

Fundamentos de Cosmologia

Aula 7

AST-413-4 - INPE - 2020-3

Prof. Dr. Carlos Alexandre Wuensche

Prof. Dra. Christine Córdula Dantas

7. A Matéria Escura

- ❧ 7.0 Introdução
- ❧ 7.1 A Matéria Visível
- ❧ 7.2 A Matéria Escura em Galáxias
- ❧ 7.3 A Matéria Escura em Aglomerados de Galáxias
- ❧ 7.4 Lentes Gravitacionais
- ❧ 7.5 A Natureza da Matéria Escura

7.0 Introdução

Conteúdo de matéria no Universo

Conteúdo de matéria no Universo

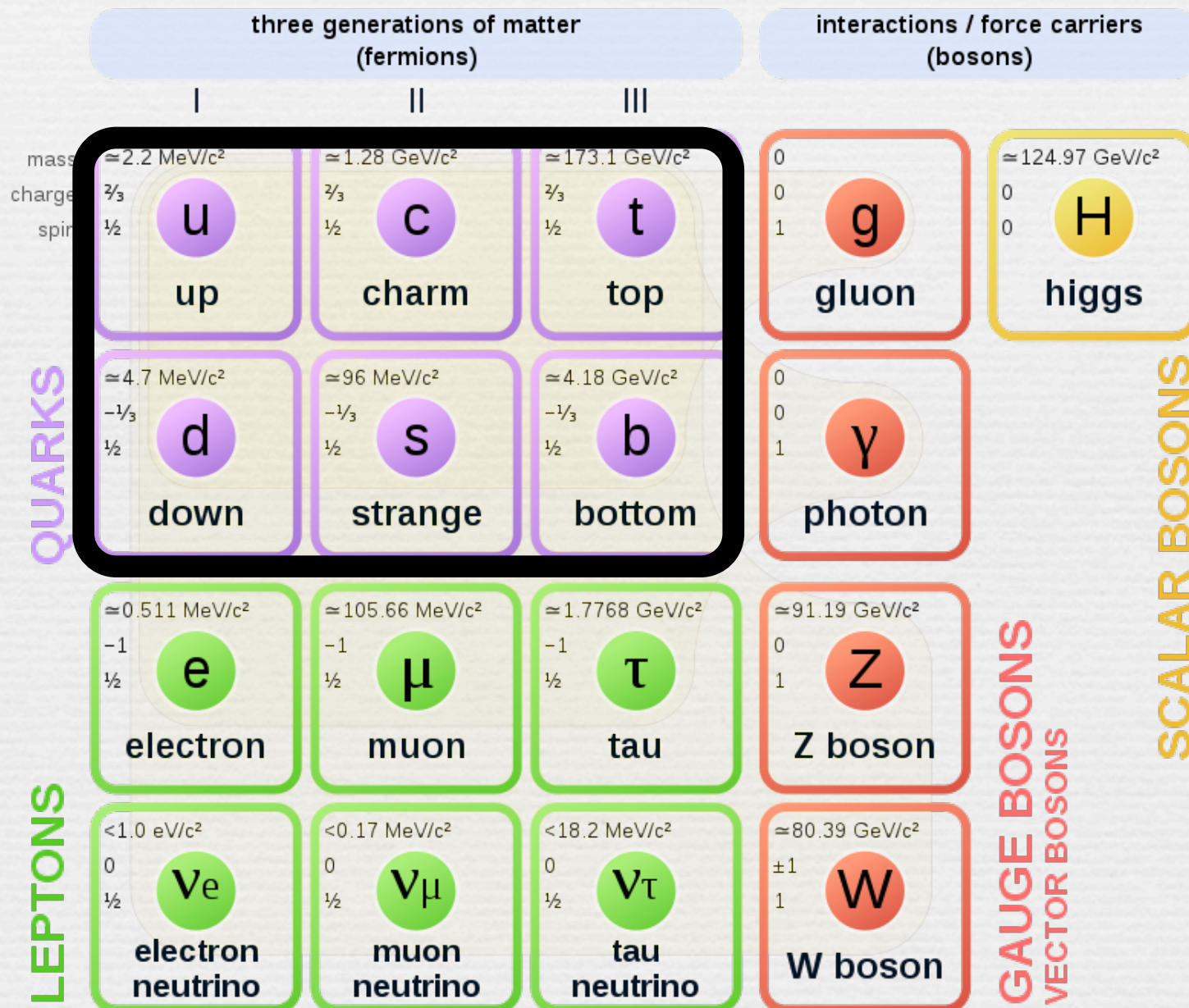
Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)				interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
LEPTONS	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

o que conhecemos no lab

Conteúdo de matéria no Universo

Standard Model of Elementary Particles

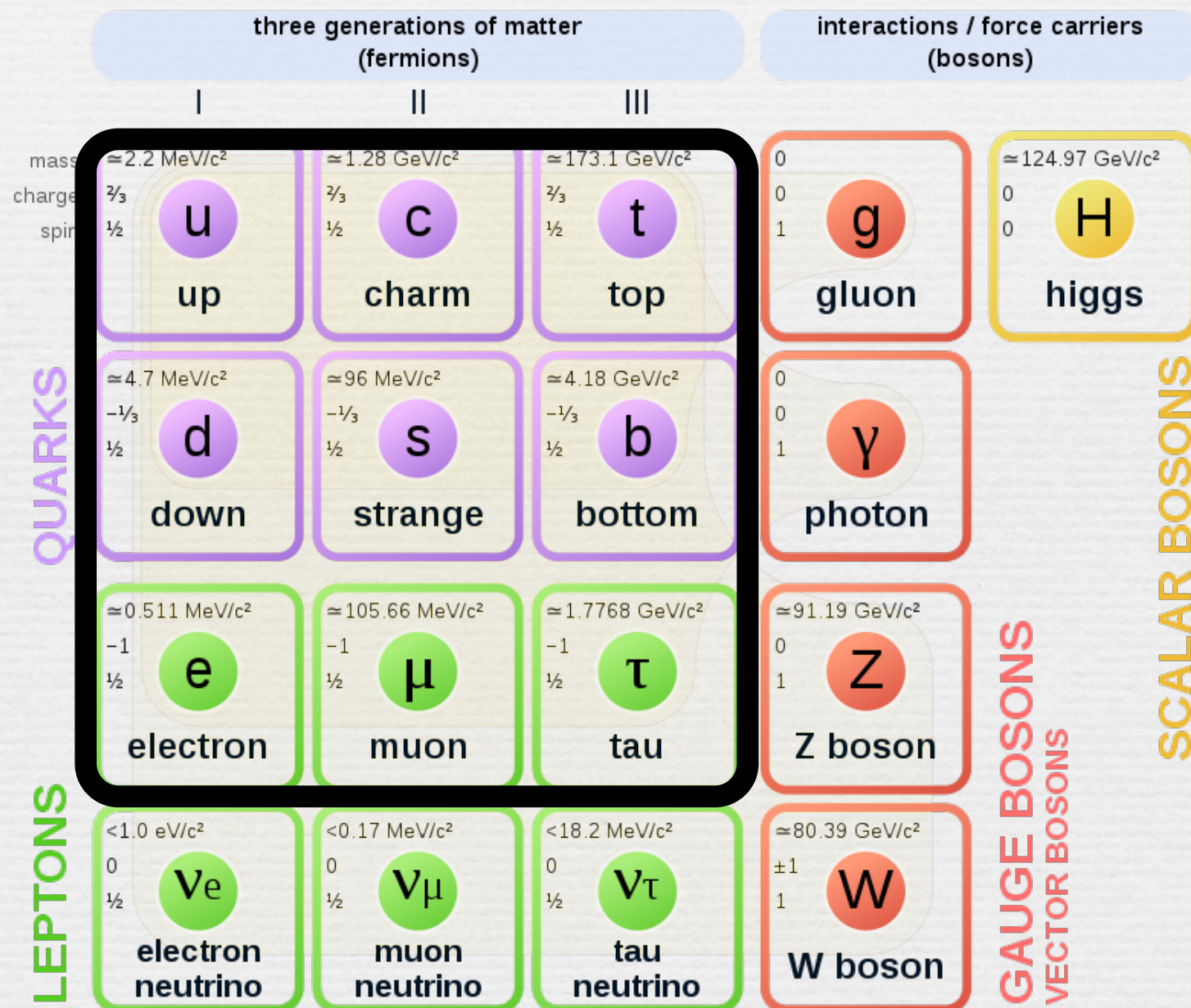


bariônica

Bárions:
prótons e nêutrons

Conteúdo de matéria no Universo

Standard Model of Elementary Particles

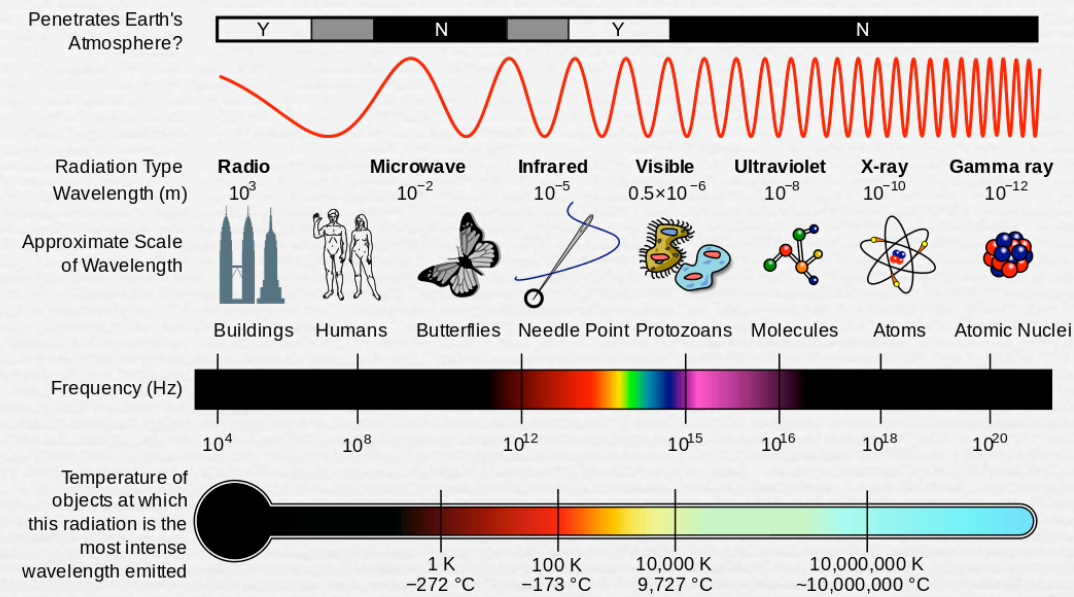


Bárions:

Para *cosmólogos*: matéria atômica normal, o que inclui os elétrons... mas estes contribuem apenas em ~ 0.0005 da massa atômica, então são praticamente desprezíveis.

