

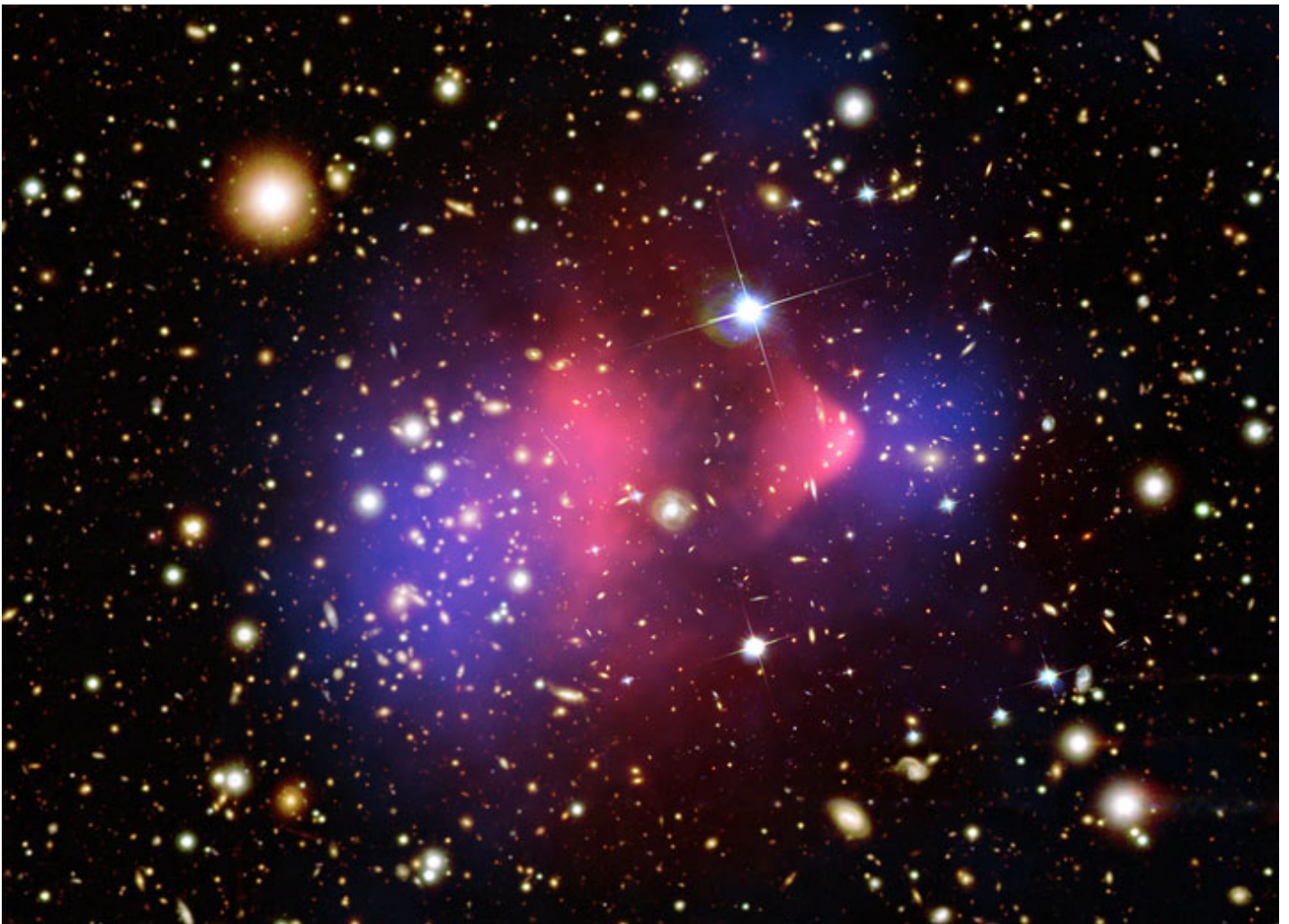
FIS02012 - Cosmologia e Relatividade
Profa. Thaisa Storchi Bergmann

Bibliografia: baseado no capítulo 8 do livro de Barbara Ryden

Matéria Escura

Notícia de 21 de Agosto de 2006:

A estrutura abaixo é o Aglomerado Bala (Bullet Cluster), que se constitui na verdade de dois aglomerados de galáxias passando um através do outro. A matéria luminosa – gás quente que emite em raios-X, representada em vermelho na figura -- de um aglomerado interage com a do outro a medida que eles se atravessam. Entretanto, a matéria escura – representada em azul – não interage, passando direto, separando os dois tipos de matéria: a matéria escura, que vai “na frente” e a matéria luminosa, que segue atrás, sofrendo efeito de arrasto.



