

# Matéria Escura

Introdução à Cosmologia

2012/02

# Introdução

---

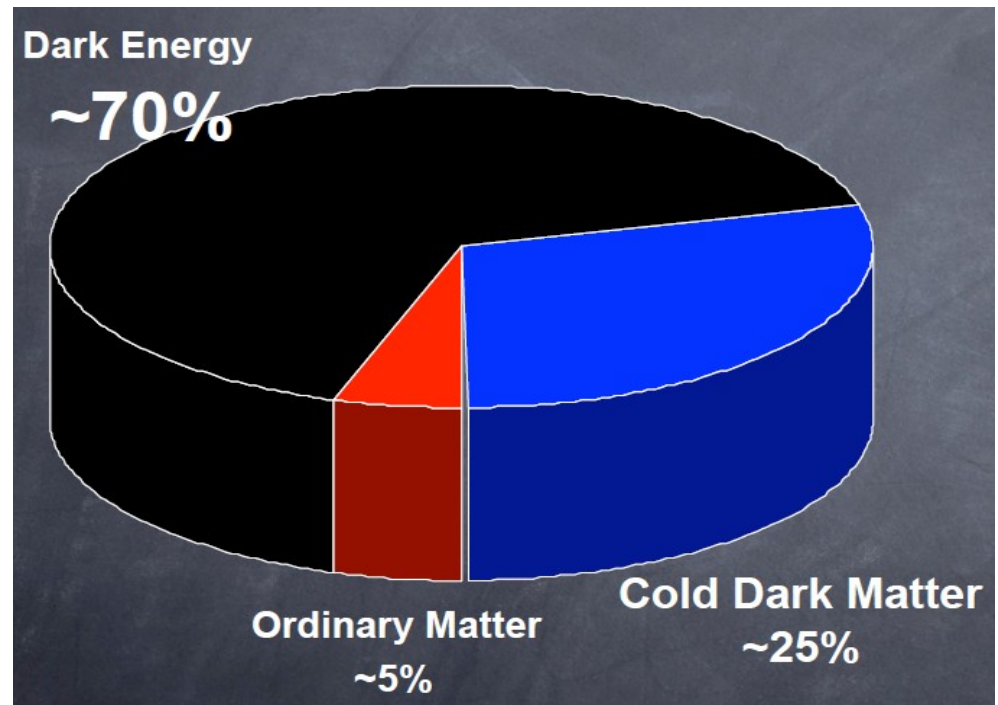
Determinação do parâmetro de densidade da matéria não relativística.

*Estudo da história e evolução do Universo.*

*Conhecimento da composição do Universo.*

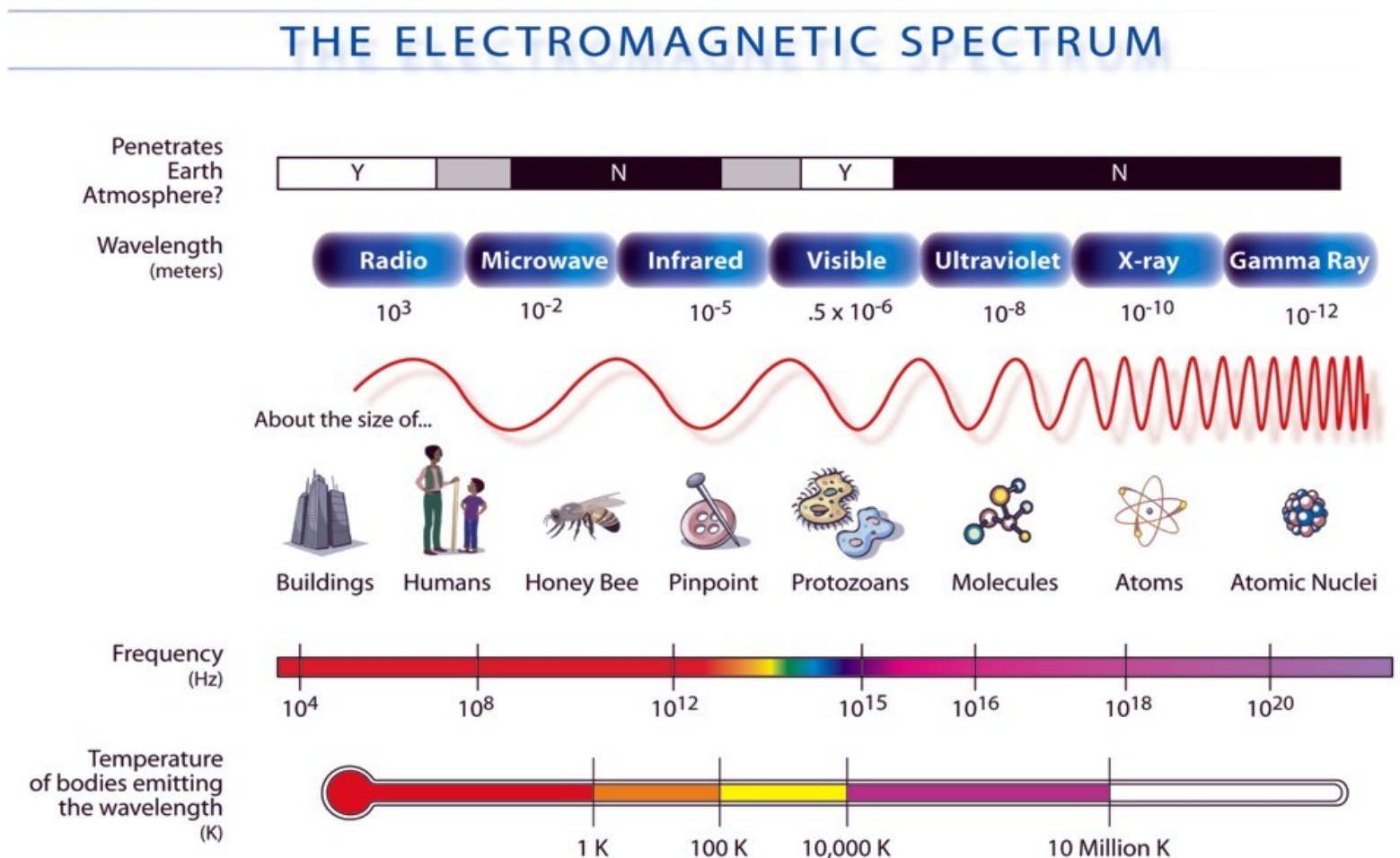
Modelo padrão:  
70% energia escura  
30% matéria