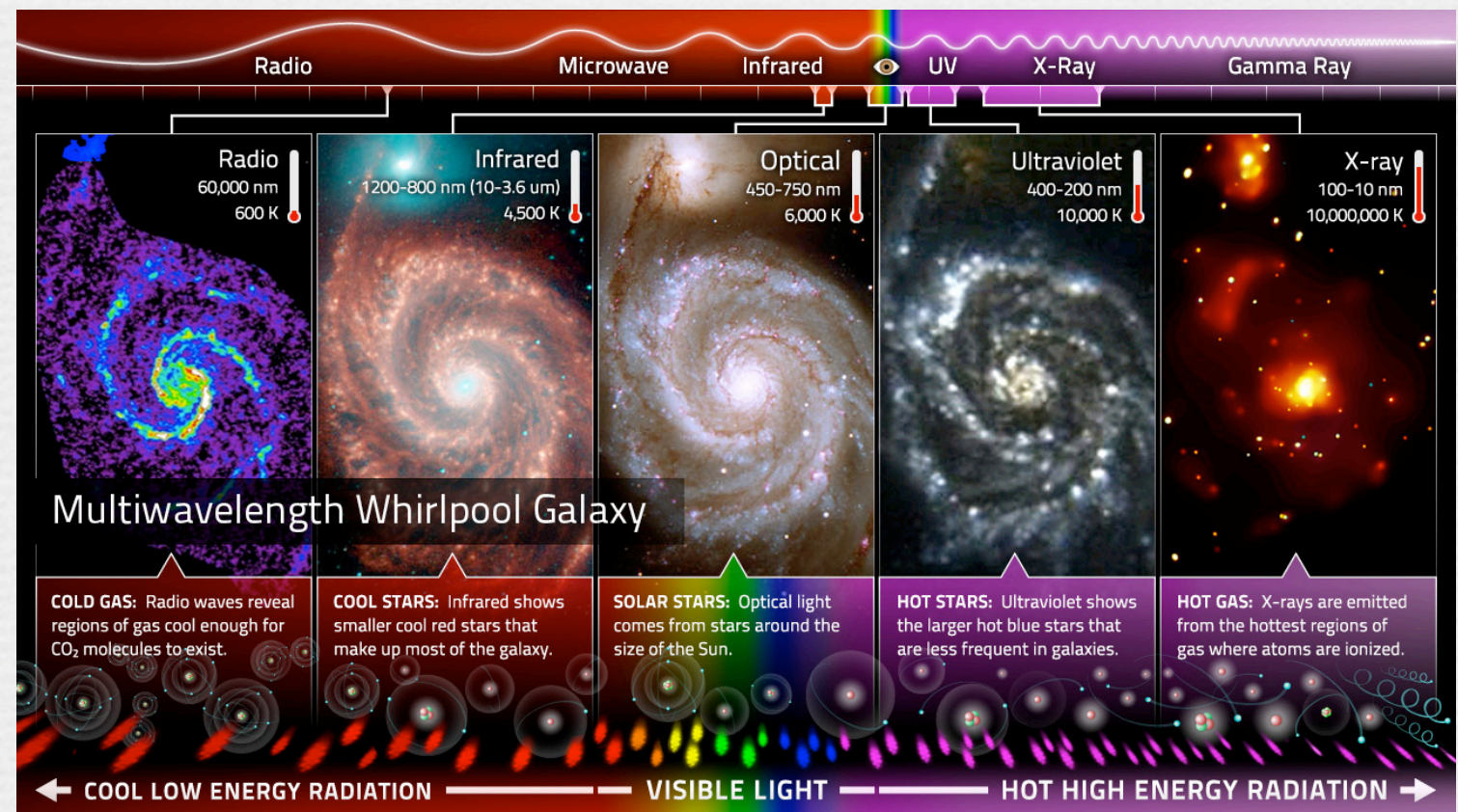
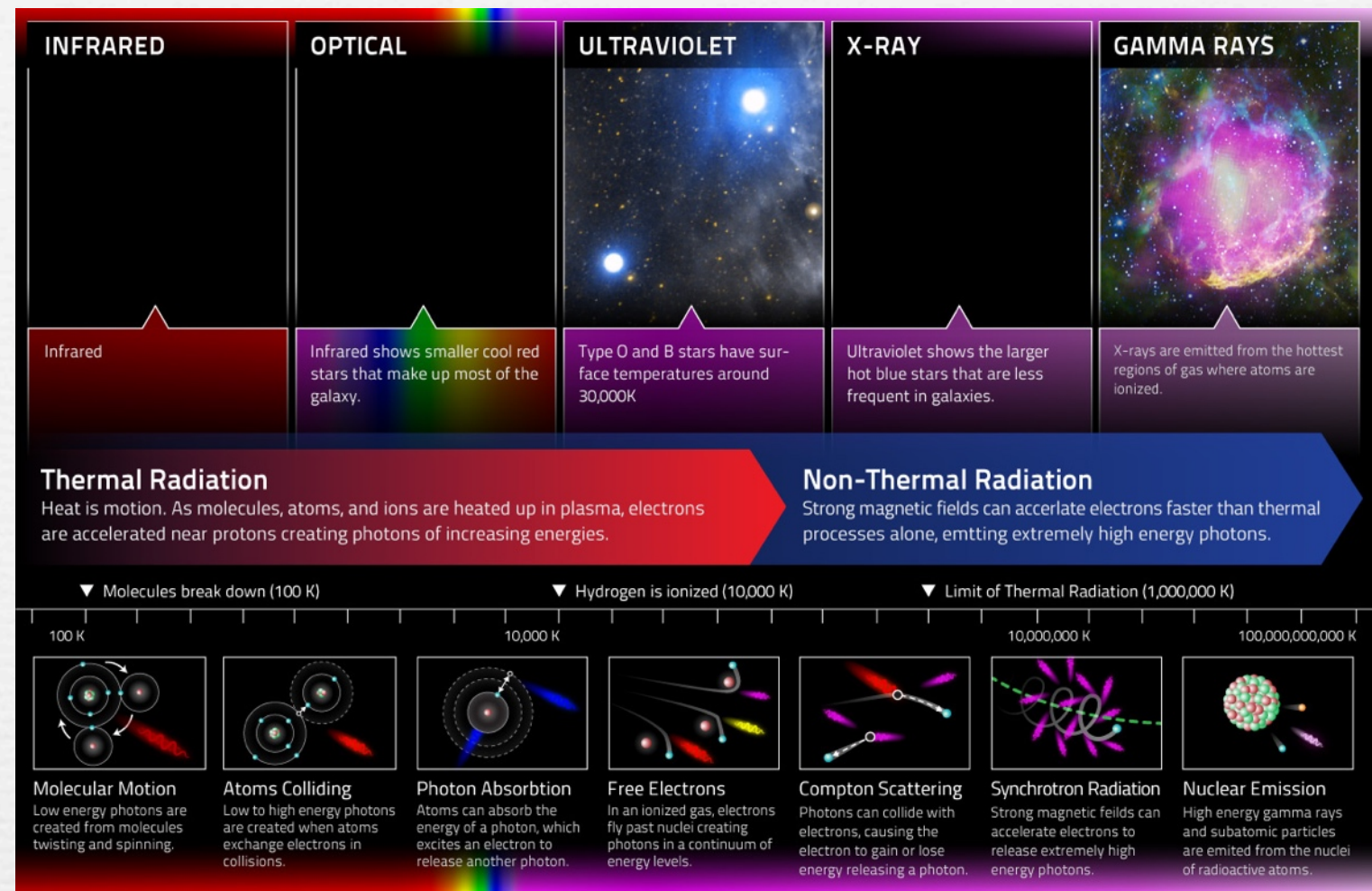
Nota: neutrinos são considerados não-bariônicos.

7.0 Introdução



Wikipedia

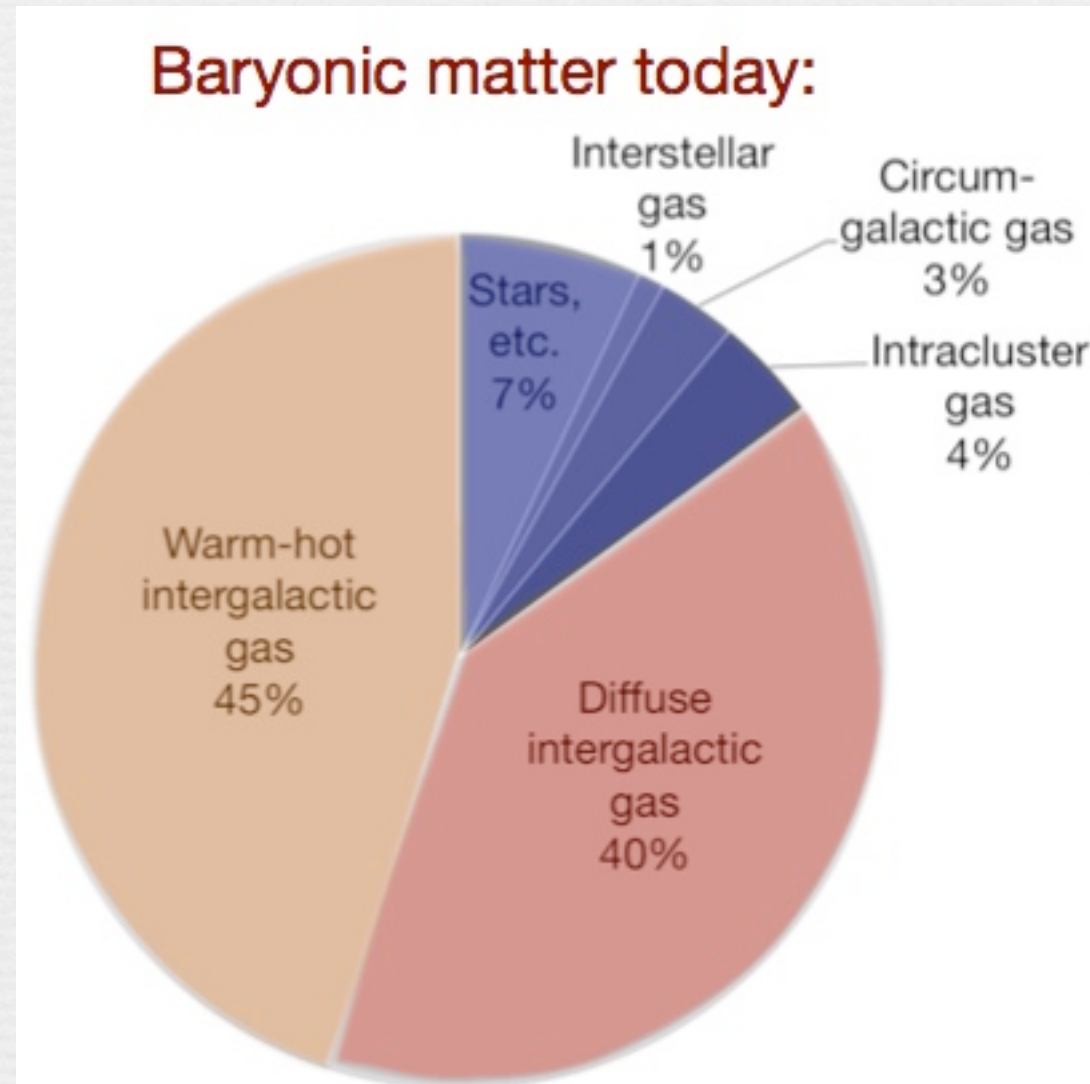
A matéria bariônica é detectada pelos fótons que emitem / absorvem. Também pode ser detectada indiretamente por efeitos gravitacionais que provocam perturbações em corpos vizinhos.



