

A Matéria Escura

Eduardo Cypriano e Laerte Sodré Jr.

April 30, 2009

- ▶ anomalias nos movimentos planetários: problemas com a lei da gravitação ou evidência de alguma massa ainda desconhecida?
- ▶ Le Verrier e Adams: as anomalias observadas na órbita de Urano seriam devidas à existência de um outro planeta, Netuno, descoberto em 1846
- ▶ mas a tentativa de se explicar as anomalias no movimento de Mercúrio com um novo planeta, Vulcano, não funcionou
- ▶ elas só foram resolvidas com a introdução de uma nova teoria da gravitação, a relatividade geral

- ▶ matéria escura: problema parecido com a das anomalias nos movimentos planetários
- ▶ ME como partícula(s)?
- ▶ ME como desvios na teoria da gravitação?
- ▶ cenário mais aceito: a matéria escura fria (CDM)
- ▶ WMAP (Hinshaw et al. 2008):
matéria total: $\Omega_m = 0.28$
bárions: $\Omega_b = 0.046$ (para $h = 0.70$)

As principais propriedades da ME são:

- ▶ Escura: não interage com os fótons
- ▶ Só interage gravitacionalmente
- ▶ Não-bariônica
- ▶ Fria
- ▶ Estável

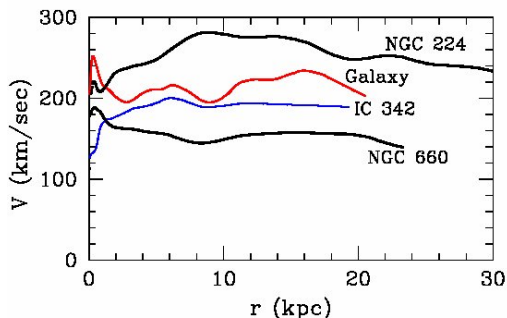
Evidências de matéria escura

- ▶ Primeira evidência: estudo de aglomerados de galáxias por Zwicky, nos anos 30 do século passado- ele descobriu que havia muito mais massa em aglomerados do que aquela associada a estrelas.
- ▶ Anos 70: curvas de rotação de galáxias espirais- esses objetos são também dominados por ME.
- ▶ Anos 80: com as simulações numéricas o modelo CDM se estabeleceu como um paradigma.
- ▶ Anos 90: técnicas de medida de massa com lentes gravitacionais se difundiram.

ME em galáxias espirais

- ▶ $v_c(r)$: velocidade circular das estrelas no disco de uma espiral.
- ▶ Observam-se curvas de rotação chatas:
ao invés de v_c cair com $r^{-1/2}$, como se esperaria se a maior parte da massa estivesse dentro de r , v_c fica aproximadamente constante para r grande.
- ▶ inicialmente, v_c cresce linearmente com r (rotação de corpo rígido) e depois fica aproximadamente constante.
- ▶ Nas curvas de rotação obtidas com o HI, verifica-se que elas continuam constantes bem além do disco estelar.

ME em galáxias espirais



Curvas de rotação típicas de galáxias espirais.

- Implicação de curvas de rotação planas:

Para uma estrela ou nuvem de massa m em um disco em equilíbrio

$$\frac{GmM(< r)}{r^2} = \frac{mv_c^2(r)}{r}$$

($M(< r)$: massa dentro do raio r)

ou

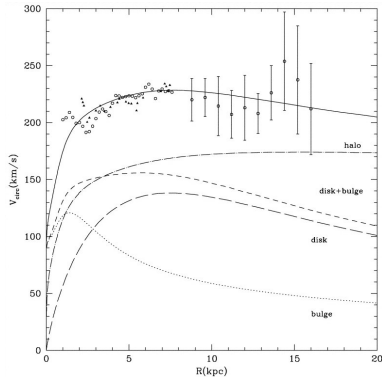
$$M(< r) = \frac{rv_c^2}{G}.$$

Logo, curvas de rotação planas (v_c constante) implicam em $M(< r) \propto r$.

- ▶ Freeman (1970): curvas de rotação planas seriam evidência de um *halo escuro massivo*, aproximadamente esferoidal.
- ▶ a análise de sistemas de galáxias satélites em torno de espirais (Zaritsky et al. 1993) indica que os v_c típicos são de 200 - 250 km/s em raios de pelo menos 200 kpc. Nessas escalas a ME domina.

ME em galáxias espirais

- ▶ Freeman (1970): curvas de rotação planas seriam evidência de um *halo escuro massivo*, aproximadamente esferoidal.
- ▶ Valores típicos para M/L dentro de ~ 20 kpc:
 $M/L_B \sim 10 \pm 2 M_\odot/L_\odot$, ou seja, nesses raios a ME não é dominante.
- ▶ a análise de sistemas de galáxias satélites em torno de espirais (Zaritsky et al. 1993) indica que os v_c típicos são de 200 - 250 km/s em raios de pelo menos 200 kpc.
Nessas escalas a ME domina.



Curva de rotação da Via Láctea com modelos de CDM (Kyplin, Zhao & Somerville 2002). A ME está na forma de um halo.

SIS: a esfera isotérmica singular

- ▶ Modelo simples de sistema gravitacional: SIS
Singular Isothermal Sphere, ou esfera isotérmica singular
- ▶ Útil para descrever (aproximadamente!) a distribuição de massa de galáxias e aglomerados.
- ▶ Sistema esférico, sujeito apenas às forças de pressão e da gravitação: Pode-se imaginar o sistema como um gás cujas partículas são estrelas ou galáxias

SIS: a esfera isotérmica singular

- Suponhamos que o sistema está em equilíbrio hidrostático:

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{GM(< r)\rho(r)}{r^2}$$

onde p e ρ são a pressão e densidade do gás.

- pressão de um gás ideal de partículas de massa m :

$$p = \frac{\rho kT}{m}$$

- sistema gravitacional: relação entre dispersão de velocidades das partículas e temperatura
- σ_v : dispersão de velocidades unidimensional
- Sistema é isotrópico: dispersão de velocidades total: $3\sigma_v^2$

SIS: a esfera isotérmica singular

$$p = \frac{\rho k T}{m}$$

dispersão de velocidades total: $3\sigma_v^2$

- ▶ Teorema da equipartição da energia,

$$\frac{1}{2} m 3\sigma_v^2 = \frac{3}{2} k T,$$

- ▶ logo, a equação de estado deste gás gravitacional é

$$p = \rho \sigma_v^2.$$

SIS: a esfera isotérmica singular

- ▶ sistema isotérmico: σ_v constante
da equação de equilíbrio hidrostático:

$$\rho(r) = \frac{\sigma_v^2}{2\pi Gr^2}$$

$$M(< r) = \int_0^r 4\pi r'^2 \rho(r') dr' = \frac{2\sigma_v^2}{G} r$$

$$(v_c = \sqrt{2}\sigma_v)$$

SIS: a esfera isotérmica singular

Densidade projetada de massa

- ▶ R : coordenada radial no plano do céu
- ▶ a densidade superficial (ou projetada) e a densidade volumétrica se relacionam como:

$$\Sigma(R) = 2 \int_0^{\infty} \rho(r) dz$$

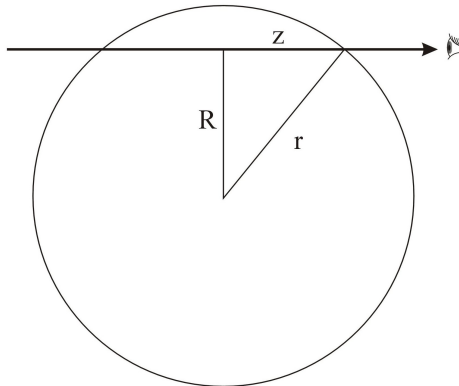
onde

$$r^2 = R^2 + z^2$$

- ▶ É fácil verificar que

$$\Sigma(R) = 2 \int_R^{\infty} \frac{\rho(r) r dr}{\sqrt{r^2 - R^2}}$$

SIS: a esfera isotérmica singular



Esquema ilustrando a relação entre densidade superficial e a volumétrica.

SIS: a esfera isotérmica singular

- ▶ SIS:

$$\Sigma(R) = \frac{\sigma_v^2}{2GR}.$$

- ▶ SIS: é denominada singular porque a densidade diverge na origem.
- ▶ a massa da SIS é infinita, a menos que ela seja truncada.
- ▶ σ_v : dezenas a poucas centenas de km/s para galáxias, até pouco mais de 1000 km/s para aglomerados ricos.

