



Matéria Escura (Aula 1) - Parte 1

Prof. Farinaldo Queiroz

Julia Carvalho Leite

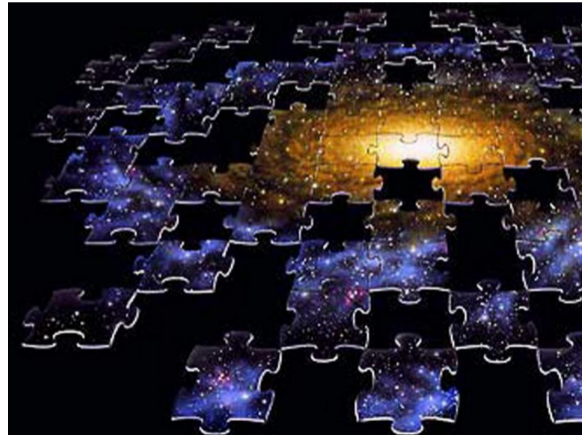
Tópicos

- Universo como quebra-cabeça
- Primeira Evidência "Teórica":
 - Aglomerados de Galáxias - Zwick
- Evidência Experimental:
 - Curvas de Rotação de Galáxias - Rubin
 - Curvas de Rotação de Galáxias e Simulação

Universo como quebra-cabeça

Sabemos que o universo é dominado por **Matéria Escura (27%)** e **Energia Escura (68%)**. Contudo, para chegarmos a esta conclusão foi necessário juntar as peças do "puzzle":

- Aglomerado de Galáxias **PLANNED**
- Curvas de Rotação de Galáxias **PLANNED**
- Radiação Cósmica de Fundo
- Nucleossíntese Primordial
- Formação de Estruturas
- Oscilações Acústicas
- Lentes Gravitacionais
- Colisões entre Aglomerados
- **Escalas e épocas diferentes!**



Primeira Evidência "Teórica": Aglomerados de Galáxias - Zwick

- Interesse por lentes gravitacionais;
- 1933 : "Desvio para o vermelho de galáxias extragaláticas¹" (prova matemática)
 - Teorema do Virial: se há um estado ligado, posso relacionar energia cinética e potencial das partículas.

Sistema de N galáxias em estado ligado devido a gravidade $\psi = \sum_i^N r_i p_i \Rightarrow \left\langle \frac{d\psi}{dt} \right\rangle = 0$

Então, $\frac{d\psi}{dt} = \frac{dr}{dt} \cdot p + r \frac{dp}{dt} =$

$$\langle K \rangle = -\frac{1}{2} \langle U \rangle$$

¹<https://ned.ipac.caltech.edu/level5/March17/Zwicky/frames.html>

Aglomerados de Galáxias - Zwicky

Considerando que a massa m é a mesma para cada uma das galáxias, podemos generalizar:

$$K = N \frac{mv^2}{2}$$

$$U = \frac{N^2}{2} G \frac{mm}{r} \rightarrow \langle K \rangle = -\frac{1}{2} \langle U \rangle$$

Note que concluímos: $Nm = M_{\text{tot}} = \frac{2r \langle v^2 \rangle}{G}$

– r caracteriza a distância angular e v pode ser medido pelo efeito Doppler $\frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e} \simeq v/c$

Conclusão (L é a luminosidade):

$$\frac{M_{\text{tot}}}{L_{\text{tot}}} = 400$$

$$\boxed{\frac{M_{\text{tot}}}{L_{\text{tot}}} = 400} \leftarrow \frac{M}{L} = \eta \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}$$

(Relação massa-luminosidade em rel. ao Sol com $\eta \simeq 500$ e $\frac{M_{\odot}}{L_{\odot}} = 5133 \text{ kg/W}$) **Dúvida!**

- $M/L < 1$ implica que temos um sistema composto de estrelas na sequência principal.
- $M/L > 1$ implica em um sistema com massa faltante/escondida.

Ex.: Órbita anômala Urano e descoberta de Netuno (1846)

Conclusões pela suposição de negação:

- Analisou a possibilidade do teorema do virial não estar correto.

Porém, v inferida devido ao efeito Doppler é muito maior que a velocidade de escape!

$$(F_c = F_g)$$

Portanto, não deveria haver um estado ligado, o que é diferente do observado!