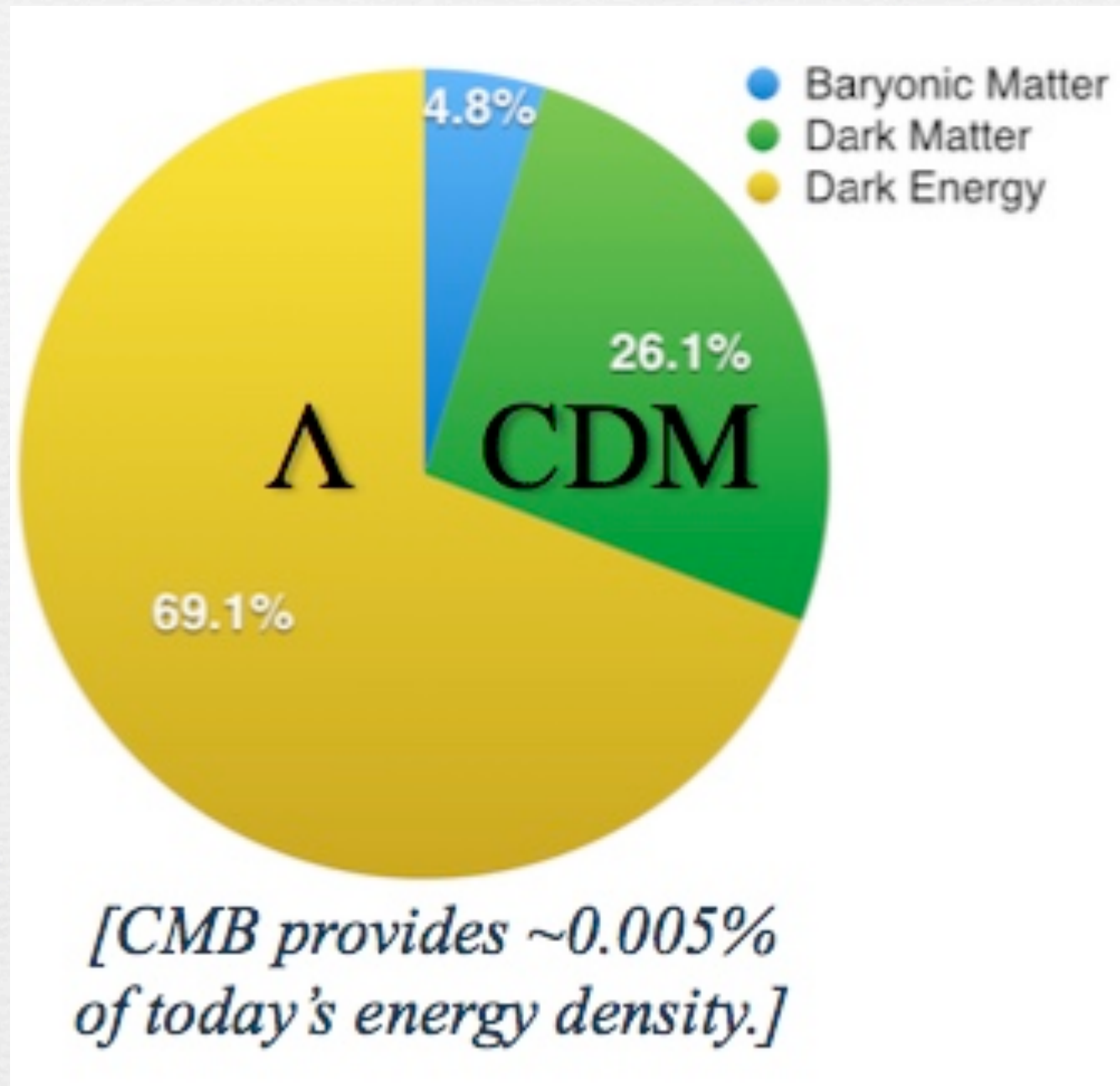
Buracos negros também são considerados matéria bariônica pelos cosmólogos, mas é bom ter em mente que, ao ser adicionada ao BN, a matéria “perde” sua distinção (bariônica ou não), já que BNs não possuem “cabelo”.



A matéria bariônica, quando detectada por efeitos gravitacionais, é usualmente nomeada “massa faltante” (“missing mass”).
Ou seja, é matéria escura bariônica.



Porém, há evidências de que o Universo tem um tipo de **matéria escura que não é bariônica**.



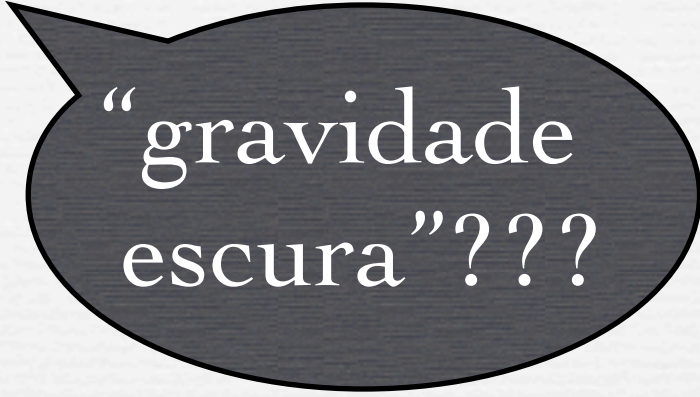
Porém, há evidências de que o Universo tem um tipo de **matéria escura que não é bariônica**.

- Curvas de rotação e dinâmica de galáxias
- Dinâmica de aglomerados de galáxias
- Lentes gravitacionais
- Picos acústicos da CMBR (razão DM/bárion)
- Espectro de potência da matéria e formação de estruturas (razão DM/bárion)
- Colisões de aglomerados de galáxias

Características da **matéria escura não-bariônica**.

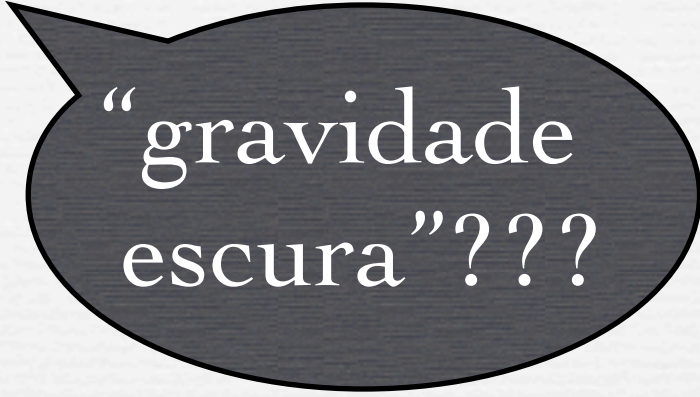
- Massiva (atrai gravitacionalmente e gera aglomeração)
- Fria (não-relativística)
- Acolisional
- Escura (não emite / absorve radiação EM)
- Não interagente ou fracamente interagente (ie, interações de origem não-gravitacional não foram detectadas)

Matéria escura não-bariônica.



“gravidade
escura”???

Matéria escura não-bariônica.



“gravidade
escura”???

Modificações da RG:

- Teorias de campo escalar
- Teorias bimétricas
- Teorias quasi-lineares
- Teorias tensoriais (eg., $f(R)$, Gauss-Bonnet, etc)
- Teorias escala-tensoriais
- Teorias vetor-tensoriais
- Teorias não-métricas
- Quintessência
- Teorias de Moffat
- MOND relativístico
- ETC...

O que não sabemos sobre a **matéria escura não-bariônica?**

- Sua natureza fundamental
- Como se formou primordialmente
- Se possui alguma interação não-gravitacional com as outras partículas do modelo padrão
- Se possui alguma interação não-gravitacional consigo mesma
- Se seria na verdade uma manifestação de “gravitação escura”, seja inteiramente ou parcialmente acoplada com esta.

$$\Omega_{m,0}$$

Nesta aula, estamos interessados em estudar métodos que estimem o **parâmetro de densidade de matéria total no tempo atual** e, para tanto, assumiremos que a matéria escura não-bariônica se manifesta como partículas, gerando uma densidade de energia equivalente, tal como no caso da matéria bariônica.

7.1 A Matéria Visível

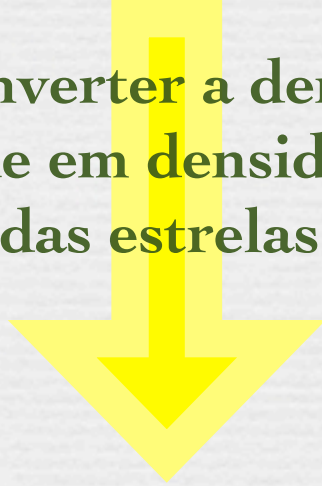
Banda-V: $500 \text{ nm} < \lambda < 590 \text{ nm}$

$$L_{\odot,V} \approx 0.12 L_{\odot} \approx 4.6 \times 10^{25} \text{ watts}$$

Densidade de luminosidade de galáxias locais, baseada em surveys na banda-V:

$$\Psi_V = 1.1 \times 10^8 L_{\odot,V} \text{ Mpc}^{-3} \quad (d \lesssim 0.1c/H_0)$$

Como converter a densidade de
luminosidade em densidade de massa
das estrelas?


$$\rho_*$$

7.1 A Matéria Visível

$$\Psi_V = 1.1 \times 10^8 L_{\odot,V} \text{ Mpc}^{-3}$$

Como converter a densidade de
luminosidade em densidade de massa
das estrelas?



$$\rho_*$$

**Razão Massa/
Luminosidade (M/L)
das estrelas**

7.1 A Matéria Visível

$$\Psi_V = 1.1 \times 10^8 L_{\odot,V} \text{ Mpc}^{-3}$$

Como converter a densidade de
luminosidade em densidade de massa
das estrelas?



$$\rho_*$$

**Razão Massa/
Luminosidade (M/L)
das estrelas**

Se todas as estrelas fossem idênticas ao Sol... $\langle M/L_V \rangle = 1 M_{\odot}/L_{\odot,V}$

Mas as estrelas têm propriedades diferentes.