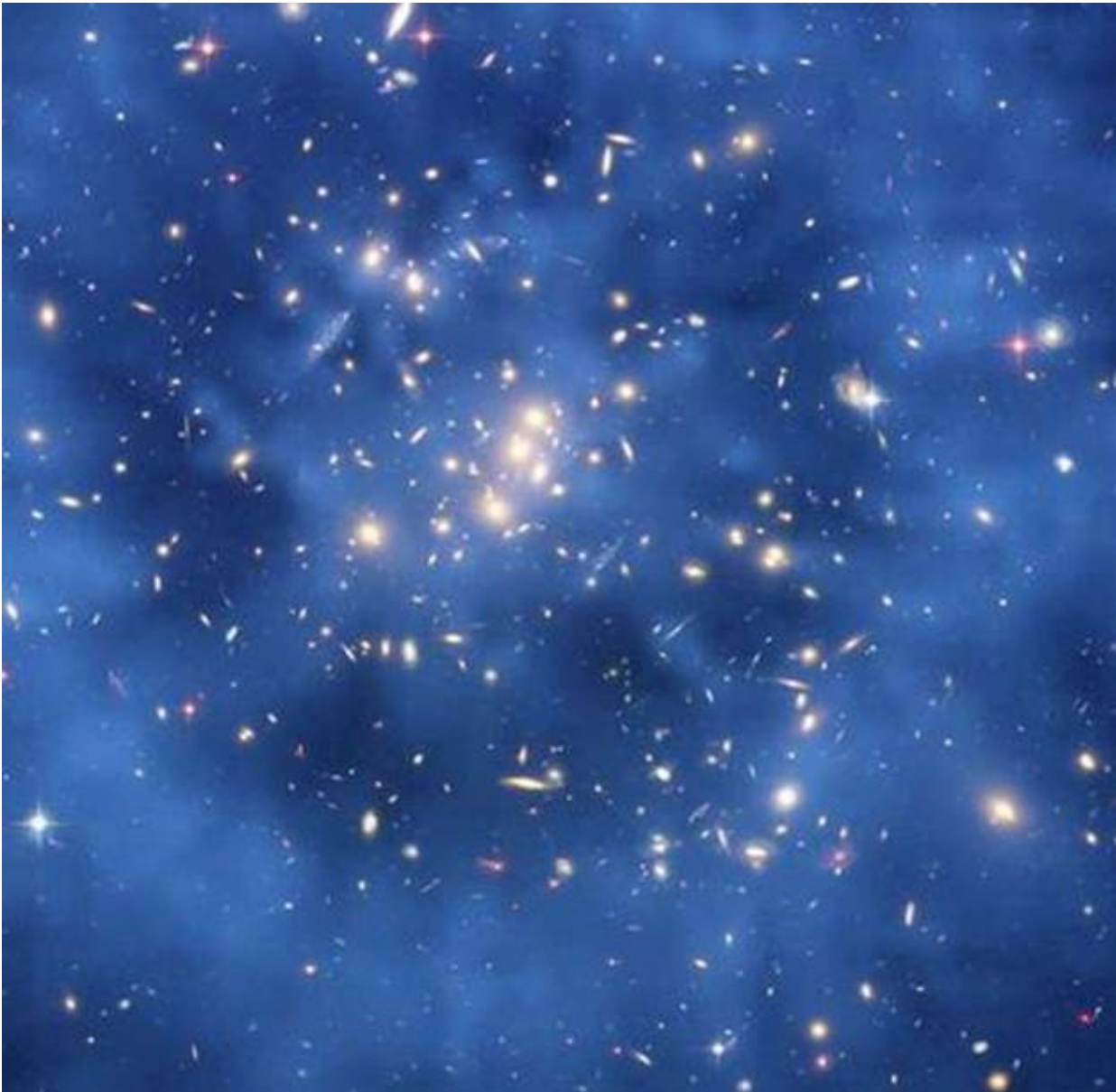
Crédito: Observatório Chandra de raios-X.