ME em aglomerados de galáxias

A massa de aglomerados pode ser obtida por pelo menos 3 métodos:

- ▶ Teorema do virial
- ▶ Emissão de raios-X
- ▶ Lentes gravitacionais

Teorema do Virial

- ▶ Método tradicional para determinar a massa de aglomerados
- ▶ TV: para um sistema gravitacional em equilíbrio, a energia cinética T e a energia potencial W se relacionam como

$$2T + W = 0$$

$$T = |W|/2$$

Teorema do Virial

- ▶ Sistema esferoidal de massa M , raio R e dispersão de velocidades unidimensional σ_v
- ▶ Energia cinética: $T \sim M\sigma^2/2$
- ▶ σ : Dispersão de velocidades total
- ▶ Energia potencial: $W \sim -GM^2/R$
- ▶ Massa:

$$M \sim \frac{\sigma^2 R}{G}$$

Teorema do Virial

- ▶ TV: requer conhecimento da distribuição de velocidades e de massa.
- ▶ Como não sabemos isso, usamos “estimadores de massa” dependem de hipóteses sobre a distribuição de massas e de velocidades.
- ▶ Ex.: sistema esférico de N galáxias com velocidades radiais v_i e distâncias projetadas relativas R_{ij}
- ▶ massa dentro do raio do virial R_v supondo dispersão de velocidades isotrópica:

$$M_v = \frac{\sigma^2 R_v}{G} = \frac{3\sigma_v^2 R_v}{G}$$

Teorema do Virial

- ▶ Massa (Girardi et al. 1998):

$$M_v = \frac{\sigma^2 R_v}{G} = \frac{3\sigma_v^2 R_v}{G}$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_i v_i^2}{N-1}}$$

$$R_v = \frac{\pi}{2} \frac{N(N-1)}{\sum_{i>j} R_{ij}^{-1}}$$

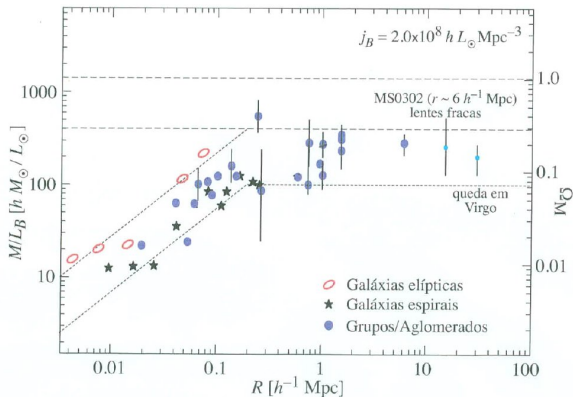
- ▶ Razão massa-luminosidade:

grupos de galáxias: $M/L_B \sim 180 \pm 50 M_\odot/L_\odot$

aglomerados: $M/L_B \sim 320 \pm 100 M_\odot/L_\odot$.

- ▶ Aglomerados: maiores estruturas em equilíbrio no Universo
- ▶ Espera-se que sua razão M/L seja representativa do universo como um todo.
- ▶ M/L cresce com a escala até a escala de aglomerados, ficando constante a partir daí.
- ▶ Isso permite, determinar a quantidade total de matéria no universo.

Determinação de Ω_m



Dependência da razão massa-luminosidade com a escala.

- ▶ Bahcall (1999): massa dentro de um raio de $1.5h^{-1}\text{Mpc}$ com SIS:

$$M(\leq 1.5) \simeq \frac{2\sigma_v^2(1.5h^{-1}\text{Mpc})}{G} \simeq \\ \simeq 0.7 \times 10^{15} \left(\frac{\sigma_v}{1000\text{ km s}^{-1}} \right)^2 h^{-1} M_{\odot}$$

- ▶ Aglomerados ricos: $M(\leq 1.5) \sim (0.1 - 2) \times 10^{15} h^{-1} M_{\odot}$.
- ▶ Luminosidade mediana no azul:
 $L_B(\leq 1.5) \sim (0.6 - 6) \times 10^{12} h^{-2} L_{\odot}$.
- ▶ $M/L_B \sim 300 h M_{\odot}/L_{\odot}$.

- ▶ Aglomerado de Coma (dentro de um raio de $1.5 h^{-1}$ Mpc):
 - ▶ estrelas: $M_* = 1.0 \times 10^{13} h^{-1} M_\odot$
 - ▶ gás: $M_g = 5.5 \times 10^{13} h^{-3/2} M_\odot$
 - ▶ total: $M_T = 6.8 \times 10^{14} h^{-1} M_\odot$
- ▶ Nesse caso, $M/L \sim 350 M_\odot/L_\odot$.
- ▶ Note que a massa total é 10 vezes maior que aquela que se pode atribuir a estrelas e gás.

- ▶ Estimativa de Ω_m :

$$\Omega_m = \rho / \rho_c$$

$$\rho = (M/L_B)j_B$$

j_B : densidade de luminosidade média das galáxias
($L_\odot \text{ Mpc}^{-3}$)

- ▶ Estimativa de Ω_m :

$$\Omega_m = \rho / \rho_c$$

$$\rho_c \equiv 3H_0^2 / (8\pi G) \simeq 2 \times 10^{-29} \text{ h}^2 \text{ g cm}^3$$

$$\rho = (M/L_B) j_B$$

- ▶ $M/L_B \sim 300 M_\odot / L_\odot$
- ▶ $j_B = (2.0 \pm 0.2) \times 10^8 \text{ h } L_\odot$
- ▶ $\Omega_m \simeq 0.2$

Aglomerados possuem um meio intra-aglomerado gasoso quente e extenso que emite raios-X

- ▶ Temperatura $T \sim 10^7 - 10^8$ K
- ▶ Densidade $n \sim 10^{-4} - 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$
- ▶ Luminosidade $L_X \sim 10^9 - 10^{11} L_\odot$
- ▶ Massa $M_{gas} \sim 0.05 - 0.5 M_{agl}$
- ▶ A abundância de Fe no gás é $\sim 1/3$ da solar
ao menos parcialmente enriquecido por material removido do meio interestelar das galáxias

- ▶ Mecanismo de emissão: radiação de *bremsstrahlung* (ou *free-free*)
- ▶ Emissividade do gás: $\epsilon = 2.4 \times 10^{-27} n_e^2 T^{1/2} \text{erg cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
- ▶ Luminosidade: $L_X \sim \epsilon V$, onde V é o volume da região emissora

- ▶ Equilíbrio hidrostático:

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{GM(< r)\rho(r)}{r^2}$$

$$p = \frac{\rho kT}{\mu m_p}$$

μ : peso molecular médio (~ 0.5 para um plasma ionizado)

m_p : massa do proton.

- ▶ Logo,

$$M(< r) = -\frac{kT(r)r}{G\mu m_p} \left(\frac{d \log \rho}{d \log r} + \frac{d \log T}{d \log r} \right)$$

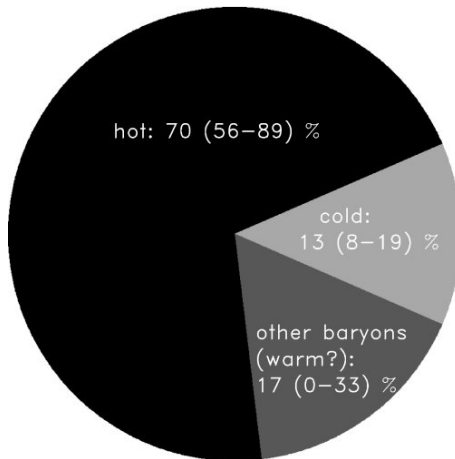
- ▶ Ex. esfera isotérmica ($T = \text{const.}$) de raio r :

$$M(< r) = \frac{2kTr}{G\mu m_p}.$$

Emissão de raios-X

- ▶ Se o aglomerado é perturbado (por exemplo por capturar um grupo de galáxias), o gás volta ao equilíbrio mais rapidamente que as galáxias
- ▶ em consequência, determinações de massa baseadas na emissão X são mais confiáveis que as baseadas no TV.
- ▶ A análise da emissão X permite determinar tanto a massa total quanto a massa do gás quente.
- ▶ A maior parte dos bárions está no halo gasoso quente, não nas galáxias

- ▶ Fração de bárions: $M_b/M_{tot} \simeq (0.03 - 0.15)h^{-1.5}$
mediana dentro de $1.5 h^{-1}$ Mpc: $0.07h^{-1.5}$
- ▶ Ettori (2003) – Como os bárions se encontram nos aglomerados de galáxias:
 - 13%: Estrelas
 - 70%: Gás quente emitindo raios-X
 - 17%: “Outras formas”, possivelmente como material morno ($10^5 - 10^7$ K)



A forma como os bárions se apresentam em aglomerados (Ettori, 2003).