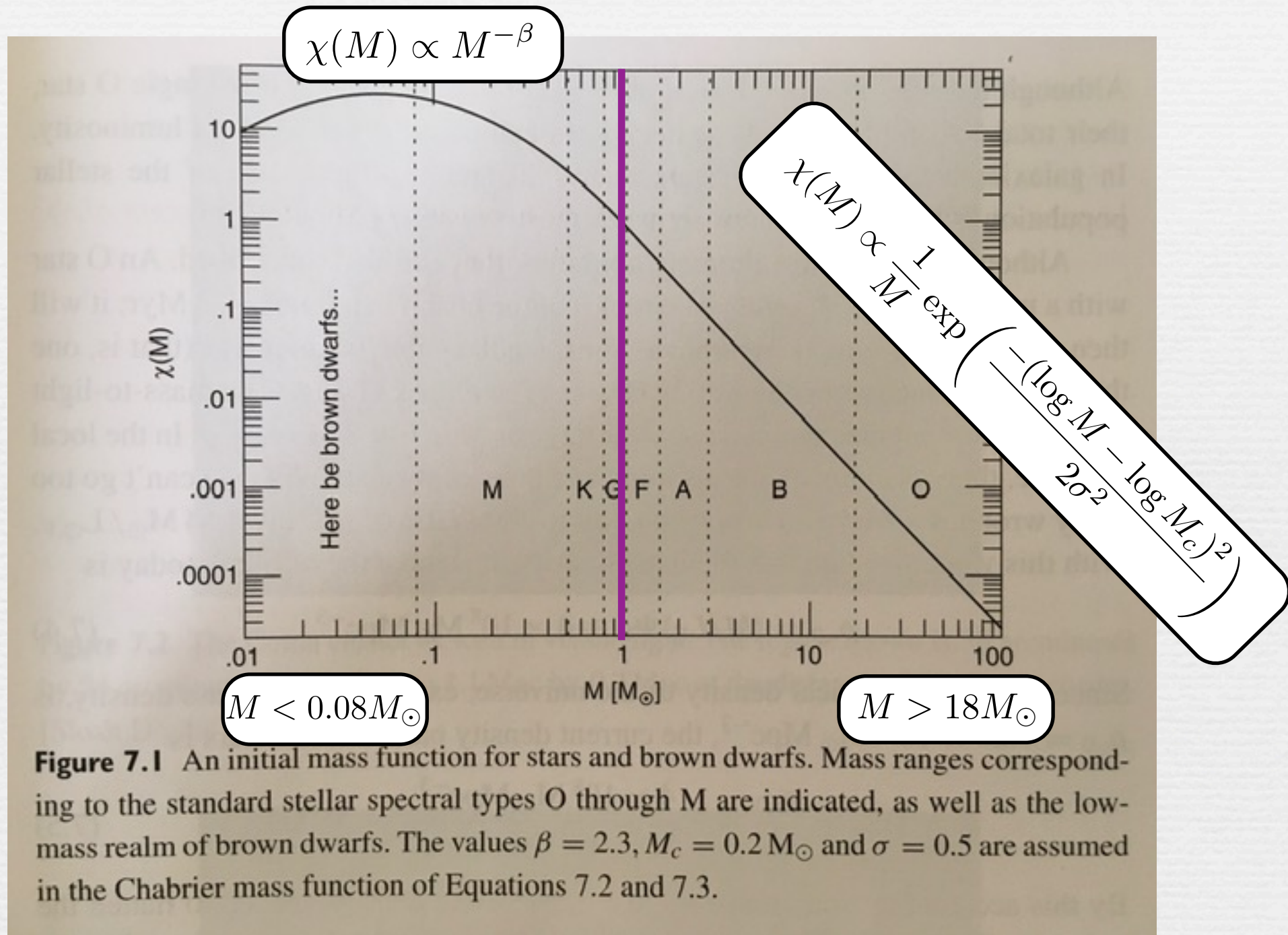
Estrelas tipo O: $M/L_V = 60 M_{\odot}/20000 L_{\odot,V} \approx 0.003 M_{\odot}/L_{\odot,V}$

Estrelas tipo M: $M/L_V = 0.1 M_{\odot}/5 \times 10^{-5} L_{\odot,V} \approx 2000 M_{\odot}/L_{\odot,V}$

Função de massa inicial

$$\chi(M)$$

250 estrelas
tipo M para
cada estrela O



Função de massa inicial

$$\chi(M)$$

250 estrelas tipo M para cada estrela tipo O.

Porém a luminosidade total (banda-V) dessas 250 estrelas tipo M é muito menor do que a de uma estrela tipo O.

Para galáxias com formação estelar ativa:

$$M/L_V \approx 0.3M_{\odot}/L_{\odot,V}$$

Estrelas tipo O, apesar de muito luminosas, têm uma vida breve.

$$\text{Ex: } M = 60M_{\odot} \Rightarrow t \approx 3 \text{ Myr}$$

Galáxias quiescentes serão deficientes em estrelas O.

$$M/L_V \approx 8M_{\odot}/L_{\odot,V}$$

Universo local: mistura de galáxias ativas e quiescentes.

$$\langle M/L_V \rangle \approx 4M_{\odot}/L_{\odot,V}$$

Usando o valor acima, temos:

$$\rho_{*,0} = \langle M/L_V \rangle \Psi_V \approx 4 \times 10^8 M_{\odot} \text{ Mpc}^{-3}$$

$$\Omega_{*,0} = \frac{\rho_{*,0}}{\rho_{c,0}} \approx 0.003$$

$$\rho_{c,0} = 1.28 \times 10^{11} M_{\odot} \text{ Mpc}^{-3}$$

Incluindo anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros:

$$\Omega_{*,0} < 0.005$$

Galáxias também contêm matéria bariônica sem ser estrelas: gás interestelar.

Há também gás intergaláctico, por ex., em aglomerados de galáxias.

Ex.: Aglomerado de Coma. $L_{Coma,V} \approx 5 \times 10^{12} L_{\odot,V}$

Se (em estrelas) : $\langle M/L_V \rangle \approx 4M_{\odot}/L_{\odot,V}$
 $M_{Coma,*} \approx 2 \times 10^{13} M_{\odot}$

Esse valor é ~10 vezes menor do que a massa do gás quente intergaláctico (observado em raios X): $M_{Coma,gas} \approx 2 \times 10^{14} M_{\odot}$

$$T \approx 10^8 K$$

$$E \sim kT \sim 9 \text{ keV}$$

Cerca de 85% dos bárions no Universo estão na forma de gás extremamente tênue no espaço intergaláctico, fora de galáxias e de aglomerados de galáxias, difíceis de detectar.

Observações da CMBR e previsões da nucleossíntese no Universo primordial fornecem a melhor estimativa para o limite superior da densidade de bárions no Universo atual.

Propriedades das flutuações de temperatura da CMBR dependem da razão bárions/fótons.

Eficiência da nucleossíntese (conversão de H em D, He, Li, etc) depende da razão bárions/fótons.

$$\Omega_{bar,0} = 0.048 \pm 0.003 \sim 10 \times (20 \times) \Omega_{*,0}$$

7.2 A Matéria Escura em Galáxias

Em evidência observacional da matéria escura não-bariônica através do estudo das curvas de rotação de galáxias.



Vera Rubin
(1928-2016)

ROTATION OF THE ANDROMEDA NEBULA FROM A SPECTROSCOPIC SURVEY OF EMISSION REGIONS*

VERA C. RUBIN† AND W. KENT FORD, JR.†

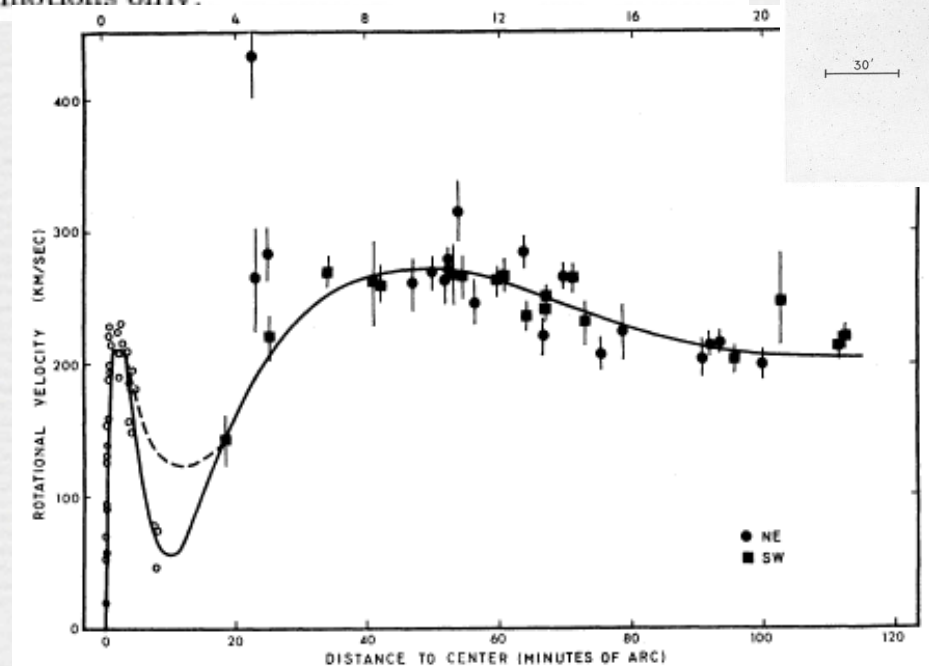
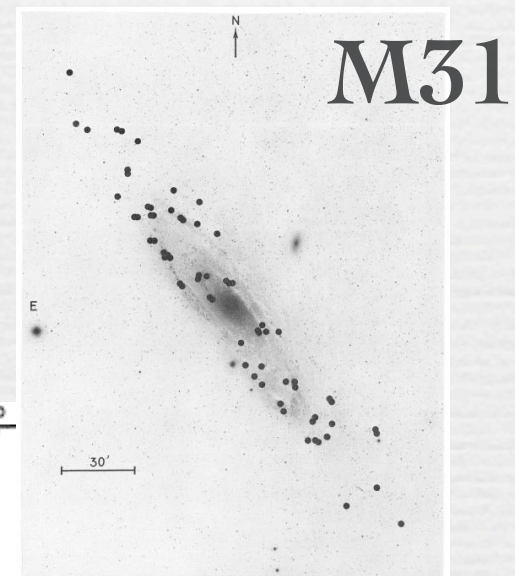
Department of Terrestrial Magnetism, Carnegie Institution of Washington and
Lowell Observatory, and Kitt Peak National Observatory‡

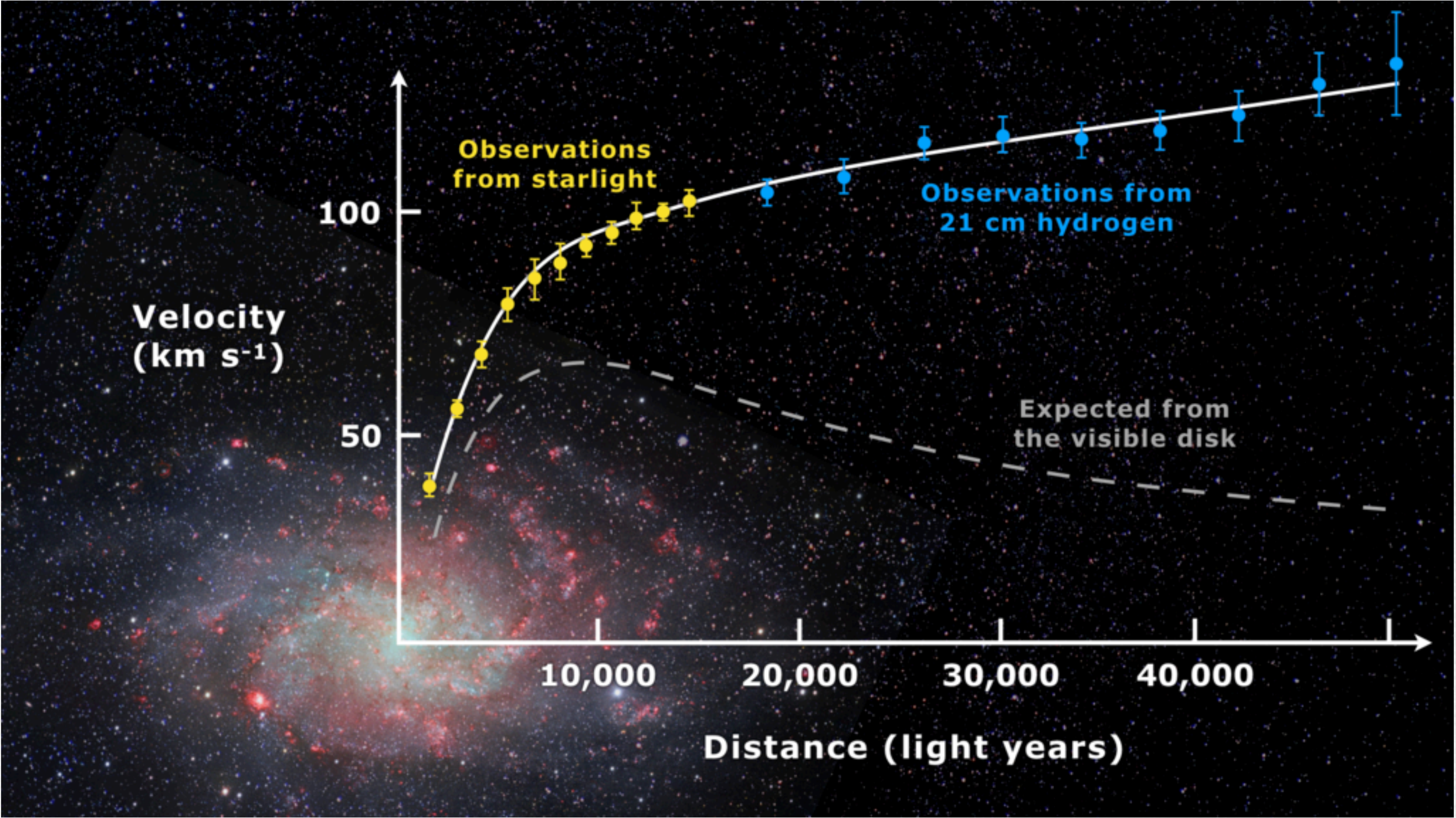
Received 1969 July 7; revised 1969 August 21