A distribuição da matéria escura foi obtida a partir do efeito de lentes gravitacionais: a massa do aglomerado funciona como uma lente e curva o espaço de forma que imagens de galáxias distantes ficam distorcidas. A partir destas distorções é que se calcula a distribuição de massa do

aglomerado, concluindo-se que a maior parte da massa dos aglomerados se encontra nas estruturas representadas em azul.

O texto original em inglês desta matéria e da seguinte pode ser encontrado [aqui](#).

Notícia astronômica de 15 de maio de 2007: Hubble encontra anel de matéria escura no aglomerado de galáxias Cl0024+17 (ZWCl0024+1652). A ilustração mostra a distribuição de matéria escura (em azul) derivada a partir do efeito de lente gravitacional produzido pelo aglomerado na imagem de galáxias distantes.



O aglomerado é bem conhecido pelo efeito de lente gravitacional, e está localizado a uma distância de cinco bilhões de anos-luz. O anel tem um diâmetro de 2,6 milhões de anos-luz. O que é novo é o fato de que a distribuição de matéria escura é diferente da distribuição tanto do gás como das galáxias no aglomerado. Pelo fato da distribuição de matéria escura não seguir a das galáxias e do gás, conclui-se que ela se comporta de maneira diferente do que a matéria bariônica.

No início, os astrônomos pensaram que o anel era um “artefato” de análise, ou da redução dos dados. Demorou mais do que um ano para que o autor da descoberta, M. James Jee, e sua equipe da Universidade de John Hopkins, em Baltimore, se convencessem que o anel era real; na verdade, o anel parece ser uma “onda”, como as que formam num lago, quando se atira nele uma pedra.

Trabalhos anteriores sugerem que o aglomerado seja resultado de uma colisão entre dois aglomerados, que teria ocorrido de 1 a 2 bilhões de anos atrás. A colisão teria ocorrido ao longo da nossa linha de visada e devido a esta perspectiva, a distribuição de matéria escura tem a forma de um anel. Simulações por computadores de colisões de aglomerados de galáxias pela equipe do astrônomo, mostram que na colisão, a matéria escura cai para o centro da distribuição de massa combinada dos dois aglomerados e é jogada para fora, de forma análoga a uma colisão elástica: fica um pouco da matéria no centro e outra parte é jogada para fora. À medida que a matéria escura se afasta do centro, começa a diminuir a velocidade e a “empilhar”, formando o anel.

O estudo da estrutura permite a investigação da maneira como a matéria escura responde à gravidade. A colisão entre dois aglomerados de galáxias produziu uma “onda” de matéria escura que é revelada nas imagens das galáxias mais distantes, amplificadas e distorcidas por esta onda de matéria escura. Analogia: observar imagens de pequenos seixos no fundo de um lago, na superfície do qual existem pequenas ondas. As imagens dos seixos ficam distorcidas à medida que as pequenas ondas passam.

Instrumento utilizado: ACS: Advanced Camera for Surveys do Telescópio Espacial Hubble.

1) A Matéria Visível

Estimativas da densidade de matéria visível foram primeiramente feitas a partir de imagens astronômicas na região ótica do espectro, através de filtros. As primeiras observações foram feitas usando placas fotográficas que são mais sensíveis à luz azul, que corresponde ao filtro conhecido como “filtro B”, que deixa passar fótons no intervalo de: $4 \times 10^{-7} \text{m}$ (ou 4000 Angstroms) $< \lambda < 4,9 \times 10^{-7} \text{m}$ (4900 Angstroms). A luminosidade do Sol na banda B é $L_{\text{Sol}} = 4,7 \times 10^{25} \text{W}$.