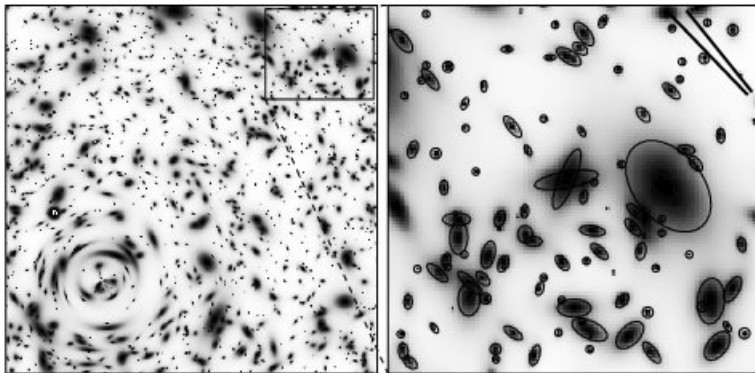
Lentes Gravitacionais

- ▶ Aglomerados podem atuar como lentes grav., amplificando e distorcendo a luz de galáxias mais distantes
- ▶ Dois regimes de efeitos de lentes gravitacionais: fortes e fracas
- ▶ Lentes fortes produzem distorções fortes nas imagens de galáxias de fundo, como arcos gravitacionais ou imagens múltiplas
- ▶ Lentes fracas: distorção suave da forma das galáxias de fundo pelo campo gravitacional do aglomerado

Regimes forte e fraco

- ▶ Ambos os efeitos podem ser usados nas estimativas de massa
- ▶ Essas estimativas de massa não dependem do estado dinâmico (equilíbrio ou não) do aglomerado.

Lentes Gravitacionais



- ▶ As lentes gravitacionais podem ser descritas com o auxílio de duas quantidades:
a *convergência* κ e o *cisalhamento* (*shear*) γ
- ▶ a convergência produz uma magnificação isotrópica da fonte
- ▶ o cisalhamento introduz anisotropia (astigmatismo) na imagem

Lentes Gravitacionais

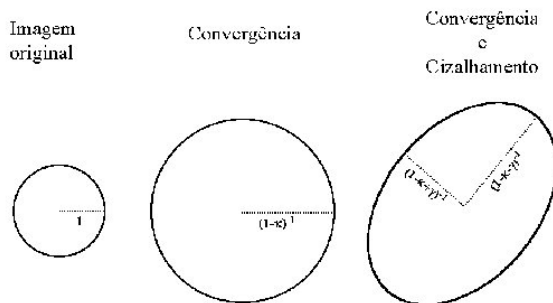


Ilustração dos efeitos da convergência e cizalhamento em uma imagem originalmente circular.

- ▶ A produção de arcos e imagens múltiplas ocorre quando a imagem de uma galáxia de fundo está nas vizinhanças de seu *anel de Einstein* as distorções e magnificação das imagens são extremas.
- ▶ Lente esférica: o raio angular do anel de Einstein é dado por

$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_L D_S}}$$

onde M é a massa da lente projetada dentro de θ_E e D_L , D_S e D_{LS} são distâncias (de diâmetro) ($D_{LS} \neq D_S - D_L$!).

- ▶ Note que θ_E depende da distância da fonte

- ▶ Identificando o anel de Einstein e conhecendo-se a distância do aglomerado e da fonte pode-se medir $M(< \theta_E)$
- ▶ Esfera isotérmica singular:

$$\theta_E = \alpha \frac{D_{LS}}{D_S} \quad (1)$$

onde

$$\alpha = 4\pi \frac{\sigma_v^2}{c^2} \simeq 29'' \times \left(\frac{\sigma_v}{1000 \text{ km/s}} \right)^2. \quad (2)$$

- ▶ A orientação dos eixos de posição das galáxias de fundo (atrás do aglomerado) é arbitrária
- ▶ mas o campo gravitacional do aglomerado produz uma distorção global (o *shear*)
- ▶ o cisalhamento produz uma deformação na imagem dessas galáxias: uma galáxia circular adquire uma certa elipticidade
- ▶ Essa distorção depende do potencial gravitacional: a análise do campo de distorções permite mapear diretamente a distribuição de massa do aglomerado

- ▶ "Elípticidade":

$$\epsilon \equiv \frac{a - b}{a + b}$$

onde a e b são os eixos maior e menor

- ▶ Supondo que as galáxias de fundo têm elipticidades e orientações distribuídas aleatoriamente, pode-se mostrar que, no regime de lentes fracas, o valor esperado da elipticidade num dado ponto é:

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{\gamma}{1 - \kappa}$$

onde γ e κ são os valores médios do módulo do shear e da convergência no ponto considerado no plano da imagem

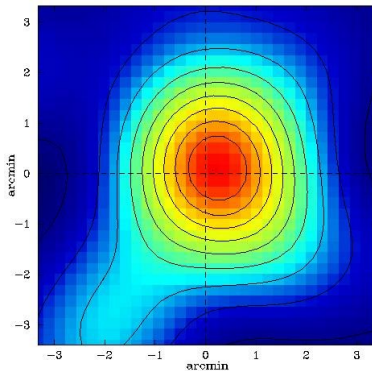
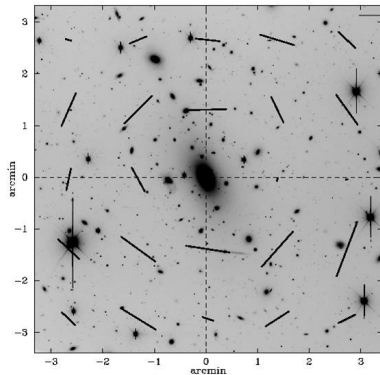
- ▶ exemplo (SIS):

$$\kappa = \gamma = \frac{\theta_E}{2\theta}$$

e a distorção média nesse caso é perpendicular ao raio projetado

- ▶ logo, mapeando as distorções médias ($\langle \epsilon \rangle$) pode-se estimar a distribuição de massa

Lentes Gravitacionais



Matéria bariônica

- ▶ A cosmologia atual impõe vínculos fortes sobre o número de bárions
- ▶ Duas linhas de evidência: a abundância dos elementos leves e a análise da radiação cósmica de fundo
- ▶ Abundância dos elementos leves: $\Omega_b h^2 = 0.021 - 0.025$
- ▶ Flutuações da radiação cósmica de fundo: $\Omega_b h^2 = 0.024$ com $h = 0.73$ temos $\Omega_b \simeq 0.044$

Inventário da matéria bariônica:

- ▶ Estrelas: $\Omega \simeq 0.0025$
- ▶ H e He neutros (atômico e molecular): $\Omega \simeq 0.0008$
- ▶ Gás ionizado (em aglomerados): $\Omega \simeq 0.0013$
- ▶ Gás morno (grupos): $\Omega \simeq 0.005$
- ▶ Gás morno (em volta de galáxias “isoladas”): $\Omega \simeq 0.004$
- ▶ Soma dos bárions conhecidos: $\Omega \simeq 0.014$
- ▶ Bárions não-conhecidos: $\Omega \simeq 0.030$

- ▶ Supõe-se que a maior parte dos bárions não-conhecidos esteja na forma de gás frio/morno em volta das galáxias ou em nuvens não-luminosas
- ▶ Como se mede $\Omega_m \gg \Omega_b$, conclui-se que a maior parte da ME é não-bariônica

MACHOs e matéria escura

- ▶ O fenômeno de lentes gravitacionais permite procurar objetos compactos de baixa luminosidade no halo de nossa galáxia
- ▶ Planetas, anãs marrons, buracos negros: podem constituir parte da ME
- ▶ No halo estes objetos são denominados MACHOs: *massive compact halo objects*.

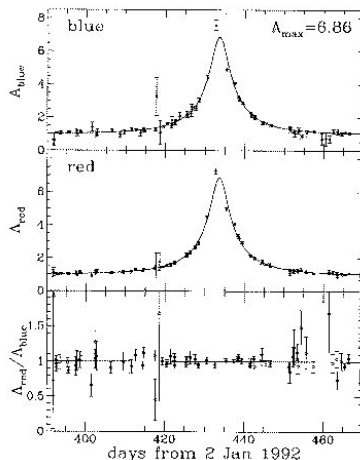
- ▶ Efeito de lente gravitacional produzido por um MACHO: microlente
- ▶ o raio de Einstein é muito pequeno. Ex.: estrela de $1 M_{\odot}$ a uma distância $D_S = 2D_L$

$$\theta_E \simeq 2 \times 10^{-3} \sqrt{\frac{1 \text{ kpc}}{D_L}} \text{ arcsec}$$

mas o fenômeno de microlente pode ser observado!