ABSTRACT

Spectra of sixty-seven H II regions from 3 to 24 kpc from the nucleus of M31 have been obtained with the DTM image-tube spectrograph at a dispersion of $135 \text{ \AA mm}^{-1}$. Radial velocities, principally from H α , have been determined with an accuracy of $\pm 10 \text{ km sec}^{-1}$ for most regions. Rotational velocities have been calculated under the assumption of circular motions only.

ApJ, 159, 379 (1970)





Suponha uma estrela em órbita circular em torno do centro de sua galáxia hospedeira, com raio da órbita R .

Assumindo uma distribuição esfericamente de massa, onde $M(R)$ é a massa no interior de uma esfera de raio R e v é a velocidade orbital da estrela:

$$|a_{\text{centrip}}| = \frac{v^2}{R} = |F_{\text{grav}}| = \frac{GM(R)}{R^2}$$

Nota: outras distribuições de massa implicam numa pequena correção para esta equação.

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

$M(R)$ torna-se constante a partir de um certo R .

$$v \propto \frac{1}{\sqrt{R}}$$

Rotação Kepleriana

Perfil do brilho superficial $I(R)$ para galáxias espirais:

$$I(R) = I_0 \exp\left(-\frac{R}{R_s}\right)$$

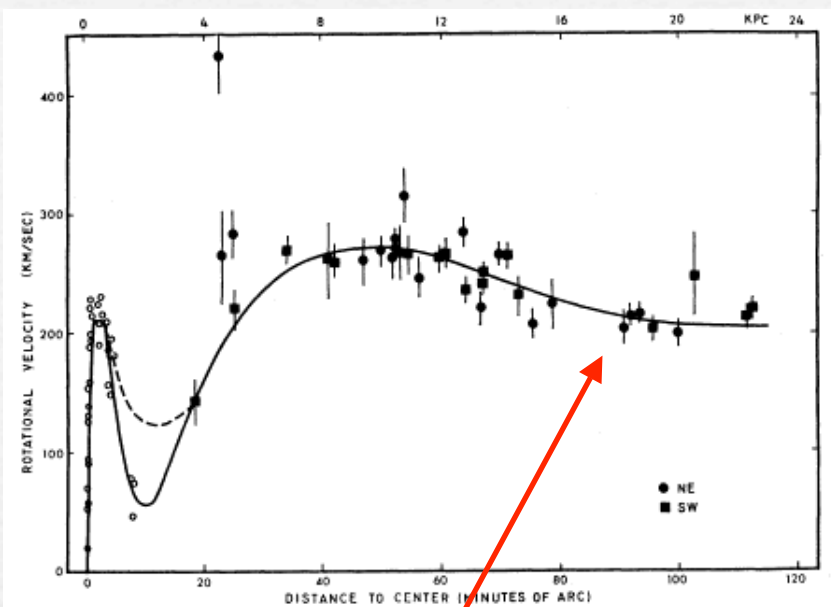
Na banda-B:

MW: $R_s \approx 4 \text{ kpc}$

M31: $R_s \approx 6 \text{ kpc}$

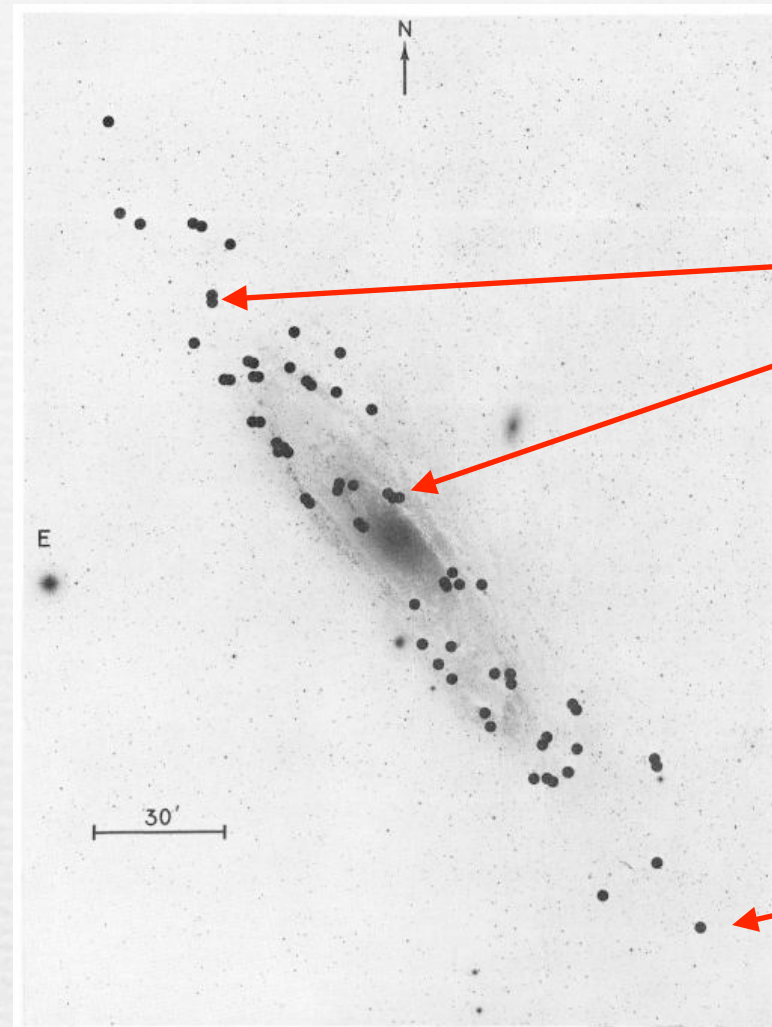
7.2 A Matéria Escura em Galáxias

M31



ApJ, 159, 379 (1970)

Velocidade orbital até
 $R = 24 \text{ kpc} = 4R_s$
(gás quente).



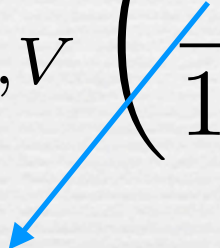
Linhas de emissão em
regiões de gás quente
ionizado: observações
do deslocamento
Doppler para
obtenção da
velocidade orbital.

Para R até $\sim 6R_s$, linha
de 21 cm do H

**Curva não-Kepleriana: indicação da
presença de um halo escuro (também em
outras galáxias espirais).**

Aplicação para a Via-Láctea (MW):

$$M(R) = \frac{v^2 R}{G} = 1.05 \times 10^{11} M_{\odot} \left(\frac{v}{235 \text{ km s}^{-1}} \right)^2 \left(\frac{R}{8.2 \text{ kpc}} \right)$$

$$\langle M/L_V \rangle_{\text{MW}} \approx 64 M_{\odot} / L_{\odot, V} \left(\frac{R_{\text{halo}}}{100 \text{ kpc}} \right) \quad \begin{matrix} v = 235 \text{ km s}^{-1} \\ L_{\text{MW}, V} \approx 2.0 \times 10^{10} L_{\odot, V} \end{matrix}$$


Estimativa via aglomerados globulares e galáxias satélites: $R_{\text{halo}} \approx 75 \text{ kpc}$

$$M_{\text{MW}} \approx 9.6 \times 10^{11} M_{\odot}$$

$\langle M/L_V \rangle_{\text{MW}} \approx 48 M_{\odot} / L_{\odot, V} \sim 10$ vezes maior do que a M/L em estrelas no disco da MW: halo muito mais massivo.

Talvez R_{halo} seja ainda maior ($\sim 300 \text{ kpc}$), elevando esses valores significativamente.

Algumas sugestões de reviews:

[https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/
annurev.astro.39.1.137](https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.astro.39.1.137)

[https://academic.oup.com/pasj/article/69/1/
R1/2632658](https://academic.oup.com/pasj/article/69/1/R1/2632658)

<https://www.mdpi.com/2075-4434/8/2/47>

7.3 A Matéria Escura em Aglomerados de Galáxias

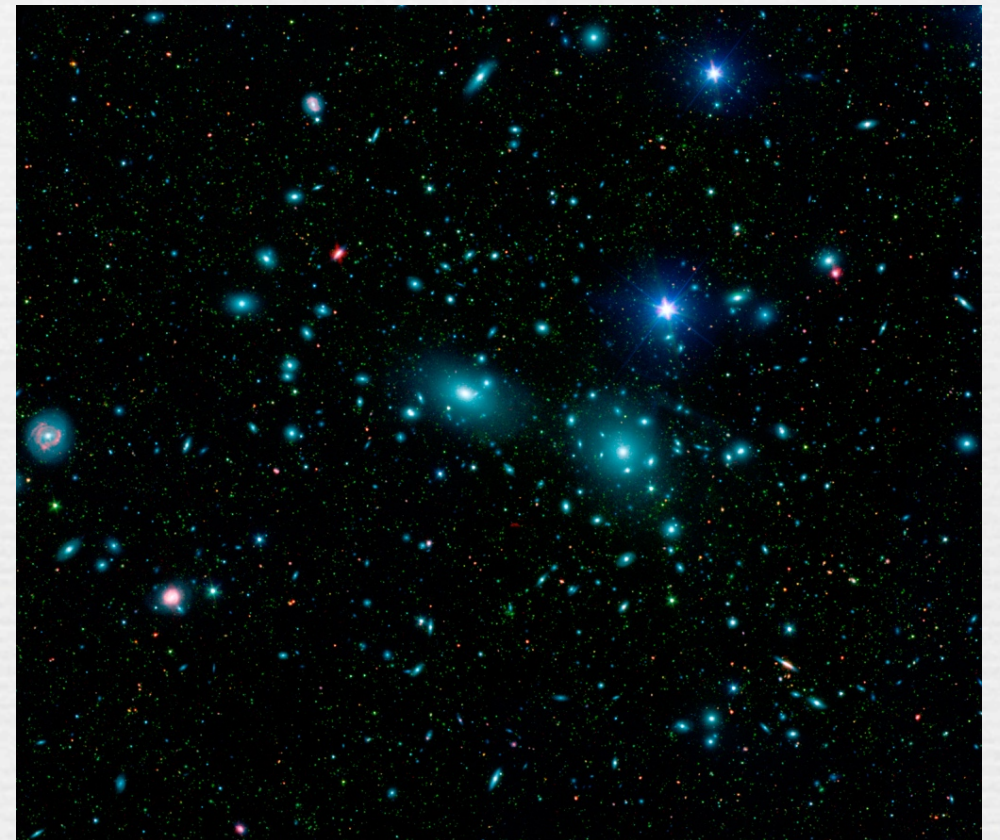


Fritz Zwicky
(1898-1974)

Proposta teórica (aplicação do teorema do virial) para evidências da matéria escura: observações do Aglomerado de Coma em 1933.

$$\sigma_r \sim 1000 \text{ km s}^{-1}$$

Estrelas e gás não são suficientes para fornecer atração gravitacional que mantenha o aglomerado coeso.