A densidade de luminosidade atual na banda B medida dentro de centenas de Mpc é:

$$J_{*B} = 1,2 \times 10^8 L_{\text{sol},B} \text{Mpc}^{-3}$$

Para converter em densidade de massa devemos multiplicar a densidade de luminosidade pela relação massa x luminosidade. Por exemplo:

Para estrelas de tipo O:

$$\frac{M}{L_B} = 10^{-3} \frac{M_{sol}}{L_{sol}}$$

Para anãs de tipo M da seqüência principal:

$$\frac{M}{L_B} = 10^3 \frac{M_{sol}}{L_{sol}}$$

Para a mistura típica de estrelas nas galáxias:

$$\left\langle \frac{M}{L_B} \right\rangle \approx 4 \frac{M_{sol}}{L_{sol}} \approx 170.000 \text{kg Watt}^{-1}$$

A densidade de estrelas é:

$$\rho_{*,0} = \left\langle \frac{M}{L_B} \right\rangle j_{*,B} \approx 4 \times 1,2 \times 10^8 M_{sol} \text{Mpc}^{-3} \approx 5 \times 10^8 M_{sol} \text{Mpc}^{-3}$$

Dividindo pela densidade crítica:

$$\Omega_{*,0} = \frac{\rho_{*,0}}{\rho_{c,0}} \approx \frac{5 \times 10^8 M_{sol} \text{Mpc}^{-3}}{1,4 \times 10^{11} M_{sol} \text{Mpc}^{-3}} = 0,004$$

Este número é um limite inferior, pois não inclui estrelas evoluídas pouco luminosas (anãs brancas, estrelas de nêutrons, buracos negros e anãs marrons). Também não inclui o meio interestelar (gás e poeira), que, na Via Láctea, constitui em torno de 10% da massa.

Finalmente, nos Aglomerados de Galáxias massivas, como o Aglomerado de Coma, observa-se emissão em raios-X do meio intergaláctico da qual infere-se que há uma massa de gás quente ($T \sim 1 \times 10^8 \text{K}$) que é, no caso de Coma, 6-7 vezes a massa em estrelas (ver site do Satélite Chandra).

A massa em estrelas no aglomerado de Coma é $M_{*,\text{Coma}} \sim 3 \times 10^{13} M_{sol}$ e $M_{\text{gás},\text{Coma}} \sim 2 \times 10^{14} M_{sol}$.

Vamos ver no Capítulo 10 que a determinação mais precisa da quantidade de massa bariônica no Universo vem das predições da nucleossíntese primordial.

2) Matéria Escura nas Galáxias e Aglomerados

A partir do movimento das estrelas em órbita numa galáxia como a Via Láctea podemos obter a aceleração centrípeta:

$$a = \frac{v^2}{R}$$

Se ela for devida à atração gravitacional da galáxia (massa interna a um raio R):

$$a = \frac{GM(R)}{R^2}$$

então:

$$\frac{v^2}{R} = \frac{GM(R)}{R^2}$$

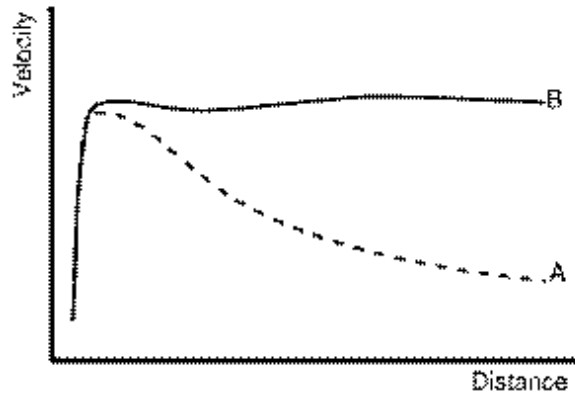
$$v = \sqrt{\frac{GM(R)}{R}}$$

Subtraindo a velocidade da galáxia, v_{gal} e corrigindo pela inclinação “i” do disco em relação ao plano do céu, conforme figura 8.3 do livro de Barbara Ryden:

$$v(R) = \frac{v_r(R) - v_{gal}}{\sin(i)} = \frac{v_r(R) - v_{gal}}{\sqrt{1 - b^2/a^2}}$$

Onde “b” é o semi-eixo menor e “a” o semi-eixo maior do disco da galáxia.

A partir da expressão acima, esperar-se-ia que a velocidade de rotação caísse com o inverso da raiz quadrada do radio, como representado na figura abaixo pela linha tracejada (A), mas a observação indica que a velocidade não cai com a distância (B).