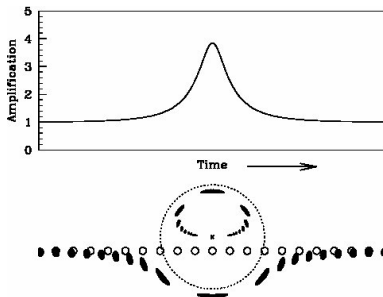
O brilho da estrela é amplificado: conforme a lente se move de modo que seu anel de Einstein passe na frente da estrela, o brilho aparente da estrela vai aumentar e depois diminuir

MACHOs e matéria escura



Curva de luz de uma estrela na LMC que aparentemente sofre a ação de uma lente no halo da Galáxia (Alcock et al. 1993). Note o alto grau de acromaticidade.

MACHOs e matéria escura



Configuração do fenômeno de microlentes. A localização da lente é marcada por uma cruz; este ponto é também a cáustica desta lente. A curva crítica (anel de Einstein está tracejada. A fonte é representada por círculos abertos. Sempre duas imagens são geradas, uma dentro e outra fora do raio de Einstein, em lados opostos da lente. Conforme a lente passa em frente da fonte, o fluxo combinado das duas imagens (em escuro) aumenta e diminui, como ilustrado no painel superior.

- ▶ A variação de brilho é acromática: não depende do comprimento de onda em que é observada
- ▶ isso permite distinguir efeitos de microlentes de estrelas variáveis

MACHOs e matéria escura

Probabilidade de eventos de microlentes:

- ▶ Vamos supor que o halo escuro da Galáxia é formado por MACHOs que podem amplificar a luz de uma estrela na LMC (lentes na Galáxia; fontes na LMC).
- ▶ Consideremos uma área na LMC com densidade estelar $\sim 1 \text{ pc}^{-2}$ (semelhante à vizinhança solar)
- ▶ LMC: $D = 50 \text{ kpc}$ de distância 1 pc corresponde a $\sim 2 \times 10^{-5} \text{ rad}$ um quadrado de 1 pc de lado ocupa um ângulo sólido $\Omega \sim 4 \times 10^{-10} \text{ rad}^2$
- ▶ Vamos supor que o halo é isotérmico (SIS) com $\sigma_v = 220 \text{ km s}^{-1}$

MACHOs e matéria escura

- ▶ massa do halo dentro de Ω até à distância da LMC:
 $M(< D)\Omega/(4\pi) \sim 35 M_{\odot}$
- ▶ se cada MACHO tem $0.1 M_{\odot}$, há $N \sim 300$ MACHOs dentro de Ω
- ▶ anel de Einstein de cada MACHO, supondo $D_L = 10$ kpc e $D_{LS} \sim D_S$: $\theta_E^2 \sim 4GM/(c^2 D_L) \sim 2 \times 10^{-18} \text{ rad}^2$
- ▶ probabilidade de uma estrela da LMC cair dentro do anel de Einstein de um MACHO: $p \sim N\theta_E^2/\theta^2 \sim 10^{-6}$.
- ▶ logo, é necessário monitorar-se milhões de estrelas para observar um evento de microlentes: projetos MACHO, OGLE, MOA, EROS, etc.
- ▶ “profundidade óptica” de microlentes: probabilidade de que em qualquer instante de tempo uma dada estrela esteja dentro de um ângulo θ_E de uma lente:

$$\tau = \frac{1}{d\Omega} \int n(D_L) \pi \theta_E^2 dV$$

$$\tau = \frac{2\pi}{3} \frac{G\rho}{c^2} D_S^2$$

- ▶ Alguns resultados:
- ▶ $\tau = (3.3 \pm 1.2) \times 10^{-6}$ (Paczynski et al. 1994)
- ▶ $\tau = (3.9 \pm 1.5) \times 10^{-6}$ (Alcock et al. 1997)
- ▶ Conclusões de natureza cosmológica:
- ▶ A duração de um evento de microlente pode ser escrita como

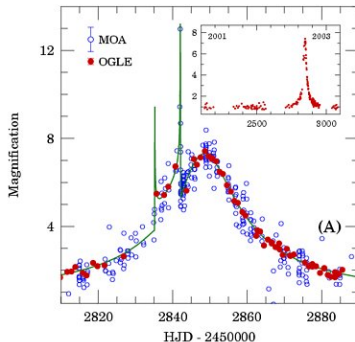
$$t \sim \frac{D_L \theta_E}{v} = 0.2 \left(\frac{M}{M_\odot} \frac{D_L}{10 \text{ kpc}} \frac{D_{LS}}{D_S} \right)^{1/2} \left(\frac{200 \text{ km/s}}{v} \right) \text{ anos}$$

MACHOs e matéria escura

- ▶ Projetos EROS e MACHO: nenhum evento foi detectado com $t < 10$ dias.
- ▶ A análise desse tipo de resultado implica que $< 25\%$ da massa do halo está em objetos com massas entre $10^{-7} - 10^{-4} M_{\odot}$.
- ▶ MACHO: detectou-se 15 eventos na direção da LMC com durações 30-130 dias, provavelmente produzidos por objetos com $M = 0.1 - 1 M_{\odot}$.
- ▶ Esperava-se 60-80 eventos se o halo é totalmente constituído de MACHOs.
- ▶ Não foi observado nenhum evento com $t > 150$ dias ($30 M_{\odot}$).

- ▶ No caso do EROS, concluiu-se que objetos com massa menor que $1M_{\odot}$ contribuem com menos de 40% da massa.
- ▶ Em conclusão: aparentemente, mais da metade da massa no halo escuro das galáxias não é constituída por MACHOs.
- ▶ Por outro lado, verificou-se que microlente é uma boa técnica para se detectar planetas extra-solares

MACHOs e matéria escura



Detecção de um planeta extrasolar por microlentes: OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53. A forma da curva de luz é a esperada quando a lente é um sistema binário, mas seu modelamento revelou que a componente mais leve tem 0.4% da massa da componente mais massiva, devendo ser um planeta.

Matéria escura como partículas

- ▶ Modelo do Big-Bang: ME como *partículas relíquias* partículas que sobreviveram à aniquilação no começo do universo
- ▶ um dos melhores candidatos: WIMPs- *weakly interacting massive particles*
Os WIMPs não interagiriam com a luz, mas podem interagir com a matéria bariônica via interações fracas

Matéria escura como partículas

- ▶ Começo do universo: pares de partícula e antipartícula de massa m são criadas e aniquiladas continuamente, em equilíbrio com o campo de radiação
- ▶ isso ocorre enquanto a energia média dos ftons do campo de radiação, kT , for maior que a energia de repouso do par, $2mc^2$
- ▶ o universo está se expandindo e, devido à aniquilação, a densidade das partículas pesadas vai decrescendo
- ▶ depois de um certo tempo a taxa de aniquilação fica muito longa e a aniquilação cessa, fenômeno denominado *freeze-out* (congelamento)
- ▶ a partir daí o número de partículas relíquia ficaria constante: seriam essas as partículas que constituem a ME

Matéria escura como partículas

- ▶ um parâmetro crítico neste tipo de análise é a razão entre a taxa de expansão do universo naquele momento (H^{-1}) e a taxa de aniquilação
- ▶ examinando-se como evolui a criação e destruição dessas partículas até o *freeze-out* pode-se determinar as previsões de um dado modelo para as partículas de ME
- ▶ Dodelson: caso onde a densidade de matéria ρ_m não depende de m , a massa da partícula escura:
se a ME se forma em temperaturas de ~ 100 GeV (que é uma das possibilidades que se espera pelo modelo padrão de partículas elementares),

$$\Omega_m \simeq 0.3 h^{-2} \frac{10^{-39} \text{ cm}^2}{\sigma}$$

$\sigma \sim 10^{-39} \text{ cm}^2$ pode ser explicado por várias teorias

Matéria escura como partículas

- ▶ Exemplo de WIMP que aparece nas teorias super-simétricas: o *neutralino*
o neutralino é a mais leve das partículas supersimétricas e, para ser um bom candidato a ME, sua massa deve estar entre 1 GeV e 1 TeV
- ▶ outro candidato: o *axion*, que aparece na cromodinâmica quântica
massas entre 10^{-5} e 10^{-2} eV; teria sido formada fora do equilíbrio termodinâmico e nunca teria sido relativística

Matéria escura como partículas

► unidades:

energia- eletrón-volt (eV): $1 \text{ eV} \simeq 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

massa: usando-se $E = mc^2$, uma unidade de massa é $\text{eV}/c^2 \simeq 1.78 \times 10^{-36} \text{ kg}$, abreviada também por eV

exemplo: massa de um eletrón é de 0.51 MeV

seção de choque: $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2 = 2568 \text{ GeV}^{-2}$

Matéria escura fria (CDM)

Em geral distingue-se 2 tipos de matéria (não-bariônica) do ponto de vista de sua interação com a radiação:

- ▶ térmica: ficam em equilíbrio térmico até se desacoplarem da radiação
- ▶ não-térmica: não são produzidas em equilíbrio térmico com o resto do universo
ex.: monopolos, axions, strings cósmicas

A física de partículas não-térmicas é muito mais complicada (e incompleta) que a das partículas térmicas.