7.3 A Matéria Escura em Aglomerados de Galáxias

aceleração a i-ésima galáxia

$$\ddot{\vec{x}} = G \sum_{i \neq j} m_j \frac{\vec{x}_j - \vec{x}_i}{|\vec{x}_j - \vec{x}_i|^3}$$

(aproximação Newtoniana;
aglomerado isolado; sistema de
N galáxias “pontuais”)

energia potencial
gravitacional do
sistema

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

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

$\alpha \approx 0.45$
(ajuste)

r_h = raio à meia-
massa

energia cinética
do sistema

$$K = \frac{1}{2} \sum_i m_i |\dot{\vec{x}}_i|^2$$

$$K = \frac{1}{2} M \langle v^2 \rangle$$

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

velocidade média quadrática

momento de
inércia do sistema

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

7.3 A Matéria Escura em Aglomerados de Galáxias

momento de
inércia do sistema

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



Escrever I em termos de W e K
(pág. 132 de Ryden)

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

Teorema do Virial



Sistema em estado estacionário:

$I = \text{constante.}$

Sistema de coordenadas no qual o centro de massa
do sistema está em repouso.

$$W + 2K = 0$$

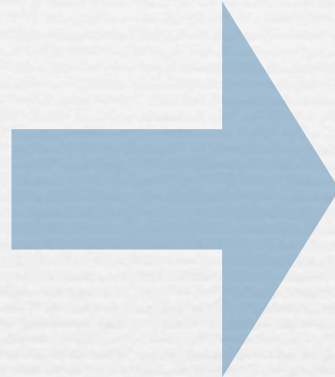
$$K = -\frac{W}{2}$$

**Teorema do Virial do
estado estacionário**

7.3 A Matéria Escura em Aglomerados de Galáxias

Podemos estimar a massa de um sistema gravitacional, assumindo que esteja em estado estacionário.

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



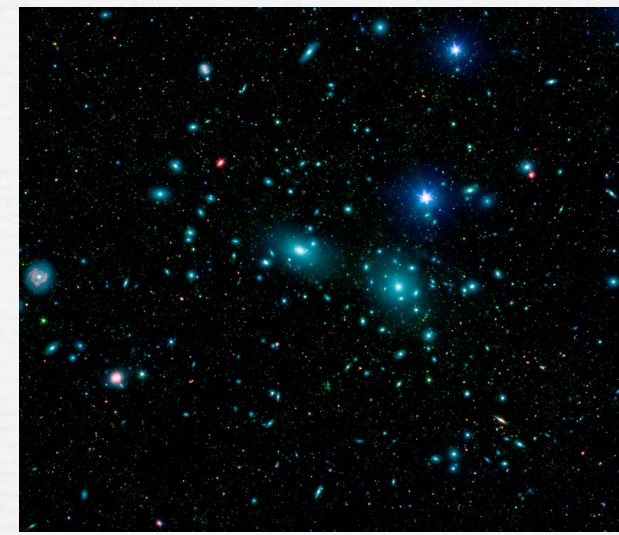
$$M = \frac{\langle v^2 \rangle r_h}{\alpha G}$$

Similar à eq. da seção anterior:

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

Complicações: não sabemos $\langle v^2 \rangle$ e r_h , pois temos apenas o redshift de cada galáxia (podemos estimar a velocidade na linha de visada), e r_h é ainda mais difícil de ser estimado.

7.3 A Matéria Escura em Aglomerados de Galáxias



Ex.: aglomerado de Coma.

$$\langle z \rangle = 0.0232$$

$$d_{\text{Coma}} = \frac{c}{H_0} \langle z \rangle = 102 \text{ Mpc}$$

$$\sigma_r = \langle [v_r - \langle v_r \rangle]^2 \rangle^{1/2} = 880 \text{ kms}^{-1}$$

$$\langle v^2 \rangle = 3\sigma_r = 2.32 \times 10^{12} \text{ m}^2\text{s}^{-2} \quad (\text{assumindo isotropia})$$

$$r_h \approx 1.5 \text{ Mpc} \approx 4.6 \times 10^{22} \text{ m} \quad (\text{assumindo M/L constante ao longo do raio; distribuição esférica de massa total})$$

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

Ex.: aglomerado de Coma (cont.).

$$M_{\text{Coma}} \approx 2 \times 10^{15} M_{\odot} \quad (\text{massa total, virial})$$

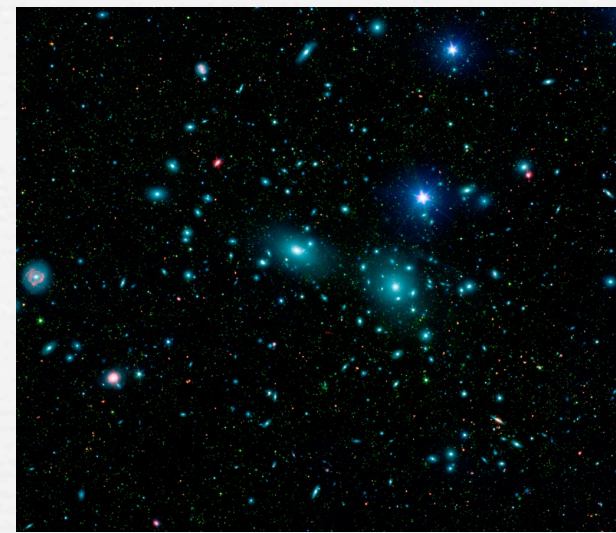
$$M_{\text{Coma},*} \approx 2 \times 10^{13} M_{\odot}$$

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

$$L_{\text{Coma},V} \approx 5 \times 10^{12} L_{\odot,V}$$

$$\langle M/L_V \rangle_{\text{Coma}} \approx 400 M_{\odot}/L_{\odot,V}$$

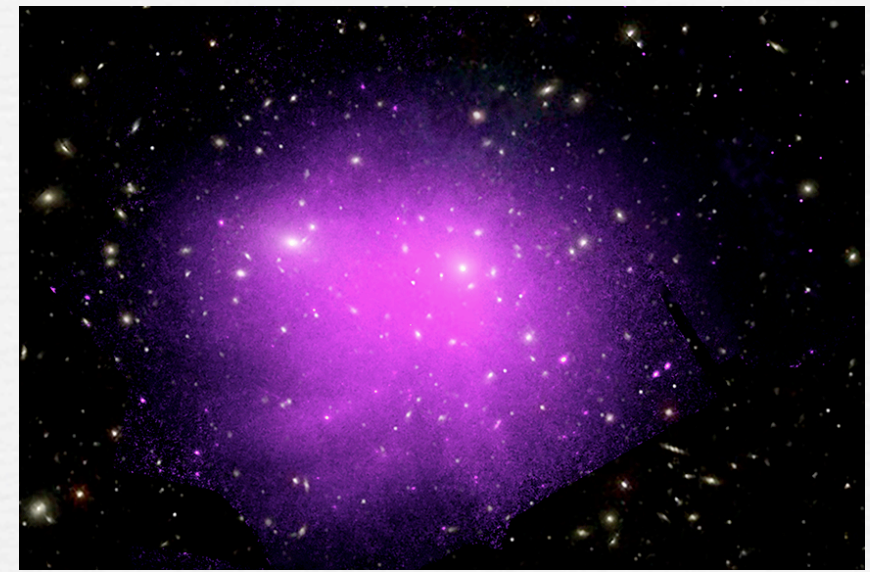
comparar com: $\langle M/L_V \rangle_{\text{MW}} \approx 48 M_{\odot}/L_{\odot,V}$



7.3 A Matéria Escura em Aglomerados de Galáxias

Gás quente (emissor em raios X) no interior de aglomerados de galáxias

Temperatura e densidade do gás podem ser também usados para estimarmos a massa total do aglomerado.



<https://chandra.harvard.edu/photo/2019/coma/>

Usamos a equação de equilíbrio hidrostático, considerando que a pressão do gás contrabalança a gravidade:

$$\frac{dP_{gas}}{dr} = - \frac{GM(r)\rho_{gas}(r)}{r^2}$$

Gás ideal:

$$P_{gas} = \frac{\rho_{gas} k T_{gas}}{\mu}$$



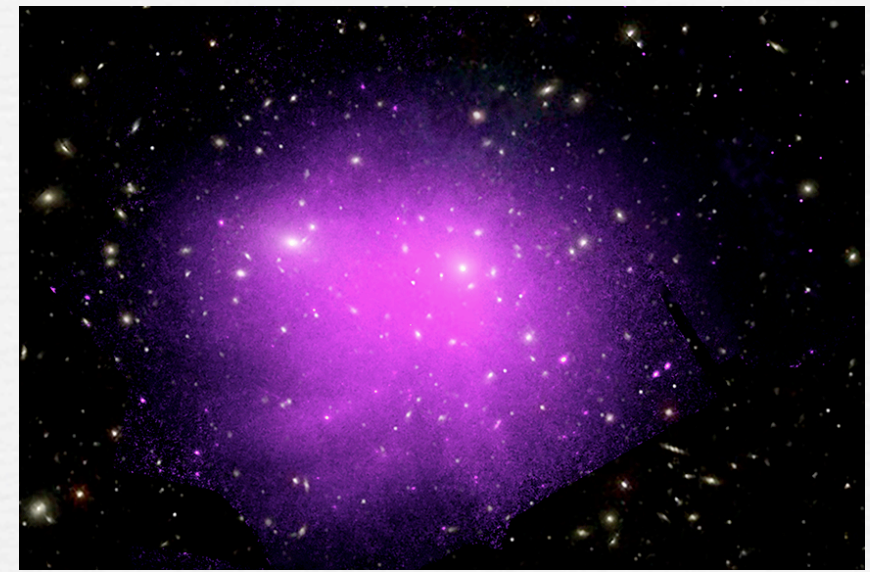
massa média por partícula de gás, assumimos constante

$$M(r) = \frac{kT_{gas}(r)r}{G\mu} \left(-\frac{d \ln \rho_{gas}}{d \ln r} - \frac{d \ln T_{gas}}{d \ln r} \right)$$

7.3 A Matéria Escura em Aglomerados de Galáxias

Gás quente (emissor em raios X) no interior de aglomerados de galáxias (cont.)

$$M(r) = \frac{kT_{gas}(r)r}{G\mu} \left(-\frac{d \ln \rho_{gas}}{d \ln r} - \frac{d \ln T_{gas}}{d \ln r} \right)$$



<https://chandra.harvard.edu/photo/2019/coma/>

Raios X: **emissão bremsstrahlung** (aceleração de elétrons livres por prótons e núcleos de He), e **emissão de linha** do Fe (e outros elementos pesados) altamente ionizados.