A: Curva de rotação esperada para uma galáxia espiral; B: curva observada.
(Wikipedia)

$$M(R) = \frac{v^2 R}{G} = 9,6 \times 10^{10} M_{\text{sol}} \left(\frac{v}{220 \text{ km s}^{-1}} \right)^2 \left(\frac{R}{8,5 \text{ kpc}} \right)$$

Obtém-se que $R_{\text{halo}} > 20 \text{ kpc}$, pois v não cai até pelo menos 20kpc. O parâmetro de densidade para as galáxias, incluindo o halo de matéria escura, à semelhança de nossa galáxia é da ordem de 10 a 40 vezes o parâmetro de densidade relativo às estrelas. Desta forma, conclui-se que:

$$\Omega_{\text{gal},0} = (10 \rightarrow 40) \Omega_{*,0} = (10 \rightarrow 40) 0,004 \approx 0,04 \rightarrow 0,16$$

3) Massa dos Aglomerados de Galáxias

O Teorema do Virial dá a relação entre a energia potencial W e a cinética K num sistema em equilíbrio dinâmico::

$$K = -\frac{1}{2}W$$

Poderemos escrever então para um aglomerado de galáxias que se encontra em equilíbrio

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

onde: M = massa total do aglomerado;

α = fator adimensional que depende de sua densidade. Para boa parte dos aglomerados, $\alpha \approx 0,4$.

r_h = é o *raio de meia massa*, correspondendo ao raio que engloba a metade da massa do aglomerado $M/2$.

V é a velocidade quadrática média das galáxias no aglomerado:

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

sendo σ_r , a dispersão de velocidades das galáxias.

Assumindo que a dispersão de velocidades é isotrópica.

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

Para se obter r_h , em geral se assume que a razão M / L é constante com o raio e se usa então o raio que engloba metade da luminosidade do aglomerado.

4) Lentes Gravitacionais

Se um fóton passa próximo a um objeto massivo com um parâmetro de impacto r (ver www.if.ufrgs.br/~thaisa/bn/distorcao.htm), a curvatura do espaço vai causar a deflexão do fóton de um ângulo:

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

Sendo M a massa do objeto.. Esta deflexão produz o efeito conhecido como lente gravitacional

Exercício: Mostrar que, para a luz de uma estrela passando na borda do Sol (r = raio do Sol), $\alpha = 1,7''$, como foi detectado em 1919, numa expedição a Sobral, no Ceará, durante um eclipse Solar, de uma equipe que veio ao Brasil especificamente para testar a Teoria da Relatividade Geral de Einstein.

Se tivermos um objeto compacto de massa M , a meio caminho entre nós e a Grande Nuvem de Magalhães, por exemplo, e este objeto passa bem na direção de uma estrela da Nuvem, este objeto vai causar uma deflexão na luz da estrela, produzindo uma imagem distorcida e ampliada da

mesma. Se a direção do objeto compacto é exatamente a da estrela, a imagem produzida é o chamado “Anel de Einstein”, com raio angular:

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

onde: M = massa do objeto compacto

d = distância até a estrela

$x d$ = distância até o objeto compacto ($0 < x < 1$)

Para $x = 0,5$ (objeto compacto situado na metade do caminho entre observador e agente gerador da imagem)

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

Onde o valor está dado em segundos de arco. Se o objeto compacto não está bem alinhado com a estrela, vão aparecer arcos ao invés de um anel completo.

Projeto MaCHO (Massive Compact Halo Object): monitoramento de milhões de estrelas da Grande Nuvem de Magalhães para detectar objetos compactos escuros no Halo da Via Láctea. Não é possível observar o anel de Einstein para objetos compactos do halo, porque o raio angular é muito pequeno, mas dá para detectar variação na luz das estrelas pelo efeito de amplificação produzido pela lente.

Podemos estimar a escala de tempo da variação, através do cálculo do tempo para o objeto compacto percorrer uma distância angular igual a θ_E . Caso o objeto esteja no meio do caminho entre nós e a Grande Nuvem poderemos escrever:

$$\Delta t = \frac{d \theta_E}{2 v} \approx 90 \left(\frac{M}{M_{\text{sol}}} \right)^{1/2} \left(\frac{v}{200 \text{kms}^{-1}} \right)^{-1} \text{dias}$$

Exercício: Demonstrar a expressão acima.