Matéria escura fria (CDM)

Quanto à "temperatura" da ME distingue-se

- ▶ Quente (HDM, *hot dark matter*): são relativísticas quando se desacoplam. e.g.: neutrinos massivos
- ▶ Movem-se rapidamente e, portanto, podem escapar facilmente dos poços de potencial (*free-streaming*)
- ▶ Se toda a ME fosse quente, as primeiras estruturas a se formar seriam muito grandes, e as estruturas menores seriam formadas por fragmentação das estruturas maiores (cenário *top-down*).

Matéria escura fria (CDM)

- ▶ Movem-se lentamente (velocidades sub-relativísticas no desacoplamento): levam a um cenário hierárquico (*bottom-up*) de formação de estruturas
- ▶ Morna (WDM, *warm dark matter*): com propriedades intermediárias

Matéria escura fria (CDM)

Quanto aos candidatos mais prováveis, tem-se

- ▶ ME quente: neutrinos
- ▶ ME morna: gravitino
- ▶ ME fria: WIMPs- neutralino ($m \sim 100 \text{ GeV}$), axino, axions ($m \sim 10^{-5} \text{ eV}$)

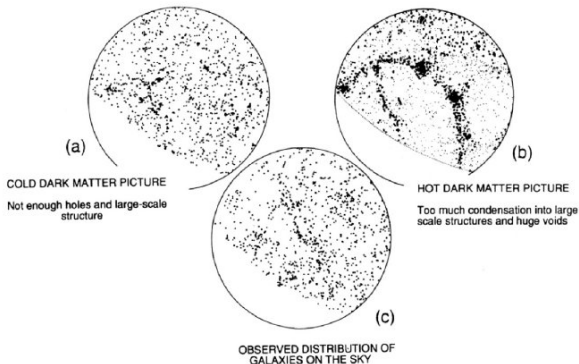
Matéria escura fria (CDM)

- ▶ modelo CDM: explica muito bem a estrutura em grandes escalas, como os espectros de potência da distribuição de galáxias e da radiação cósmica de fundo, além de ser o único cenário viável de formação de estruturas por instabilidade gravitacional
- ▶ como a interação entre as partículas de ME é puramente gravitacional, seu estudo é bastante facilitado usando-se simulações numéricas de N -corpos

Neutrinos como matéria escura

- ▶ neutrinos massivos são um tipo de ME que sabemos que existe
- ▶ são ME quente: flutuações de densidade de baixa massa são dissipadas por *free streaming* (os neutrinos arrastam a matéria e destroem flutuações de densidade pequenas)
- ▶ se toda a ME fosse quente, as primeiras estruturas seriam muito massivas, e as estruturas menores seriam formadas por fragmentação das estruturas maiores

Neutrinos como matéria escura



(From Longair, *Galaxy Formation*, Springer-Verlag 1998)

Figure: Comparação de universos simulados com ME fria e quente com a distribuição observada de galáxias.

Neutrinos como matéria escura

- ▶ O fato dos neutrinos terem massa altera tanto a forma do espectro de potência da distribuição de galáxias quanto o da radiação cósmica de fundo.
- ▶ No caso da distribuição de galáxias, o *free-streaming* remove as flutuações abaixo de uma certa escala que depende da massa dos neutrinos e do redshift.
- ▶ No caso da RCF, neutrinos massivos modificam a escala do pico acústico e a altura relativa dos picos secundários.

Neutrinos como matéria escura

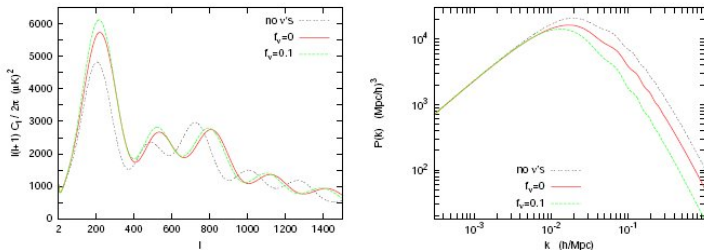


Figure: Espectro de potências das flutuações de temperatura da RCF (esquerda) e da distribuição de galáxias (direita). A curva pontilhada (azul) é o modelo Λ CDM convencional, sem neutrinos. A curva contínua (vermelha) é o que se espera se os neutrinos não tivessem massa, e a tracejada (verde) se a contribuição dos neutrinos para a ME, $f_\nu \equiv \Omega_\nu / \Omega_m = 0.1$.

Neutrinos como matéria escura

- ▶ distância própria que uma partícula com velocidade v viaja entre os tempos 0 e t :

$$L(t) = R(t) \int_0^t \frac{v(t') dt'}{R(t')}$$

- ▶ Enquanto a partícula for relativística: $t < t_{nr} (< t_{eq})$, $v \simeq c$, de modo que L é o tamanho do horizonte.
- ▶ Para $R \propto t^{1/2}$, $L = 2ct$.
- ▶ Se esta partícula deixa de ser relativística em $t > t_{nr} \gg t_{eq}$ pode-se mostrar que esta escala hoje corresponde a

$$l_{fs} \equiv L(t_0) \simeq \frac{R_0}{R_{nr}} 2ct_{nr} \left(\frac{5}{2} + \ln\left(\frac{R_{eq}}{R_{nr}}\right) \right)$$

Neutrinos como matéria escura

- ▶ Para um neutrino de massa 30 eV, esta escala corresponde a

$$l_{fs} \simeq 28 \text{ Mpc} \left(\frac{m_\nu}{30 \text{ eV}} \right)^{-1}$$

e a massa associada é

$$M_{fs} \simeq 4 \times 10^{15} \left(\frac{m_\nu}{30 \text{ eV}} \right)^{-2} M_\odot$$

- ▶ Galáxias têm massa menor ou da ordem de $10^{12} M_\odot$ e, portanto, não poderiam ser formadas se os neutrinos tiverem massa dessa ordem de grandeza porque o free-streaming dissiparia essas flutuações.

Neutrinos como matéria escura

- ▶ Fukugita et al. (2006) usando os dados de 3 anos do WMAP:
 $\sum m_\nu < 2.0 \text{ eV}$ (95% CL)
- ▶ Em combinação com dados da estrutura em grandes escalas, como o SDSS ou o 2dFGRS, obtém-se $\sum m_\nu \lesssim 0.9 \text{ eV}$ (95% CL; Spergel et al. 2007).
- ▶ Outra análise (Seljak et al. 2006) põe limites ainda mais fortes: $\sum m_\nu \lesssim 0.17 \text{ eV}$ (95% CL).
- ▶ a astrofísica provê os vínculos mais fortes para a massa do neutrino!
- ▶ $\Omega_\nu h^2 = \sum m_\nu / 93 \text{ eV}$
Daí pode-se verificar que os neutrinos não podem ser a componente dominante da ME.

