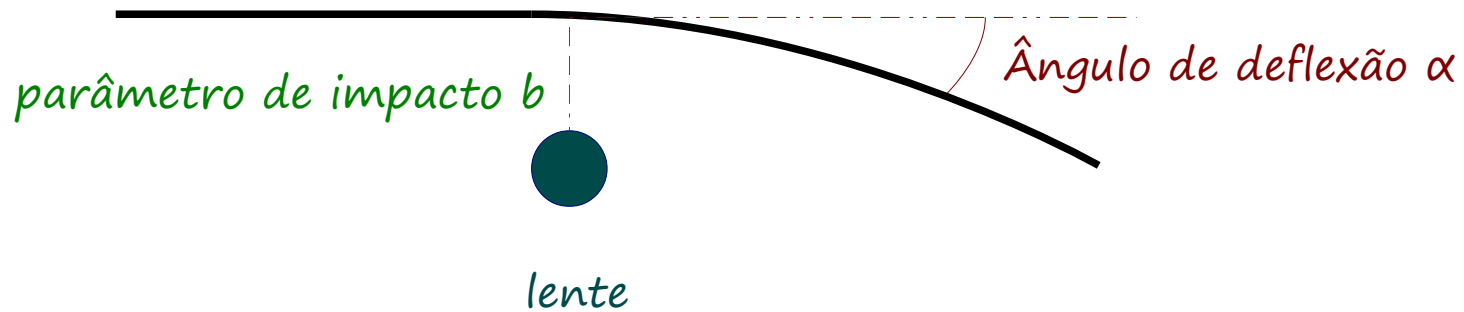
Lenteamento gravitacional

Procura por MACHOs utiliza o fenômeno de lenteamento gravitacional.



Dependendo da posição relativa entre fonte, lente e observador, podem surgir diferentes efeitos como amplificação do fluxo, imagens deformadas e imagens múltiplas.





O ângulo de deflexão é dado por:

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2 b}$$

Para um fóton que passa muito próximo a superfície solar, por exemplo, temos:

$$\alpha = \frac{4GM_{\odot}}{c^2 R_{\odot}} = 1,7 \text{ arcsec}$$

Procura por MACHOs na Via Láctea - Microlenteamento

Os experimentos mencionados acima procuraram o efeito de lenteamento provocado por MACHOs no halo da Via Láctea nas imagens de estrelas na Grande Nuvem de Magalhães.

Se o MACHO se encontra exatamente ao longo da linha de visada entre a Terra e uma estrela na Grande Nuvem, surge o chamado “anel de Einstein”:



O raio angular do anel é dado por:

$$\theta_E = \left(\frac{4GM}{c^2 d} \frac{1-x}{x} \right)^{1/2}$$

onde

M é a massa do MACHO,

d é a distância do observador até a estrela,

xd é a distância do observador até o MACHO.

Se $x=0,5$, temos:

$$\theta_E \approx 4 \times 10^{-4} \text{arcsec} \left(\frac{M}{1 M_\odot} \right)^{1/2} \left(\frac{d}{50 \text{kpc}} \right)^{-1/2}$$

$d_{\text{LMC}} \sim 50 \text{ kpc}$, então raio de Einstein muito pequeno!

É possível, no entanto, detectar a amplificação do brilho de uma estrela na Grande Nuvem devido à passagem de um MACHO pela linha de visada (focalização da luz da estrela).



Resultados dos experimentos indicam que MACHOs constituem no máximo $\sim 20\%$ da massa do halo da galáxia.

É preciso considerar que alguns dos eventos observados podem ter sido causados por MACHOs na Grande Nuvem.

O lenteamento gravitacional de galáxias por aglomerados de galáxias pode ser utilizado para determinar a massa de aglomerados (lenteamento forte).

Resultados obtidos por esse método concordam com estimativas feitas utilizando o Teorema do Virial.

Aglomerado da bala

Colisão de dois aglomerados, melhor evidência para matéria escura.



Gás, freado
pela colisão

Galáxias, não
afetadas pela
colisão

Galáxias, não
afetadas pela
colisão

Lentes gravitacionais mostram que massa se concentra próximo ao azul₁₃

Candidatos

Candidatos à matéria escura não-bariônica devem obedecer:

- 1. Ser estáveis em escalas de tempo cosmológicas;*
- 2. Não interagir com radiação eletromagnética (senão não seriam “escuros”);*
- 3. Existir em quantidade suficiente para explicar os efeitos observados.*

Dentro do Modelo Padrão da física de partículas, somente uma partícula poderia satisfazer tais requisitos: o neutrino.

Candidatos

Matéria escura quente: partículas relativísticas, como neutrino.

Matéria escura fria (Cold Dark Matter): partículas não -relativísticas

Matéria escura quente: formação de estruturas é Top-Down.

Matéria escura fria (CDM): formação de estruturas é Bottom-Up.

Observação de galáxias em altos valores de z favorecem a hipótese Bottom-Up de formação de estruturas.

Modelo Padrão da Cosmologia = Λ CDM

Candidatos

Buracos negros primordiais

Formados no início da história do Universo, antes da nucleossíntese primordial. Muito massivos.

Axions

Partículas leves, teoria de cordas.

WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles)

*Partículas muito massivas previstas em modelos supersimétricos
Neutralino é o principal candidato.*

Procura por matéria escura

Detecção direta

Procura por sinais de interação entre partículas de matéria escura e matéria ordinária em laboratórios na Terra.

Detecção indireta

Procura por sinais dos subprodutos da aniquilação de partículas de matéria escura no halo de galáxias.

Aceleradores

Produção de partículas de matéria escura em aceleradores como o LHC?

Próxima aula 21/02:
Colóquio Luca Amendola
11hs