Esta expressão represente o tempo que dura a amplificação da luz (em dias); v é a velocidade relativa transversal à linha de visada entre o objeto compacto e a estrela. Δt será tanto maior quanto mais massivos for o objeto.

Conclusão do projeto MACHO:

Há menos eventos de curta duração do que o esperado: não há muitos objetos com massa menor que 8% da massa solar (anãs marrons) no halo escuro da nossa Galáxia. Concluiu-se que, da massa do Halo necessária para explicar a rotação das estrelas do disco a grandes distâncias do centro da Via Láctea, somente 20% tem origem em objetos compactos com massa típica superior a 15% da massa solar ($\Delta t > 35$ dias). A massa predominante do Halo deve ser na forma de uma componente distribuída uniformemente.

Lentes produzidas por Aglomerados de Galáxias:

Consideremos o exemplo de um aglomerado de massa típica de $M \sim 10^{14} M_{\text{SOL}}$, a uma distância de 500 Mpc, que amplifica e distorce a imagem de uma galáxia a 1000 Mpc de distância:

$$\theta_E \approx 0,5 \left(\frac{M}{10^{14} M_{\text{sol}}} \right)^{1/2} \left(\frac{d}{1000 \text{ Mpc}} \right)^{-1/2} \text{ min}$$

Onde o raio angular é dado em minutos de arco. Neste caso, podemos observar claramente a lente. Exemplo: Aglomerado Abell 2218, $z = 0,18$ ($d_p(t_0) = 770$ Mpc). Obtém-se que a massa calculada desta forma para o Aglomerado é semelhante à encontrada utilizando o Teorema do Virial ($\Omega_{m,0} \geq 0,2$).

5) Natureza da Matéria Escura

A natureza da matéria escura ainda não é conhecida. Hipóteses consideradas são:

- 1) Áxions: partícula com $E = mc^2 \sim 10^{-5} \text{ eV} \sim 2 \times 10^{-41} \text{ kg}$; mas ainda não foram detectados;
- 2) Buracos Negros primordiais: $m \sim 10^5 M_{\text{SOL}}$.
- 3) A única partícula não-bariônica que conhecemos que parece ter alguma massa é o neutrino. Em analogia à radiação de fundo do Universo, conclui-se que deve existir hoje um fundo de neutrinos, como um "fóssil" de um tempo em que o Universo era opaco aos neutrinos.

A densidade em número para cada tipo de neutrino é calculada como (3/11) da densidade de fótons n_γ .

$$n_\nu = 3 \left(\frac{3}{11} \right) n_\gamma = \left(\frac{9}{11} \right) (4,11 \times 10^8 \text{ m}^{-3}) = 3,36 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$$

Exercício: Estime quantos neutrinos e fótons da radiação de fundo estão atravessando seu corpo a todo instante.

Para que os neutrinos dessem conta de toda a matéria não-bariônica no Universo, sua massa deveria ser:

$$m_\nu c^2 = \frac{\Omega_{\text{DM}} \epsilon_{c0}}{n_\nu} \approx \frac{0,26 (5200 \text{MeV m}^{-3})}{3,36 \times 10^8 \text{m}^{-3}} \approx 4 \text{eV}$$

Observações de neutrinos do Sol só permitem concluir que os neutrinos oscilam entre um tipo e outro e obter a diferença entre as massas. Podem-se obter somente limites inferiores para as massas: 0,05 eV; 0,007 eV e muito menor do que 0.007 eV, o que daria somente $\Omega_\nu \sim 10^{-3}$. Para que eles pudessem representar a matéria escura, suas massas deveriam ser: 4,0 eV, 4,0004 eV e 4,000006 eV. Ainda não foi possível medir suas massas.

Modelos de supersimetria: produzem existência de partículas não-bariônicas como fotinos, gravitinos, axinos, sneutrinos, gluinos, etc. O fato de ainda não terem sido observados em aceleradores significa que sua energia $mc^2 > 10 \text{ GeV}$! Deu-se o nome a WIMPs a estas partículas, significando: Weak Interactive Massive Particles.