Neutrinos como matéria escura

- ▶ Pode-se considerar que a ME seja quente
Nesse caso, a massa das partículas teria que ser muito maior que a dos neutrinos e, então, o efeito do free-streaming na supressão de estruturas em pequenas escalas seria ainda mais radical

Neutrinos como matéria escura

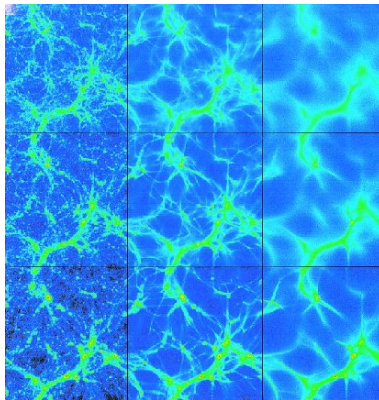


Figure: Densidade projetada em caixas de $20 h^{-1}$ Mpc, numa escala logaritmica. Da esquerda para a direita: Λ CDM, $m_\chi = 350$ eV, $m_\chi = 175$ eV, onde m_χ é a massa da partícula num modelo Λ WDM. Do alto para baixo: $z=3, 2, 1$ (Bode et al. 2001).

O perfil radial de halos de CDM

- ▶ simulações numéricas com CDM: o perfil de densidade dos halos de ME, de pequenas escalas (galáxias satélites) a escalas muito grandes (aglomerados) pode ser aproximado por um perfil universal denominado NFW (Navarro, Frenk & White 1995, 1997):

$$\rho(r) = \frac{\delta_c \rho_c}{\left(\frac{r}{r_s}\right) \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2}$$

- ▶ normalização : usando r_{200} , o raio dentro do qual a densidade do halo é $200\rho_c$
Frequentemente se associa r_{200} ao o raio do virial.
- ▶ raio característico do halo:

$$r_s \equiv \frac{r_{200}}{c}$$

- ▶ c : parâmetro de concentração do halo
Em aglomerados de galáxias, $c \sim 6$.

O perfil radial de halos de CDM

- ▶ O contraste de densidade característico do halo é

$$\delta_c = \frac{200}{3} \frac{c^3}{\ln(1+c) - c/(1+c)}$$

- ▶ outras aproximações : Diemand et al. (2004)

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{\left(\frac{r}{r_s}\right)^\gamma [1 + (r/r_s)^\alpha]^{(\beta-\gamma)/\alpha}}$$

com $\alpha = 1$, $\beta = 3$ e $\gamma = 1.16 \pm 0.14$.

- ▶ Schmidt & Allen (2007) (34 aglomerados massivos e relaxados usando observações em raios-X do Chandra)

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{\left(\frac{r}{r_s}\right)^\alpha [1 + (r/r_s)]^{3-\alpha}}$$

obtendo $\alpha = 0.88 \pm 0.29$

Problemas e alternativas a CDM

- Verificaram também que

$$c \propto M_v^a / (1+z)^b$$

com $a = -0.41 \pm 0.11$ e $b = 0.54 \pm 0.47$.

Simulações : $a \sim -0.1$ e $b \sim 1$.

c aumenta com o tempo e diminui com o aumento da massa do aglomerado.

Problemas e alternativas a CDM

O modelo Λ CDM explica bem a estrutura em grandes escalas mas apresenta alguns problemas. Os mais importantes são:

- ▶ problema do excesso de satélites: os modelos prevêem pelo menos 1 ordem de grandeza mais satélites que o que se observa em torno, por exemplo, da Via Láctea
- ▶ problema dos perfis: os perfis dos halos de ME (NFW) parecem ser excessivamente pontudos comparados com os obtidos via lentes gravitacionais ou curvas de rotação
- ▶ problema dos discos: discos muito pequenos e com pouco momentum angular comparado com as observações

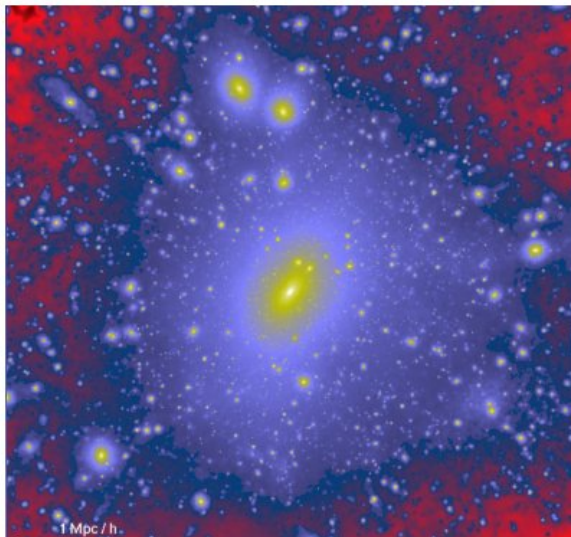
Problemas e alternativas a CDM: excesso nas pequenas escalas

Simulações / modelos como Press-Schechter: prevêm um número de halos de baixa massa muito grande.

Se todos os halos abrigassem uma galáxia, o número de satélites do Grupo Local deveria ser de várias centenas, e não uns 30 como se observa

- ▶ Uma solução para esse problema é supor que halos de baixa massa não formam galáxias. Por exemplo, o feedback por supernovas pode aquecer e ejetar e/ou evaporar o gás de um halo de baixa massa.
- ▶ Outra possibilidade é que a acreção de gás em halos de baixa massa é suprimida depois da época da reionização ($z \sim 10 - 20$) pois o gás evaporaria e não haveria gás suficiente para resfriar e formar estrelas

Problemas e alternativas a CDM: excesso nas pequenas escalas



Problemas e alternativas a CDM: excesso nas pequenas escalas

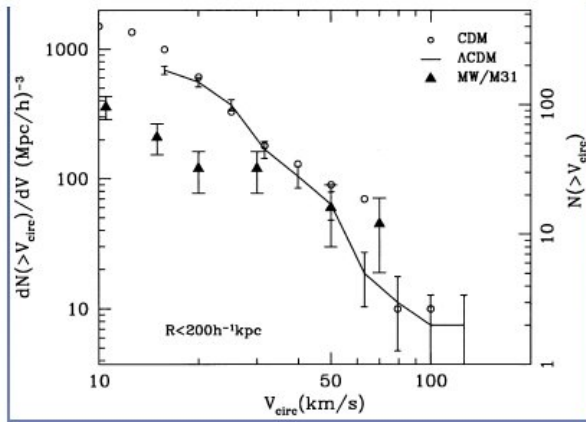


Figure: Abundância de halos nas simulações de Klypin et al. (1999) e no Grupo Local.

Problemas e alternativas a CDM: excesso nas pequenas escalas

- ▶ Essas propostas, portanto, resolvem o problema recorrendo à física dos bárions.
- ▶ Os pequenos halos de ME estariam em torno das galáxias, mas sem conter estrelas.

Problemas e alternativas a CDM: perfis de densidade dos halos

- ▶ perfil NFW: próximo ao centro, $\rho \propto r^{-1}$
- ▶ esse perfil leva a valores do raio de Einstein muito pequenos, menores que os encontrados em lentes fortes
- ▶ pode ser que as regiões centrais dos halos tenham um caroço (*core*), com raio $\sim 20 - 60$ kpc em aglomerados.

Problemas e alternativas a CDM: perfis de densidade dos halos

- ▶ Galáxias de baixo brilho superficial (LSB): são excelentes laboratórios para se estudar a ME pois, aparentemente, são dominadas por ME em toda sua extensão, com a matéria bariônica contribuindo apenas fracamente para a curva de rotação.
- ▶ de Blok et al. (2001): estudaram 13 galáxias LSB e verificaram que sua distribuição interna de massa é menos inclinada que um perfil NFW, indicando na verdade um perfil achatado- ou um caroço- na região central.

Problemas e alternativas a CDM: perfis de densidade dos halos

- ▶ curvas de rotação de galáxias com disco (Salucci & Borriello 2002):
encontraram um perfil de densidade “universal” que pode ser expresso como a soma de um disco estelar exponencial fino mais uma componente esferoidal de ME com um caroço chato de raio r_0 e densidade $\rho_0 = 4.5 \times 10^{-2} (r_0/\text{Kpc})^{-2/3} M_{\odot} \text{pc}^{-3}$.

Problemas e alternativas a CDM: perfis de densidade dos halos

- ▶ Gilmore et al. (2007):
- ▶ bimodalidade na distribuição de raios efetivos:
aglomerados estelares são sempre menores que ~ 30 pc
enquanto que galáxias são sempre maiores que ~ 120 pc.
- ▶ Galáxias têm ME; aglomerados estelares não (ao menos não são dominados por ela).
- ▶ as menores estruturas dominadas por ME formam caroços com tamanhos maiores que ~ 100 pc e densidades da ordem de $0.1 M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$ ($\sim 5 \text{ GeV}/c^2 \text{ cm}^{-3}$).
- ▶ a menor dispersão de velocidades encontrada em galáxias é $\sim 15 \text{ km s}^{-1}$.