- Se não existisse uma massa faltante as galáxias deveriam escapar o potencial gravitacional e não mais constituir o aglomerado.

“Matéria escura existe com uma densidade muito superior a luminosa.”

Evidência Experimental: Curvas de Rotação de Galáxias - Rubin

Estudou Galáxias Espirais com auxílio do método desenvolvido pelo pós-doc Ford. Analisando pela velocidade de escape em um estado ligado $F_c = F_g$ (Teorema das cascas esféricas):

Para $r < \mathbf{R}$:

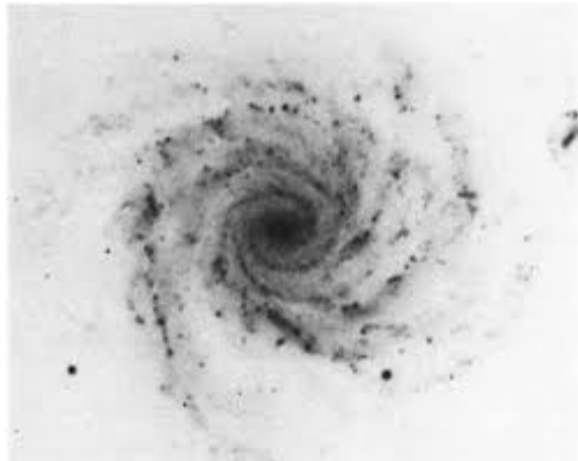
$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}$$

onde $M = \rho V = \rho \left(\frac{4\pi}{3} r^3 \right) \Rightarrow v \propto r$

Para $r > \mathbf{R}$:

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GMm}{r^2} \Rightarrow v^2 = \frac{GM}{r}$$

então, $v \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$



No caso do Sistema Solar:

Para $r < \mathbf{R}$:

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}$$

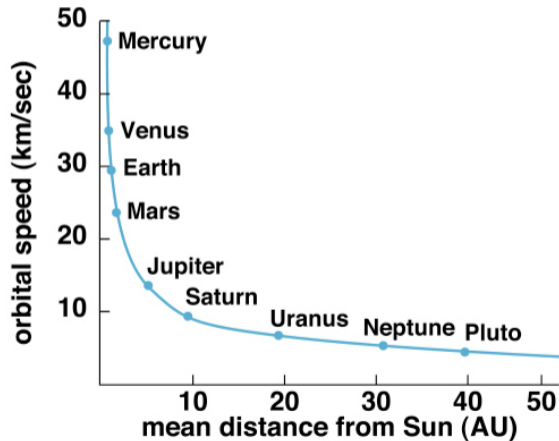
onde $M = \rho V = \rho \left(\frac{4\pi}{3} r^3 \right) \Rightarrow v \propto r$

Para $r > \mathbf{R}$:

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GMm}{r^2} \Rightarrow v^2 = \frac{GM}{r}$$

então, $v \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$

Massa faltante é desprezível!



(b)

Curvas de Rotação de Galáxias - Rubin

No caso de Galáxias Esferoidais:

Para $r < R$:

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}$$

onde $M = \rho V = \rho \left(\frac{4\pi}{3} r^3 \right) \Rightarrow v \propto r$

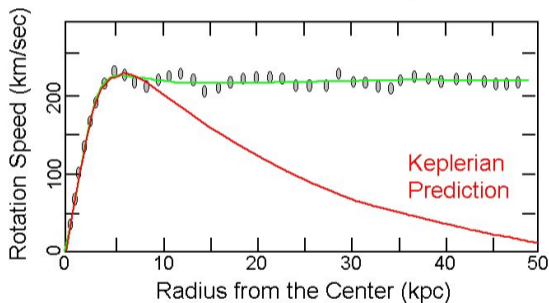
Para $r > R$:

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GMm}{r^2} \Rightarrow v^2 = \frac{GM}{r}$$

então, $v \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$

Os dados descrevem $v \propto r$!