São feitos ajustes de modelos para o espectro em raios X, para obtemos a temperatura, densidade e composição química do gás.

$$M_{\text{Coma}} \approx 1.3 \times 10^{15} M_{\odot} \quad (r \lesssim 4 \text{ Mpc})$$

compatível com estimativa pelo teorema do virial

Estimativas similares para outros aglomerados, gerando o limite inferior para o parâmetro de densidade de massa total do Universo:

$$\Omega_{\text{aglom},0} \approx 0.2$$

- Algumas referências:

How Rare is the Bullet Cluster?

<https://arxiv.org/abs/astro-ph/0604443>

The non-gravitational interactions of dark matter in
colliding galaxy clusters

<https://arxiv.org/abs/1503.07675>

7.4 Lentes Gravitacionais

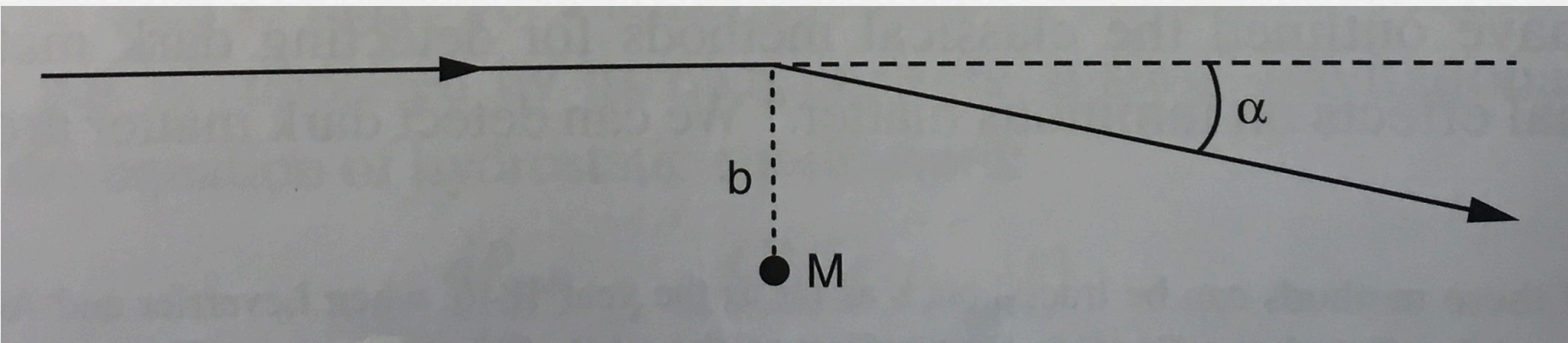
Até o momento, estudamos os métodos clássicos para a detecção da matéria escura através de seus efeitos gravitacionais sobre a matéria luminosa.

De acordo com a RG, a matéria escura também afetará a trajetória dos fótons: a luz poderá ser “curvada” e “focalizada”.

“Lentes gravitacionais”

“MACHO”: MAssive Compact Halo Objects

Matéria (escura) bariônica: estrelas anãs brancas frias, buracos negros, anãs marrons, ou qualquer objeto compacto com baixíssima luminosidade no halo da nossa (ou de outras) galáxia(s).



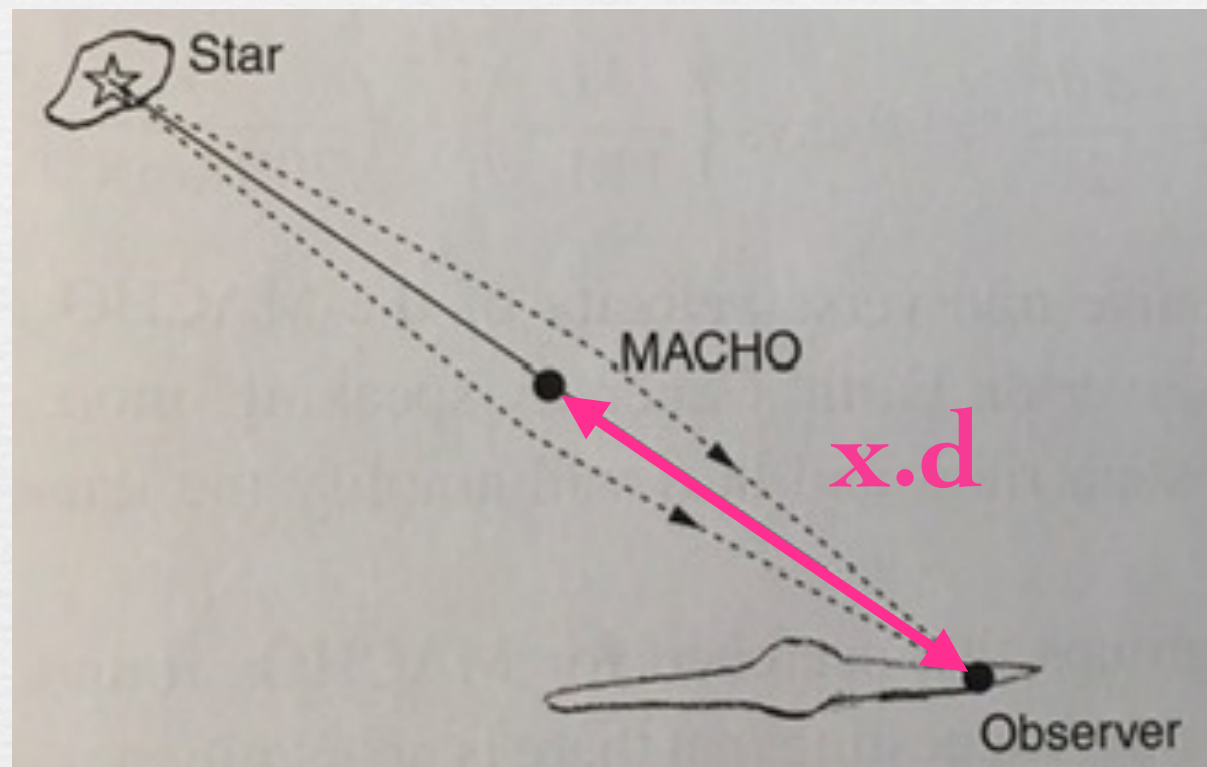
$$\alpha = \frac{4GM}{c^2 b}$$

Ryden (Introduction to Cosmology)

Ex: luz de uma estrela passando muito próxima da superfície do Sol.

$$\alpha = \frac{4GM_{\odot}}{c^2 R_{\odot}} = 1.7 \text{ arcsec}$$

“MACHO”: MAssive Compact Halo Objects



Ryden (Introduction to Cosmology)

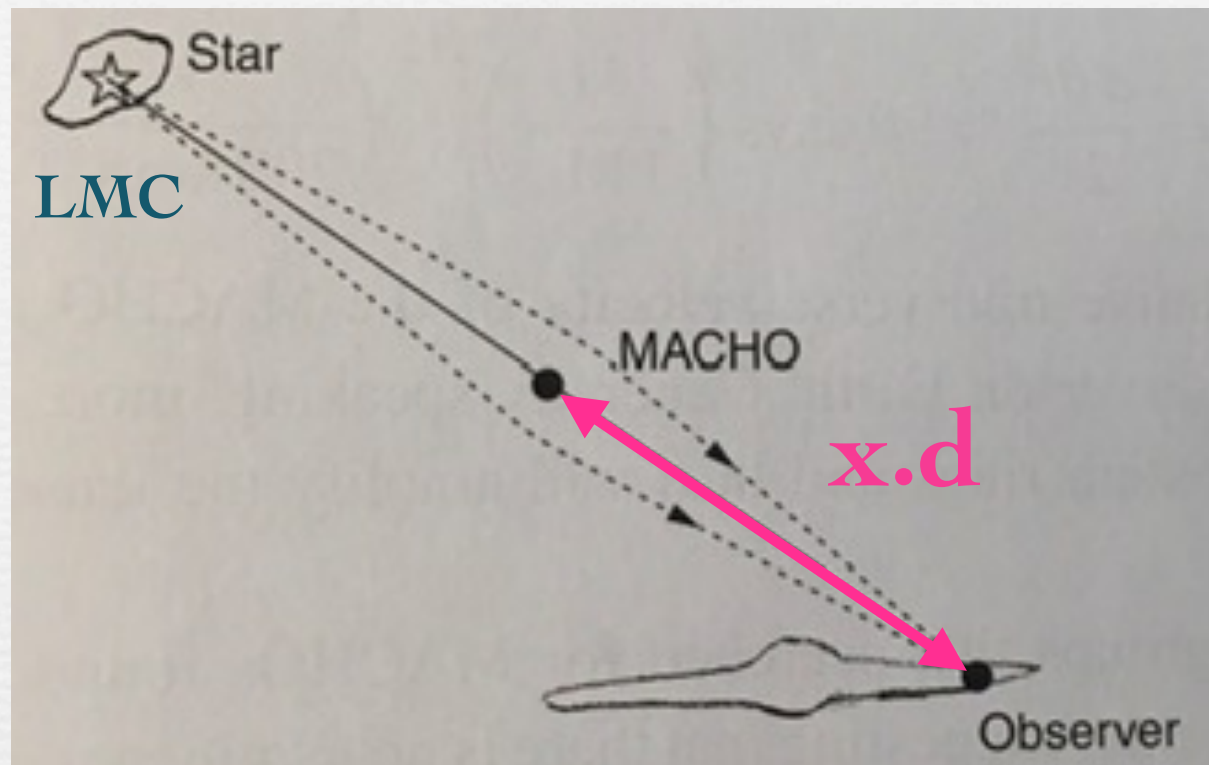
Alinhamento perfeito estrela-MACHO-observador gerará um anel luminoso, com raio angular de (raio de Einstein):

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

$$(0 < x < 1)$$

MACHOs mais massivos produzem raios de Einstein maiores, para uma dada distância fixa.

“MACHO”: MAssive Compact Halo Objects



Ryden (Introduction to Cosmology)

Para $x \approx 0.5$:

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

Dado o pequeno tamanho do raio de Einstein, a **probabilidade** de uma estrela qualquer da LMC, num tempo qualquer, formar uma lente é de:

$$P \sim 5 \times 10^{-7}$$

A **escala de tempo** típica para um evento de lente gravitacional é o tempo necessário para um MACHO atravessar uma distância angular igual ao raio de Einstein, tal como visto pelo observador. No caso do observador na Terra e um MACHO a meia distância da LMC, temos:

$$\Delta t = \frac{d\theta_E}{2v} \approx 90 \text{ dias} \left(\frac{M}{1 \text{ M}_\odot} \right)^{1/2} \left(\frac{v}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-1}$$

MACHOs mais massivos mantêm a lente por mais tempo, para um dado v fixo.

v = velocidade relativa de trânsito MACHO - estrela

“MACHO”: MAssive Compact Halo Objects

RESULTADOS OBSERVACIONAIS:

- Poucos eventos de curta duração, sugerindo que a população de anãs marrons ou planetas livres, com massa menor do que $0.08 M_{\text{sol}}$, é muito pequena no halo da nossa Galáxia.
- Número total de eventos de lentes sugerem que no máximo 8% da massa do halo está na forma de MACHOs, indicando presença de matéria escura não-bariônica, distribuída de forma mais suavizada do que a de MACHOs.