Problemas e alternativas a CDM: discos pequenos e com pouco momento angular

- ▶ terceiro problema com CDM: os discos formados nas simulações são muito pequenos e giram muito devagar.
- ▶ Aparentemente este problema é causado por *over-cooling* do gás nas simulações
Imagina-se que o feedback de SNs possa aquecer o gás e que a acreção de satélites possa aumentar o momento angular, levando a uma solução desse problema.

- ▶ As simulações numéricas com CDM assumem que a interação entre as partículas de ME é puramente gravitacional.
- ▶ Pode ser que isso não seja estritamente verdadeiro e que propriedades adicionais da ME ajudem a resolver os problemas
- ▶ Ostriker & Steinhardt (2003) discutem que pode ser que as partículas de ME interajam entre si ou com a matéria bariônica de outras formas.

Eis alguns exemplos:

- ▶ SIDM (*strongly self-interacting dark matter*): ME com seção de choque de espalhamento alta - dissipa halos pequenos em torno de grandes estruturas
- ▶ RDM (*repulsive dark matter*): potencial repulsivo de curto alcance- evita núcleos pontudos
- ▶ SADM (*self-annihilating dark matter*): ME auto-aniquilante - reduz a densidade central por remoção direta de massa por aniquilação e subsequente expansão do sistema para se ajustar ao novo potencial gravitacional
- ▶ DDM (*decaying dark matter*): ME instável- decai em partículas relativísticas e outras de massa menor, diminuindo a massa central dos halos

- ▶ FDM (*fuzzy dark matter*): partículas ultra-leves com tamanho efetivo ($\lambda_{\text{compton}} = h/mc$) da ordem do tamanho do núcleo de uma galáxia
- ▶ WDM: *warm dark matter*- formada, por exemplo, pelo decaimento de outras partículas
- ▶ BH (*black holes*): buraco negro massivo central

- ▶ Ostriker & Steinhardt argumentam que diferentes tipos de ME levam a:
 - * diferentes histórias de formação das galáxias
 - * diferentes funções de massa para as galáxias
 - * diferentes estruturas internas para os halos escuros
 - * diferentes abundâncias de satélites
- ▶ a investigação dessas propriedades pode ajudar a definir o caráter da ME.

Alternativas a CDM

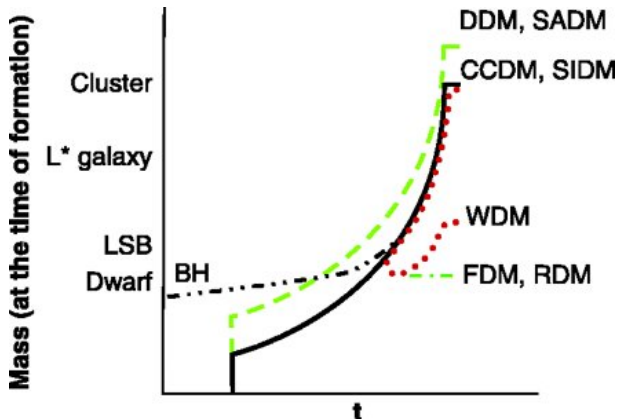
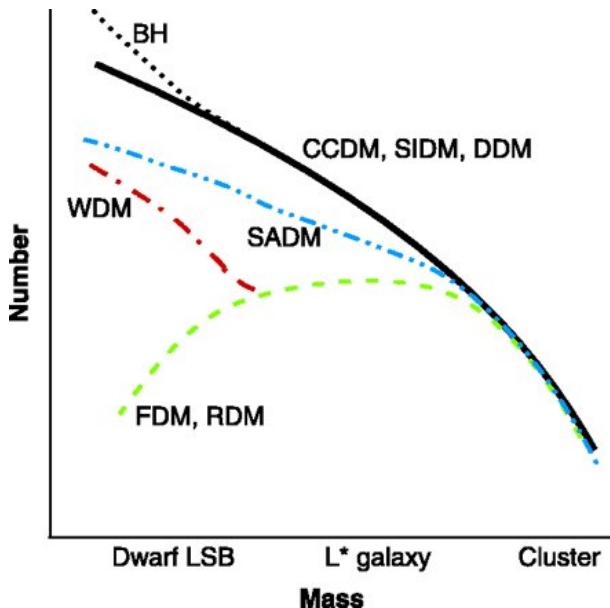
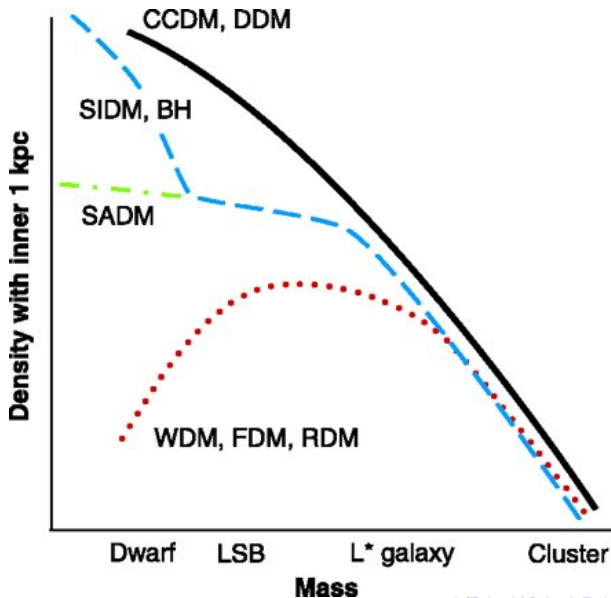


Figure: Ostriker & Steinhardt: história da formação de estruturas. Época de formação de um objeto de uma dada massa em função da massa para diferentes modelos de ME.

Alternativas a CDM



Alternativas a CDM



Alternativas a CDM

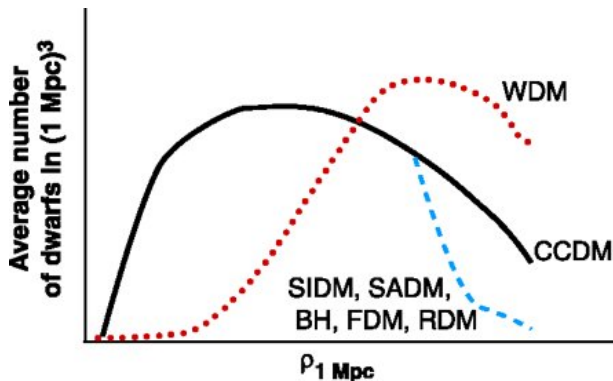


Figure: Ostriker & Steinhardt: Ambiente. Número de anãs dentro de 1 Mpc^3 em função da densidade média dentro deste volume.

Uma das alternativas que tem sido exploradas em simulações numéricas é a ME auto-interagente (Yoshida et al., 2000).

- ▶ Nesse caso, supõe-se que as partículas de ME podem sofrer colisões elásticas, tipo bola de bilhar.
- ▶ Assume-se que elas têm um livre caminho médio $\lambda = 1/n\sigma$, onde n é a densidade em número de partículas de ME e σ a seção de choque de auto-interação.
- ▶ Os resultados mostram que poucas interações (em um t_H) afetam o perfil dos halos escuros.
- ▶ Porém, a seção de choque necessária para resolver o problema dos satélites produz halos excessivamente arredondados.

Alternativas a CDM

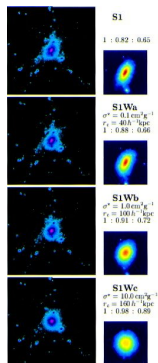


Figure: Distribuição de massa projetada em uma caixa de $15h^{-1}$ Mpc de lado para simulações com CDM normal e 3 seções de choque de auto-interação crescentes de cima para baixo. Para cada simulação está indicado a seção de choque e o tamanho do "raio do core" e as razões axiais da distribuição de massa resultante.

- ▶ De qualquer modo, explorar essas possibilidades numerica e observacionalmente é uma rota astrofísica para tentar desvendar a natureza da ME.
- ▶ Note que, na verdade, a ME pode ser constituída por mais de um tipo de partícula!