Matéria:  
5% matéria comum  
(bariônica)  
25% matéria escura não  
bariônica



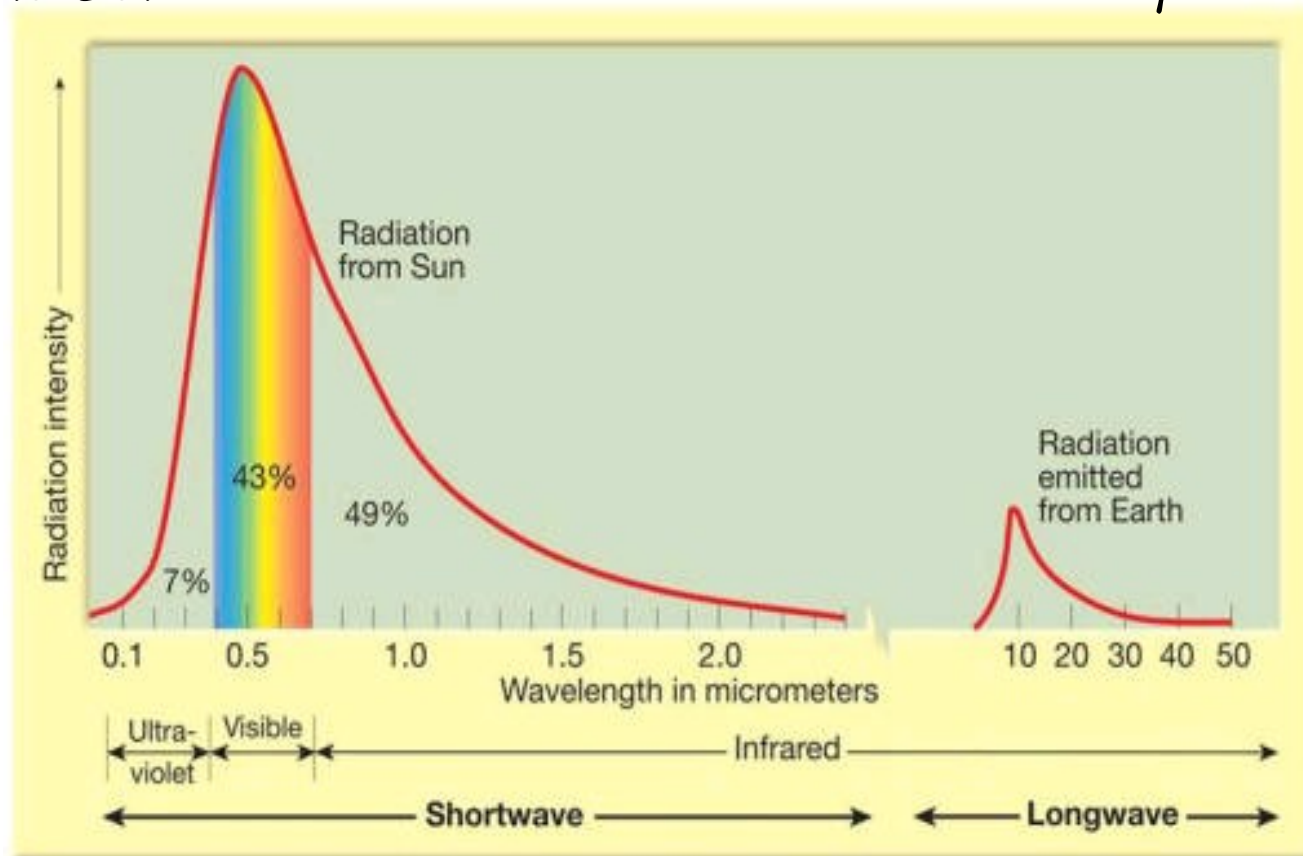
# Estimativa da quantidade de matéria luminosa

Matéria luminosa = matéria que emite radiação eletromagnética.



Radiação emitida pelo Sol

Radiação solar re emitida pela Terra



Copyright © 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Radiação térmica do próprio planeta é muito fraca.

Podemos medir o fluxo de radiação eletromagnética das estrelas ao nosso redor e estimar a sua densidade de luminosidade:

$$j_{\star,0} = 1.2 \times 10^8 L_{\odot,B} \text{ Mpc}^{-3}$$

Mas como estimar a sua densidade de massa?

Temos que conhecer a chamada razão massa-luminosidade  $\langle M/L \rangle$  para essas estrelas.