Aplicação em aglomerados de galáxias



Abel 2218

$z = 0.176$

$d = 740 \text{ Mpc}$

$$\theta_E \approx 0.5 \text{ arcmin} \left(\frac{M}{10^{14} \text{ M}_\odot} \right)^{1/2} \left(\frac{d}{1000 \text{ Mpc}} \right)^{-1/2}$$

- Algumas referências:

Review:

<https://arxiv.org/abs/1010.3829>

Gravitational-lensing measurements push Hubble-constant discrepancy past 5σ

<https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.6.1.20200210a/full/>

<https://arxiv.org/abs/1907.04869>

7.5 A Natureza da Matéria Escura

O que é?

Algumas possibilidades:

- Axions
 - Buracos negros primordiais
 - Neutrinos massivos
 - Partículas supersimétricas massivas
 - WIMPs (weakly interacting massive particles)
- etc....

Axions

$$m_{\text{ax}} c^2 \sim 10^{-5} \text{ eV} \Leftrightarrow m_{\text{ax}} \sim 2 \times 10^{-41} \text{ kg}$$

$$m_{e^-} \sim 9 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

BHs primordiais

$$m_{\text{BH}} \sim 10^5 M_{\odot} \Leftrightarrow m_{\text{BH}} \sim 2 \times 10^{35} \text{ kg}$$

$$M_{\oplus} \sim 6 \times 10^{24} \text{ kg}$$

“É um sinal da vasta ignorância sobre a matéria escura não-bariônica que dois candidatos diferem em massa em 76 ordens de magnitude.”

Neutrinos massivos (Sabemos que existem...)

Ex.: neutrinos cósmicos de fundo

$$n_\nu = \frac{3}{11} n_\gamma = \frac{9}{11} 4.108 \times 10^8 \text{ m}^{-3} = 3.36 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$$

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)				interactions / force carriers (bosons)	
I		II		III	
mass charge spin	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	0 0 1 g gluon	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 0 H higgs
QUARKS	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 γ photon	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e electron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	0 1 Z Z boson	
	$<1.0 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$<18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ±1 1 W W boson	
LEPTONS				GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS	SCALAR BOSONS

Neutrinos massivos (Sabemos que existem...)

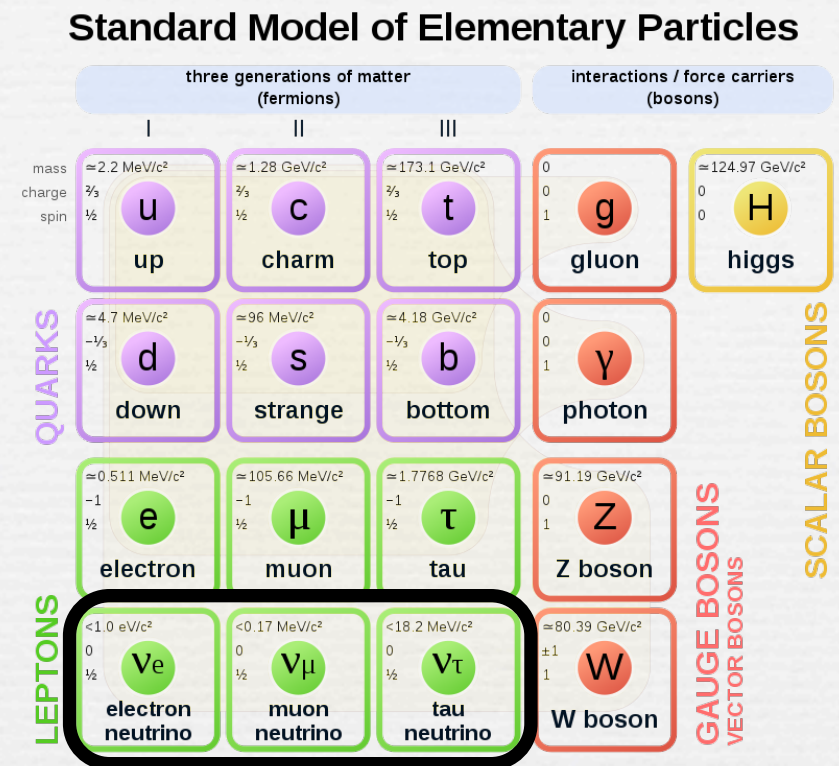
Ex.: neutrinos cósmicos de fondo

$$n_\nu = \frac{3}{11} n_\gamma = \frac{9}{11} 4.108 \times 10^8 \text{ m}^{-3} = 3.36 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$$

Para fornecerem toda a massa não-bariônica,
a massa média do neutrino teria que ser:

$$m_\nu c^2 = \frac{\Omega_{\text{DM},0} \epsilon_{c,0}}{n_\nu} \approx 3.8 \text{ eV}$$

$\Omega_{\text{DM},0} \approx 0.262$



Neutrinos massivos (Sabemos que existem...)

Ex.: neutrinos cósmicos de fundo

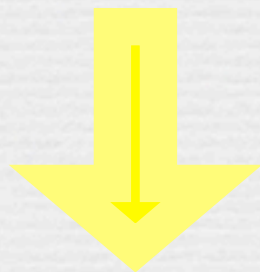
$$n_\nu = \frac{3}{11} n_\gamma = \frac{9}{11} 4.108 \times 10^8 \text{ m}^{-3} = 3.36 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$$

Para fornecerem toda a massa não-bariônica, a massa média do neutrino teria que ser:

$$m_\nu c^2 = \frac{\Omega_{\text{DM},0} \epsilon_{c,0}}{n_\nu} \approx 3.8 \text{ eV}$$

Estudos da oscilação de neutrinos (Eqs. 2.25 e 2.26, Ryden) indicam:

$$0.019 \text{ eV} < m_\nu c^2 < 0.1 \text{ eV}$$



$$0.0013 < \Omega_{\nu,0} < 0.007$$

$$\Omega_{\nu,0} \lesssim 3\% \Omega_{\text{DM},0}$$

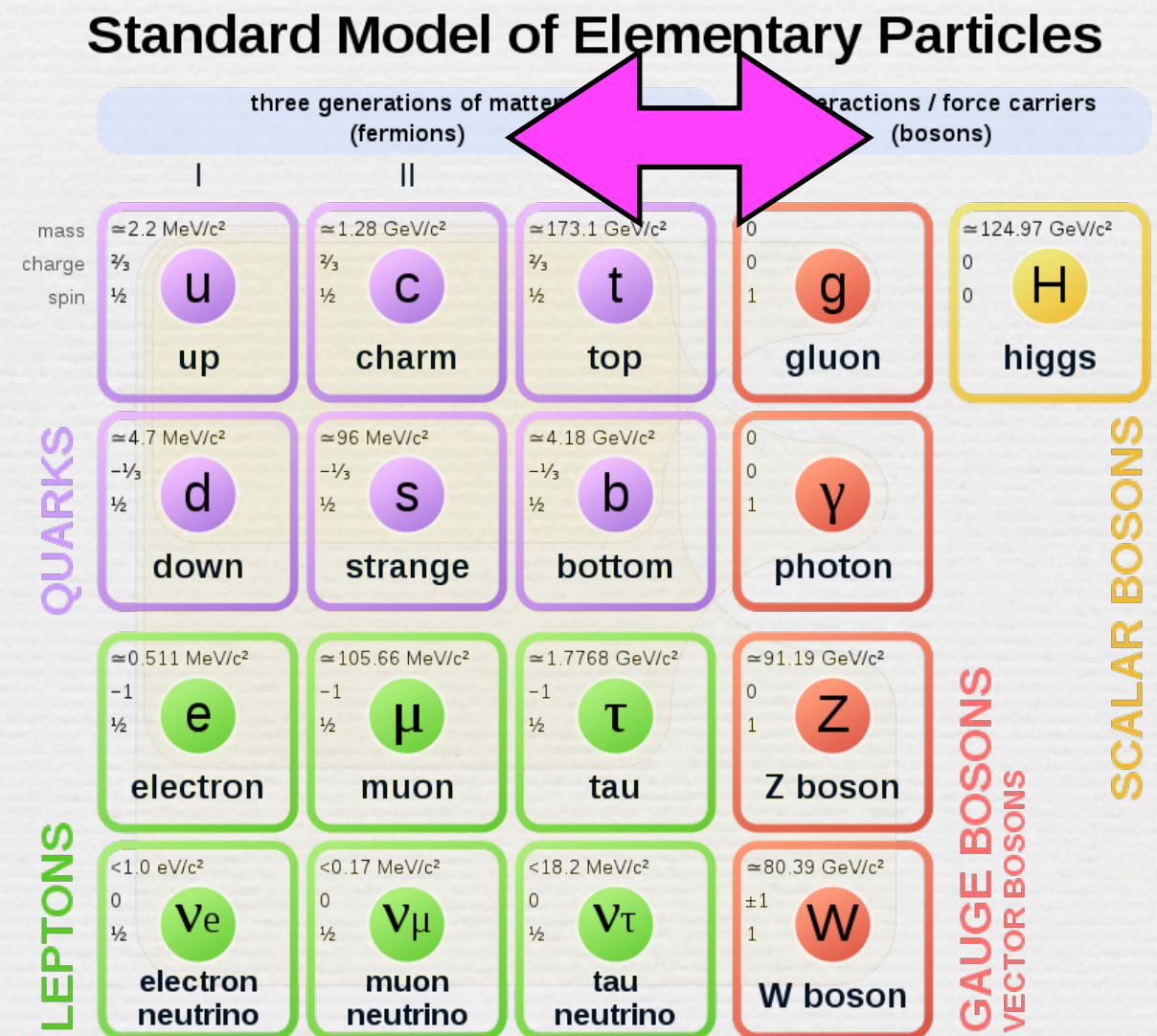
$$\Omega_{\text{DM},0} \approx 0.262$$

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)						interactions / force carriers (bosons)	
I		II		III			
mass charge spin	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	0 0 1	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ 0 0	g gluon	H higgs
up		charm		top			
down		strange		bottom			
electron		muon		tau			
electron neutrino		muon neutrino		tau neutrino			
photon		Z boson		W boson			

7.5 A Natureza da Matéria Escura

- Axions
- Buracos negros primordiais
- Neutrinos massivos
- **Partículas supersimétricas massivas** (fotinos, gravitinos, axinos, sneutrinos, gluinos, etc...)



- Axions
 - Buracos negros primordiais
 - Neutrinos massivos
 - Partículas supersimétricas massivas
 - WIMPs (weakly interacting massive particles): interagem via gravitação e força nuclear fraca, interagindo raramente com núcleos atômicos; são bem mais massivos do que os neutrinos.
- etc....

- lista de experimentos atuais para detectar a matéria escura:

https://en.wikipedia.org/wiki/Category:Experiments_for_dark_matter_search

- Densidade comóvel de SMBH:

<https://academic.oup.com/mnras/article/359/4/1363/1007699>

- Review e status atual da supersimetria:

<https://arxiv.org/abs/1712.05926> (TASI lectures)
https://en.wikipedia.org/wiki/Supersymmetry#Current_status

Fundamentos de Cosmologia

Aula 7

Concluída

AST-413-4 - INPE - 2020-3

Prof. Dr. Carlos Alexandre Wuensche

Prof. Dra. Christine Córdula Dantas