Observed vs. Predicted Keplerian



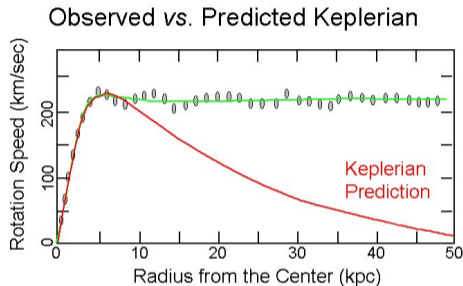
Curvas de Rotação de Galáxias - Rubin

No caso de Galáxias Esferoidais:

Note que no caso $r > R$ não temos $v \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}$$
$$v^2 = \frac{GM}{r}$$

Massa deve ser $M(r) \Rightarrow v$ entra em $r < R$!



Há massa não visível a medida que nos distanciamos mais do centro da Galáxia!

Discussão: "The effect of dark matter is to increase the rotation speed of the outer regions of local galaxies."

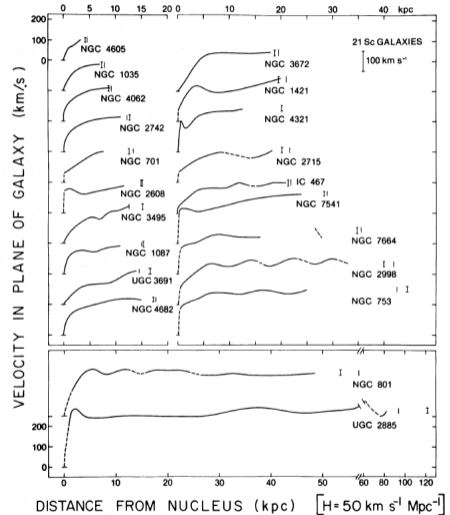
Voltando ao método de Rubin para Galáxias Espirais: Análise de 21 Galáxias Espirais.

Em casos não esferoidais, o mesmo se aplica!
(Aproximação densidade uniforme no eixo)

$$r > R \Rightarrow v \propto cte \Rightarrow M \propto r$$

$$M = 4\pi \int dr r^2 \rho(r), \text{ então, } \rho(r) \propto \frac{1}{r^2}$$

Ou seja, há matéria não visível.



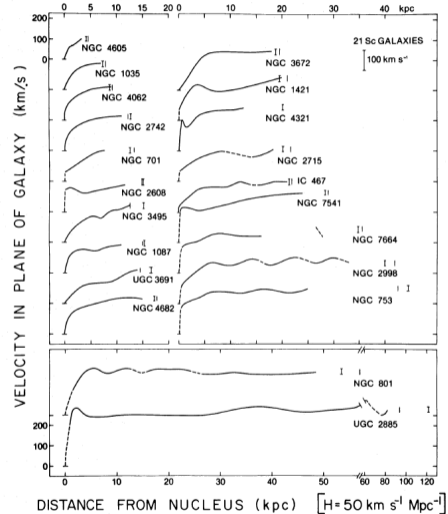
Voltando ao método de Rubin para Galáxias

Espirais: Análise de 21 Galáxias Espirais.

Comentário 1 Caso de excessão e medição acurada do telescópio Gaia.

Comentário 2 Velocidades são baixas, logo o caso Relativístico converge para o Newtoniano.

Comentário 3 MOND (Modified Newtonian Dynamics)



Curvas de Rotação de Galáxias e Simulação

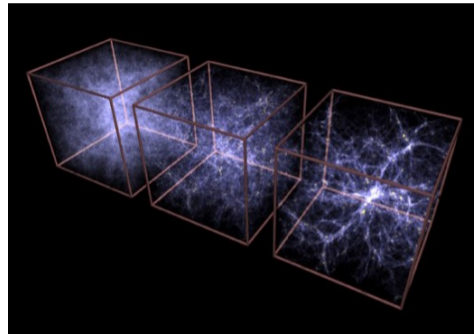
E se eu simulasse a evolução da "dinâmica" de densidade de massa do Universo supondo uma anisotropia inicial (CMB)?

Se somente houver a atuação da força da Gravidade, após um período igual a idade do Universo, temos:

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{\frac{r}{r_s} \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2}$$

(Eq. curva de rotação de galáxias!) **Dúvida:** O que é r_s ?

Note: $r \sim r_s \Rightarrow \rho \propto \frac{1}{r^2}$ e se $r \ll r_s \Rightarrow \rho \propto \frac{1}{r}$



Isso só ocorrerá se essa matéria dominante for do tipo Matéria Escura!