Exemplo:

Por seus efeitos gravitacionais no sistema solar, sabemos que o Sol possui:

$$M_{\odot} = 2,0 \times 10^{30} \text{ kg}$$

Sua luminosidade na banda B de frequência é:  $L_{\odot} = 4,7 \times 10^{25} \text{ W}$

Então, o Sol possui:

$$\langle M_{\odot}/L_{\odot,B} \rangle = \frac{2,0 \times 10^{30} \text{ kg}}{4,7 \times 10^{25} \text{ W}} = 4,2 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{W}}$$

Se todas as estrelas ao nosso redor tivessem razão massa-luminosidade igual à do Sol, poderíamos obter a densidade de massa das estrelas:

$$\begin{aligned}\rho_{\star,0} &= j_{\star,0} \langle M_{\odot}/L_{\odot,B} \rangle = 1.2 \times 10^8 L_{\odot,B} \text{ Mpc}^{-3} \langle M_{\odot}/L_{\odot,B} \rangle = \\ &= 1,2 \times 10^8 M_{\odot} \text{ Mpc}^{-3}\end{aligned}$$

No entanto, a razão massa-luminosidade de estrelas pode variar em 6 ordens de magnitude. Estimamos que, para a vizinhança do sistema solar, temos

$$\langle M/L_B \rangle \approx 4M_{\odot}/L_{\odot,B}$$

Admitindo que as estrelas vizinhas são uma amostra normal das estrelas no resto da galáxia e nas galáxias próximas, temos

$$\rho_{\star,0} = j_{\star,0} \langle M/L_B \rangle = 1.2 \times 10^8 L_{\odot,B} 4M_{\odot}/L_{\odot,B} \approx 5 \times 10^8 M_{\odot} \text{ Mpc}^{-3}$$

O valor atual para o parâmetro de densidade das estrelas é então:

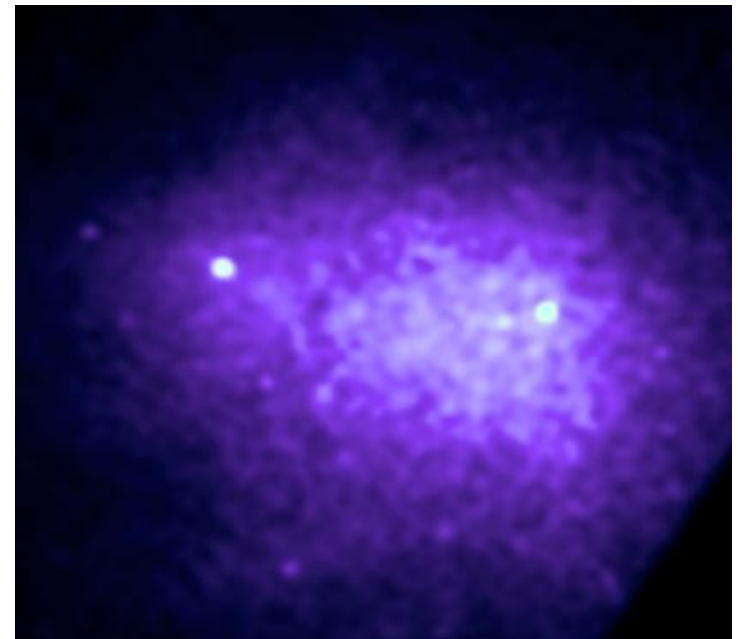
$$\Omega_{*,0} \equiv \frac{\rho_{*,0}}{\rho_{c,0}} \approx \frac{5 \times 10^8 M_{\odot} \text{Mpc}^{-3}}{1,4 \times 10^{11} M_{\odot} \text{Mpc}^{-3}} \approx 0,004 \ll 0,3$$

Meio interestelar e intergaláctico possuem gás, que também contribui para a densidade de massa do Universo.

Aglomerado de Coma (visível)



Aglomerado de Coma (raios X)



Estima-se que 10% da matéria bariônica na nossa galáxia e em Andrômeda esteja em forma de gás interestelar.

Estima-se que no aglomerado de Coma temos:

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

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

Então, a maior parte da matéria bariônica se encontra na forma de gás intergaláctico.

Massa das estrelas e gás somadas não é suficientemente alta para atingir o parâmetro de densidade do modelo padrão.

O melhor limite superior para a densidade de massa bariônica no Universo vêm das previsão do processo de nucleossíntese primordial.

Durante esse processo, prótons, neutrons e elétrons se combinam para formar átomos dos elementos mais leves, como hidrogênio e hélio. Átomos mais pesados só se formaram depois, no processo de fusão no interior de estrelas.

As previsões da nucleossíntese primordial indicam que:

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

A ser comparado com:

$$\Omega_{*,0} \approx 0.004$$

## Matéria Escura

---

Se o parâmetro de densidade da matéria bariônica é  $\sim 0.04$ , por que o modelo padrão adota o valor 0.3?

Em 1930, Fritz Zwicky verificou que a massa visível do aglomerado de Coma não era suficiente para manter o aglomerado gravitacionalmente ligado.

Parecia que havia muito mais matéria no aglomerado do que se podia ver e ele então cunhou o termo “matéria escura”.