Detecção direta da matéria escura

- ▶ Há muitas tentativas de detecção direta da ME.
- ▶ Por exemplo, será que a ME é auto-aniquilante?
- ▶ Boehm, Hooper, Silk & Casse (2003) discutem essa possibilidade a partir dos resultados do satélite Integral, que é sensível à radiação γ .
- ▶ Esse satélite detectou uma distribuição extensa de ftons de 511 keV na direção do bojo (com um raio de ~ 1 kpc do núcleo).
- ▶ Os ftons de 511 keV são produzidos por aniquilação e^-/e^+ e a hipótese é que esses pares são produzidos por aniquilação de partículas da ME com massas ~ 1 -100 MeV
- ▶ (aparentemente, a explicação é outra: seriam produzidos em sistemas binários de baixa massa que são emissores fortes de raios-X).

Detecção direta da matéria escura

Detecção de WIMPS:

- ▶ Na posição do Sol, a densidade esperada de partículas de ME é $\rho_{ME} \simeq 5 \times 10^{-24} \text{ g cm}^{-3} \simeq 0.3 \text{ GeV cm}^{-3}$.
- ▶ Para WIMPs com $m \simeq 100 \text{ GeV}$, a densidade numérica é $n_{ME} \simeq 3 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$.
- ▶ Além disso, como partilham o mesmo poço de potencial, sua velocidade deve ser similar á velocidade do Sol em torno do centro da Via Láctea, $v \sim 250 \text{ km/s}$.
- ▶ Isso implica num fluxo de partículas de ME incidentes sobre a Terra de $J = n_{ME} v \sim 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Detecção direta da matéria escura

- ▶ A interação dessas partículas com a matéria bariônica deve ser muito fraca e a maior parte deve atravessar a Terra como se ela fosse transparente.
- ▶ Se a ME tem interação eletrofraca, uma partícula de massa 100 GeV terá seção de choque $\sigma \sim 10^{-9} \text{ GeV}^{-2}$.
- ▶ Considere um detector constituído de um material com núcleos compostos por uns 100 nucleons, isto é, $m_N \sim 100 \text{ GeV}$.
- ▶ A taxa de reação no detector será de $R \sim J\sigma/m_N \sim 10 \text{ eventos kg}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Detecção direta da matéria escura

- ▶ Há mais de 20 experimentos já operacionais ou que entrarão em operação brevemente visando detectar partículas de ME.
- ▶ Esses experimentos são baseados na
 - * detecção de espalhamento elástico por núcleos ou
 - * pela detecção da energia de recuo de um núcleo que sofreu um espalhamento por uma WIMP, ou
 - * pela detecção de fótons ou partículas provenientes de aniquilações de partículas de ME.
- ▶ Exemplos de experimentos: AMANDA, CDMS, DAMA, EDELWEISS. Espera-se que o LHC traga importantes contribuições para a área.

Detecção direta da matéria escura

O grupo DAMA (agora DAMA/LIBRA) vem argumentando que detectou WIMPs (ver Bernabei et al. 2008), mas outros grupos têm contestado esta descoberta.

- ▶ Mas pode ser que a teoria da gravitação esteja errada e o efeito que atribuímos à existência de ME seja resultado de desvios na teoria da gravitação!
- ▶ MOND (Modified Newtonian Dynamics), proposto por Milgrom (1983)
- ▶ Milgrom sugeriu que a curva de rotação $V(r)$ das galáxias poderia ser explicada modificando a gravidade (ver www.astro.umd.edu/~ssm/mond).

- ▶ O princípio do modelo é que a aceleração gravitacional tende a uma constante, $a_0 \simeq 1.2 \times 10^{-8} \text{ cm s}^{-2}$, para forças gravitacionais pequenas:

$$g = \frac{V^2}{r} = \frac{GM}{r^2 \mu(g/a_0)}$$

onde

$$\mu(g/a_0) = \begin{cases} 1 & g \gg a_0, \\ g/a_0 & g \ll a_0. \end{cases}$$

- ▶ O modelo explica bem as curvas de rotação das espirais (na verdade foi feito para isso!). Recentemente Beckenstein criou uma versão relativística deste modelo (chamado TEVES).

- ▶ Uma observação recente, contudo, se não falsifica MOND, ao menos reduz significativamente seu apelo, mostrando a necessidade de se ter ME.
- ▶ Analisando um aglomerado em forte interação (o *bullet cluster*, 1E0657-556), Clowe et al. (2006) mostraram, usando weak lensing e observações em raios-X, que a distribuição relativa do gás quente (que contém o grosso da matéria bariônica e é detectado via raios-X) e da ME (detectada via weak lensing) eram diferentes e inconsistentes com o que se espera da gravitação modificada
- ▶ Esse aglomerado está sendo observado logo após a passagem de um aglomerado menor em alta velocidade pelo seu centro.

- ▶ Como o gás é fortemente colisional, ele sofre choques e se retarda em relação à ME e as galáxias.
- ▶ Num cenário MOND se esperaria que a ME detectada via weak lensing fosse coincidente com o gás, mas o que se vê é o gás e a ME segregados.

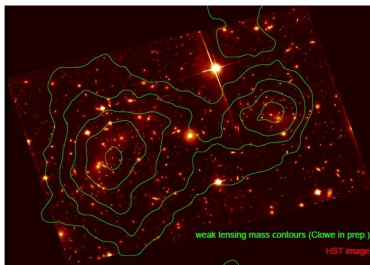


Figure: Resultados de Clowe et al. para o *bullet cluster*, 1E0657-556. Acima: distribuição de galáxias com as curvas de nível da distribuição de massa obtida via weak lensing sobrepostas. Abaixo: emissão de raios-X (vermelho) medida com o Chandra com a distribuição de massa (azul) sobreposta.

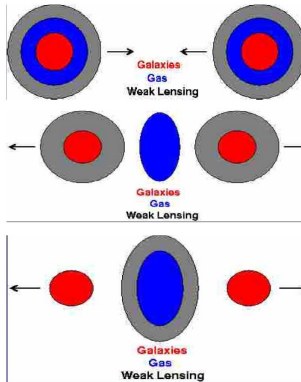


Figure: Modelo para o *bullet cluster*. Topo: os dois aglomerados antes da colisão, mostrando a distribuição relativa de ME, galáxias, e gás. Meio: o que se espera com ME. Baixo: o que se espera com MOND.

Referências

- Alcock C., et al., 1997, ApJ, 486, 697
- Bahcall N., 1999, em *Formation of Structure in the Universe*, ed. por A. Dekel & J. Ostriker, p. 135
- Beckenstein J.D., 2004, Phys. Rev. D, 70, 083509
- Bernabei R., et al., 2008, arXiv:0804.2741
- Bertone G., et al., 2005, Phys. Rep., 405, 279 (hep-ph/0404175)
- Bode P., et al., ApJ, 556, 93, 2001
- Boehm C., et al., 2004, Ph. Rv. L., 92, 101301
- Bullock J.S., et al., 2000, ApJ, 539, 517
- Clowe D., et al., 2006, ApJ, 648, L109
- Cypriano E., et al., 2004, ApJ, 613, 95
- de Blok W.J.G., et al., 2001, ApJ, 552, L23
- Diemand J., et al., 2004, MNRAS, 353, 624
- Dodelson S., 2003, Modern Cosmology
- Ettori S., 2003, MNRAS, 344, L13
- Freeman, K.C., 1970, ApJ, 160, 811
- Fukugita M., et al. Phys. Rev. D 74, 027302, 2006
- Gilmore G., et al., 2007, ApJ, 663, 948

Girardi M., et al., 1998, ApJ, 505, 74
Hinshaw G., et al., 2008, arXiv:0803.0732
Klypin A., et al., 1999, ApJ, 522, 82
Kyplin A., et al., 2002, ApJ, 573, 597
Lesgourgues J, Pastor S., 2006, Ph. R., 429, 307
Milgrom M., 1983, ApJ, 270, 384
Navarro J., Frenk C., White S.D., 1995, MNRAS, 275, 720
Navarro J., Frenk C., White S.D., 1997, ApJ, 490, 493
Ostriker, J., Steinhardt P., 2003, Sci, 300, 1909
Paczynski B., et al., 1994, astro-ph/9411004
Salucci P., Borriello A., em *Particle Physics in the New Millennium*, ed. J. Trampeti, J. Wess, Lecture Notes in Physics, vol. 616, p.66 (astro-ph/0203457)
Schmidt R.W., Allen S.W., 2007, MNRAS, 379, 209
Seljak U., et al., 2006, Phys. Rev. Lett. 97, 191303
Spergel D.N., et al. 2007, ApJS, 170, 377
Sumner T.J., 2002, em www.livingreviews.org
Yoshida N., et al., 2000, ApJ 544, L87
Zaritsky D., et al., 1993, ApJ, 405, 464

Zwicky F., 1937, ApJ, 86, 217