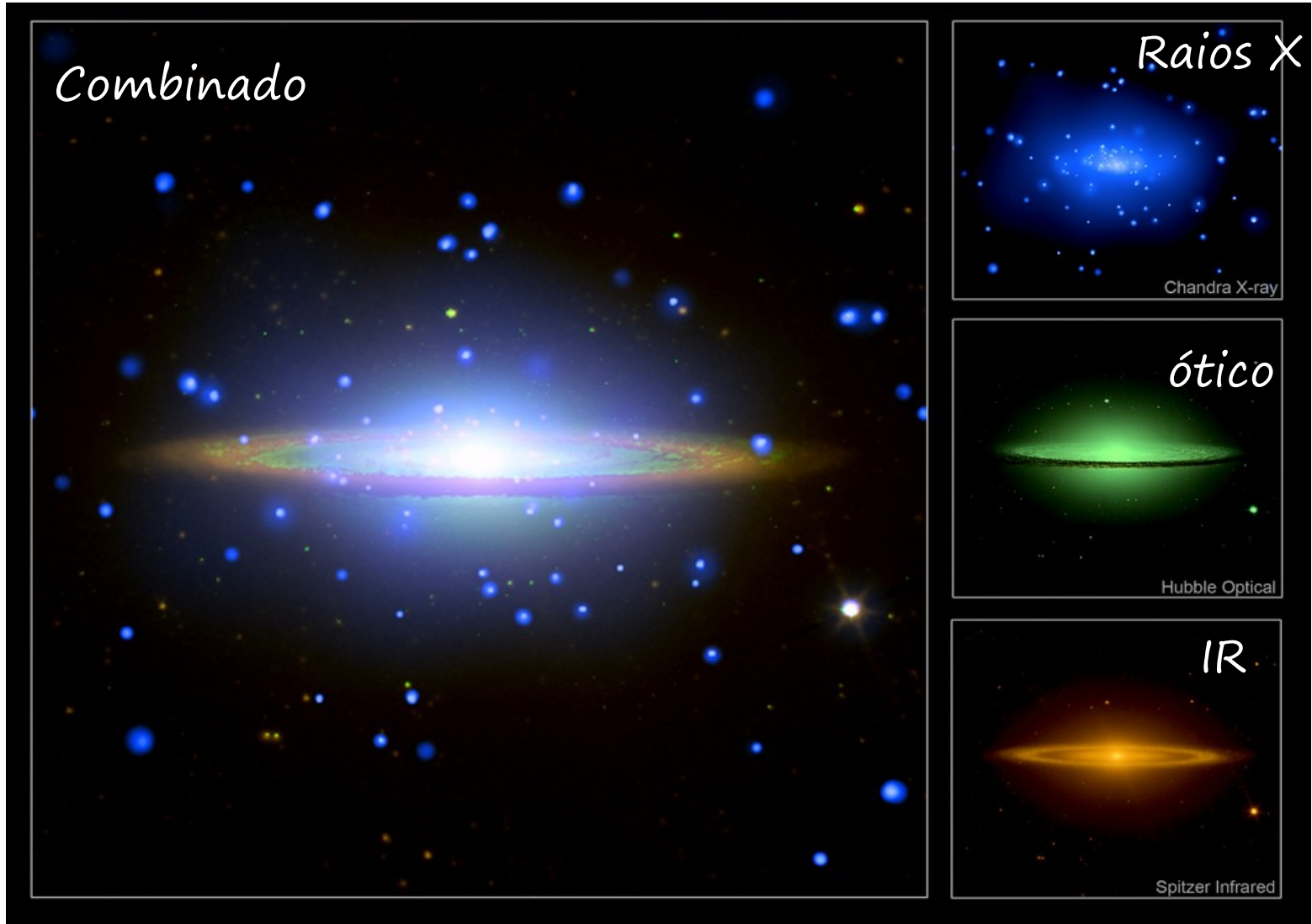
Posteriormente, verificou-se que um problema similar surgia da observação galáxias espirais.

# Curva de rotação de galáxias espirais

---

Curva de rotação: gráfico da velocidade das estrelas ou do gás em uma galáxia em função da distância ao centro da galáxia.





*Maior parte da matéria luminosa se concentra na parte central.*

Se a estrela se encontra em órbita circular em torno do centro da galáxia, a uma distância  $R$ , ela sentirá uma aceleração:

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

Se essa aceleração é devida à atração gravitacional:

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

$M(R)$  é a massa da galáxia dentro do raio  $R$ .

Igualando as duas equações:

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

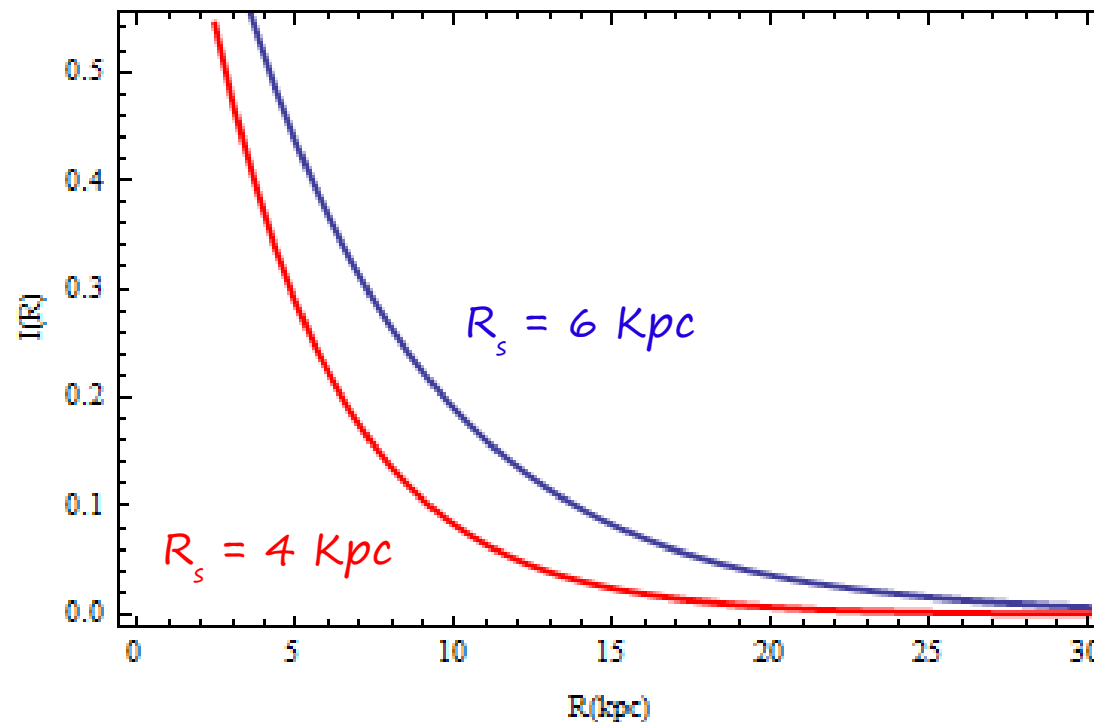


$$v = \sqrt{\frac{GM(R)}{R}}$$

O fluxo por unidade de área que sai de uma galáxia espiral (brilho superficial) cai com

$$I(R) = I(0) \exp\left(-\frac{R}{R_s}\right)$$

com  $4 < R_s < 6$  Kpc para espirais típicas.

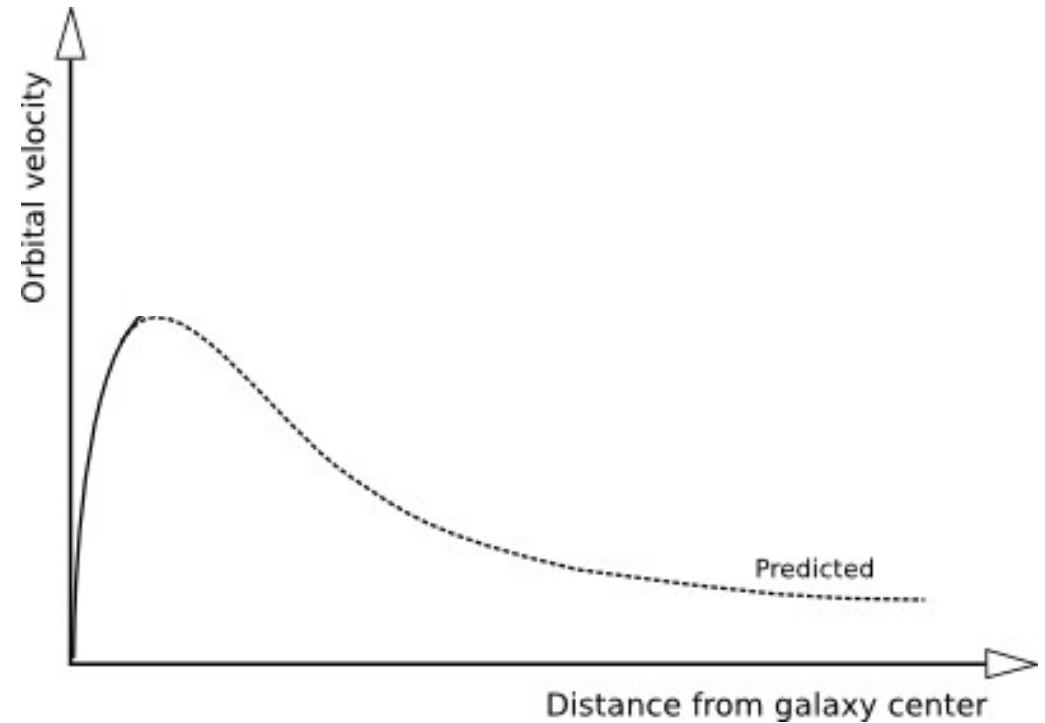


Então, a massa  $M(R)$  contida em órbitas maiores que  $\sim 3R_s$ , é essencialmente constante:  $M(R)=M$ .

A velocidade de estrelas em órbitas grandes o suficiente será então

$$v = \sqrt{\frac{GM(R)}{R}} \longrightarrow v \propto \frac{1}{\sqrt{R}}$$

E a curva de rotação de uma galáxia espiral deve ter a forma:



# Como obter a curva de rotação

---

“Face-on”

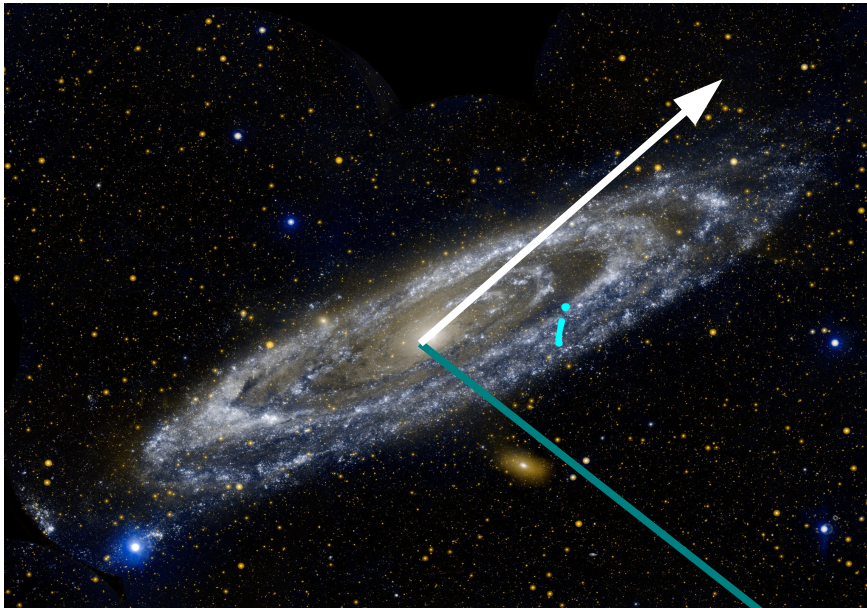


“Edge-on”



## *Inclinação intermediária*

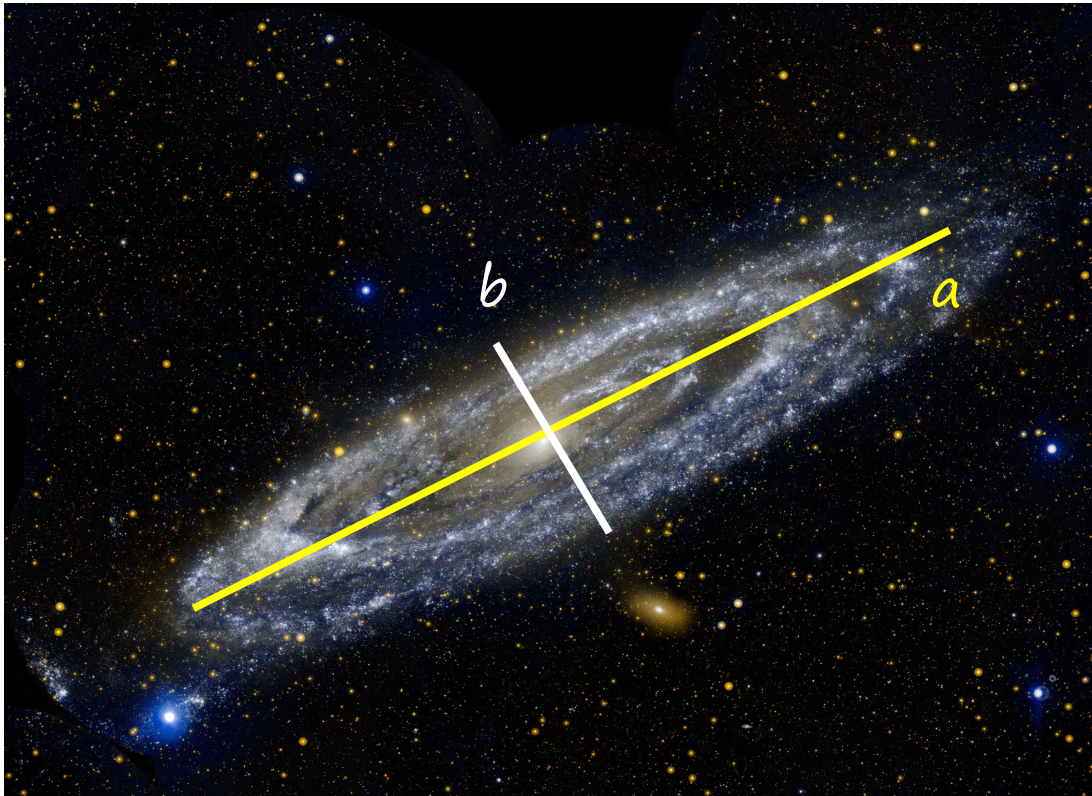




Ângulo de inclinação:  
ângulo entre a linha de  
visada e a perpendicular  
ao disco da galáxia.



Elipse com eixos  $a$  e  $b$ :



Ângulo de inclinação:

$$\cos(i) = \frac{b}{a}$$

Face-on:  $a=b \rightarrow \cos(i)=1, i=0^\circ$

Edge-on:  $b=0 \rightarrow \cos(i)=0, i=90^\circ$

Se medirmos o desvio para o vermelho de estrelas em uma galáxia inclinada, teremos uma estimativa somente da sua velocidade projetada ao longo da linha de visada:

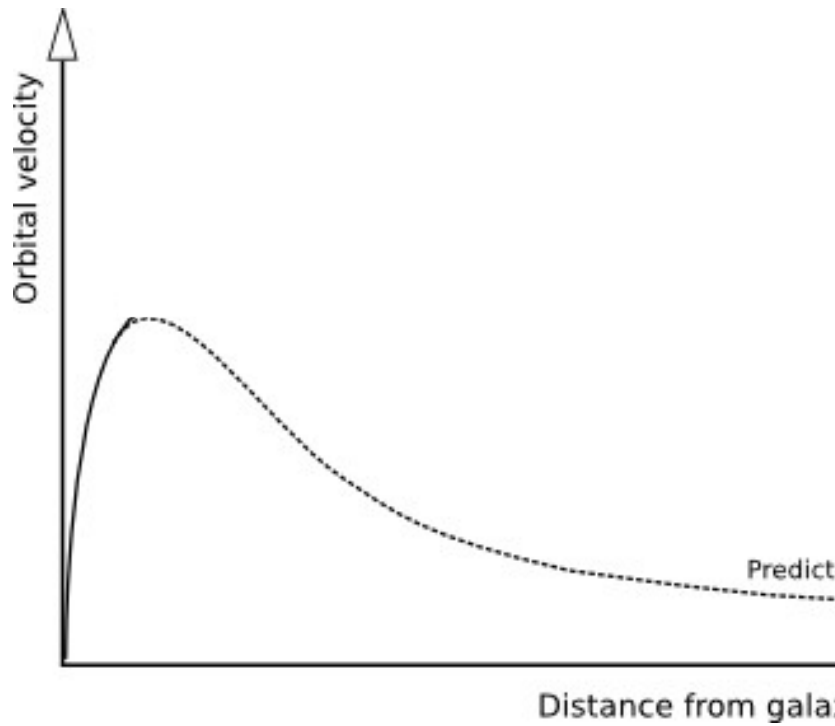
$$v_{medida}(R) = v_{gal} + v(R) \text{sen}(i)$$

$v_{gal}$  = velocidade da galáxia devido à expansão do Universo

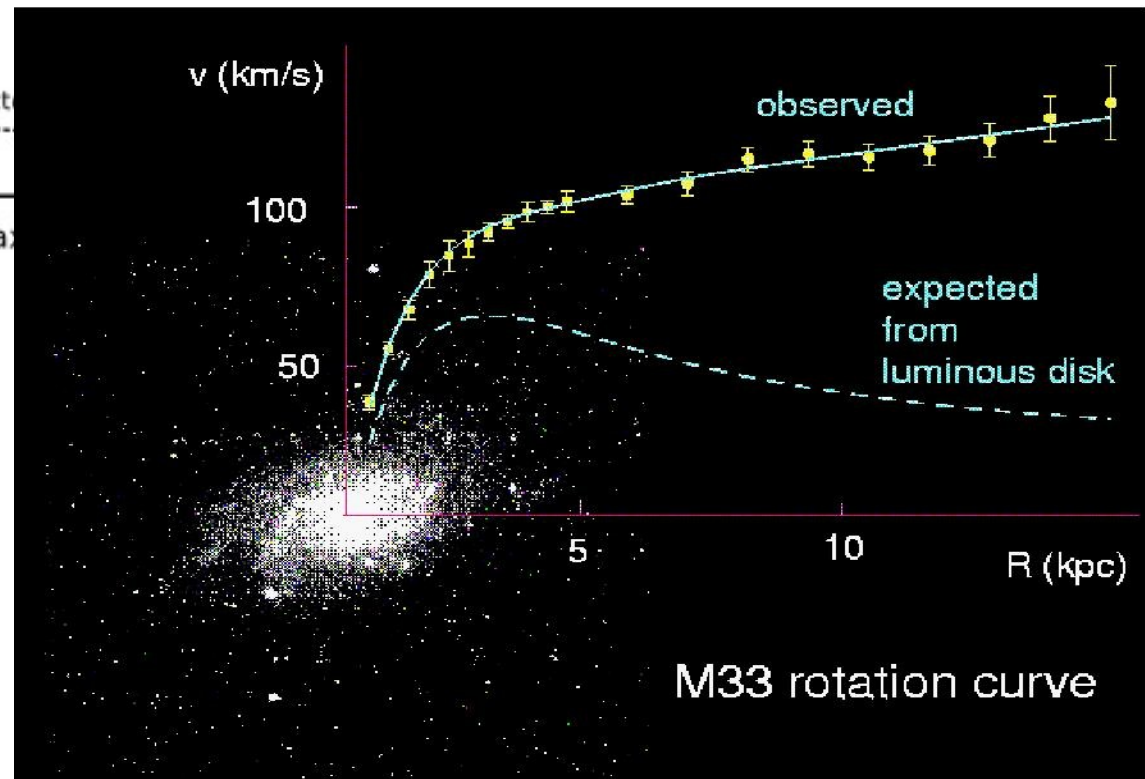
$v(R)$  = velocidade orbital real

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

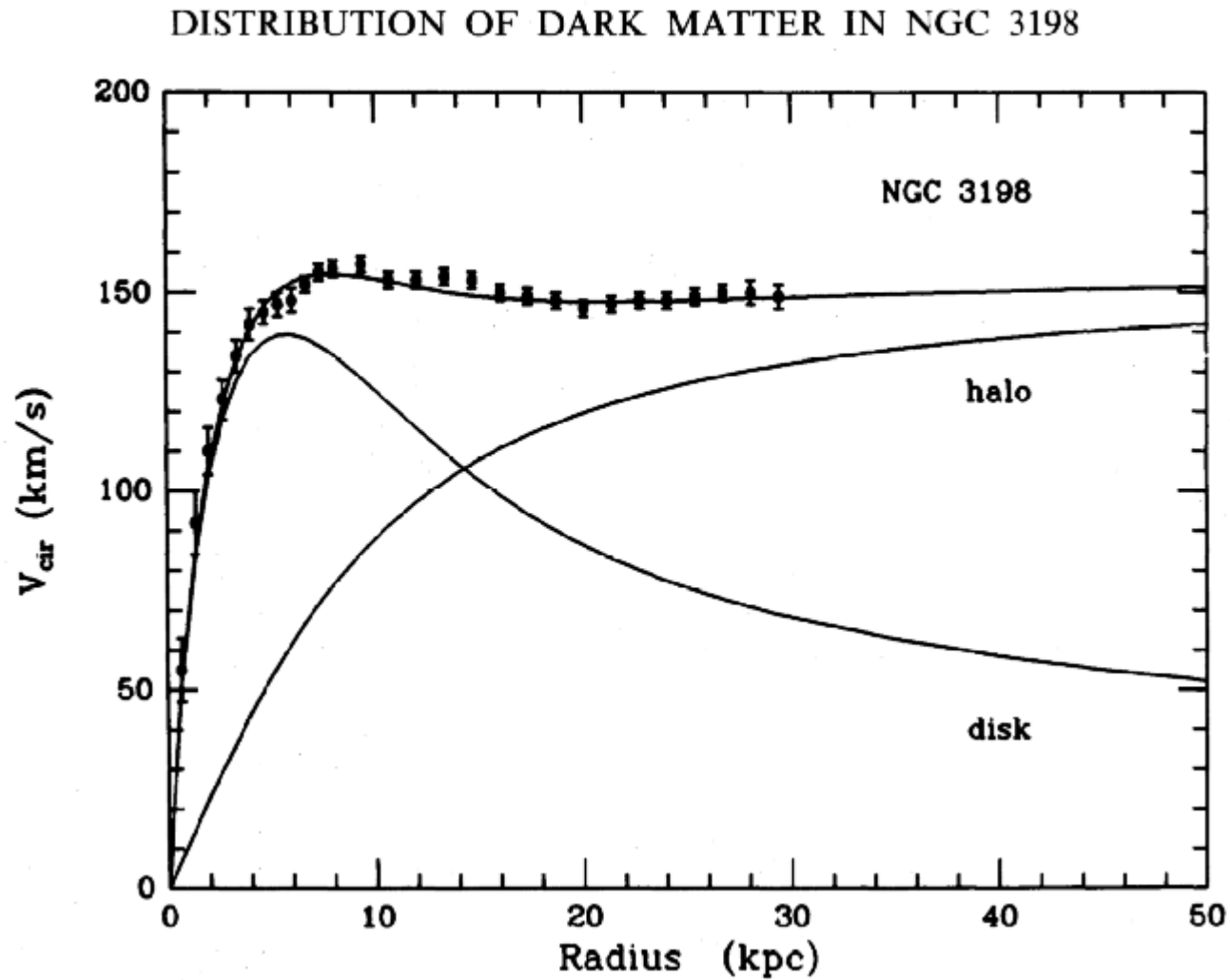
# Resultados das observações



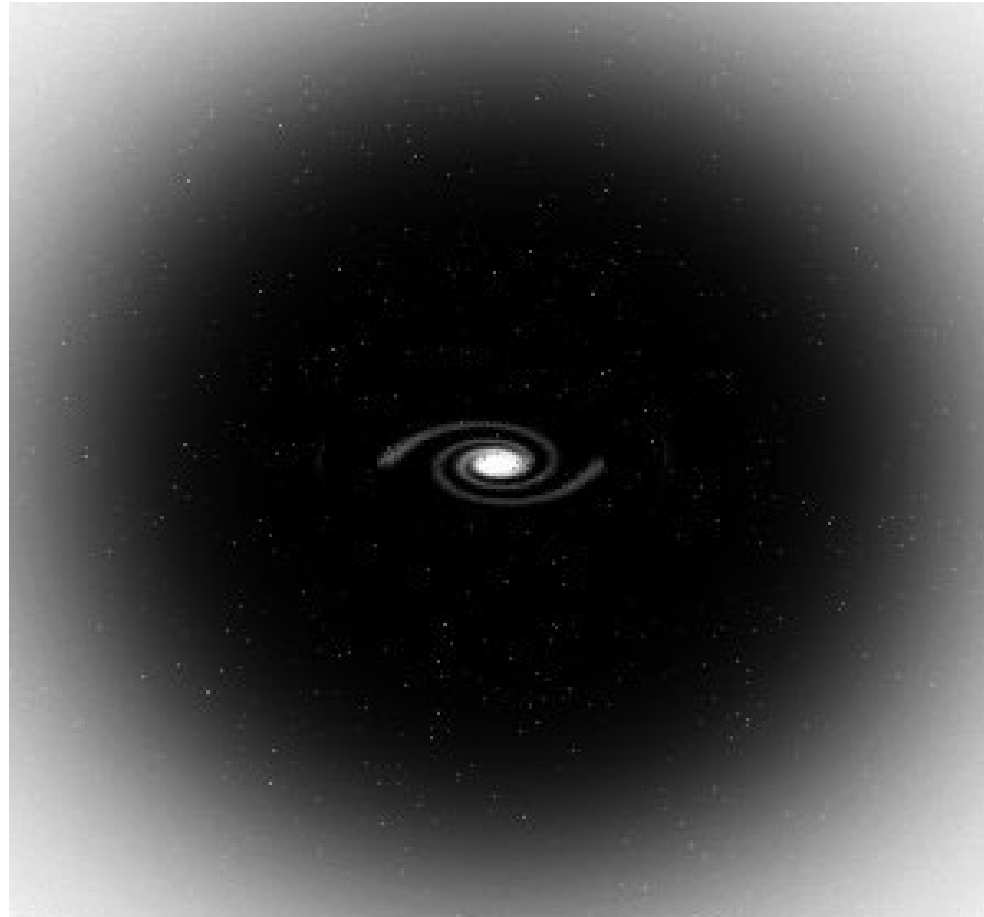
Não há sinal da descida esperada.



Portanto, parece haver algum tipo de matéria escura nas galáxias, distribuída de tal forma que:



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



Acredita-se que o halo da nossa galáxia seja entre 10 e 40 vezes mais massivo do que a sua parte luminosa, então:

$$\Omega_{gal,0} = (10 \rightarrow 40)\Omega_{*,0} \approx 0.04 \rightarrow 0.16$$

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

É provável que o parâmetro de densidade de matéria na nossa galáxia seja maior do que a previsão da nucleossíntese.

*Matéria não bariônica!*