Materia oscura en galaxias espirales.

Implicaciones para la gravitación.

Carlos Rodrigo Blanco[1],
Director: Miguel Cerviño Saavedra[2],
Tutor: David Montes[3]

[1]Centro de Astrobiología, CSIC-INTA
[2]Instituto de Astrofísica de Andalucía
[3]Universidad Complutense de Madrid

Jornadas de doctorandos UCM
Marzo 2018

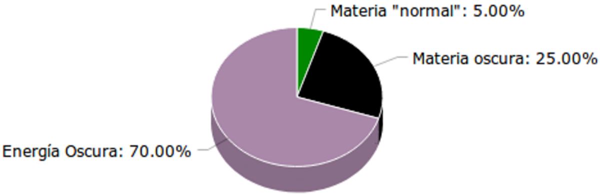
La materia oscura

- Hay numerosas evidencias concluyentes de que la dinámica observada en el universo no puede explicarse sólo por los campos gravitatorios generados por la materia visible

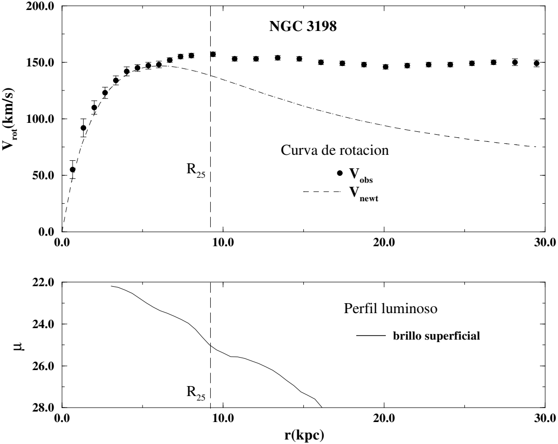
  $\Longrightarrow$ "materia oscura".

- Mayor cuanto mayor es la escala
  Galaxias $<<$ Cúmulos $<<$ escalas cosmológicas

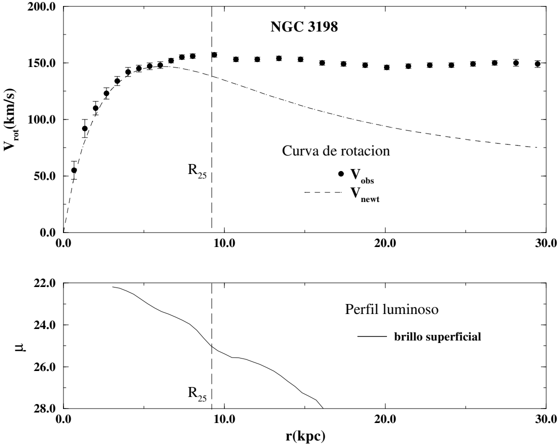
- Masa bariónica $<<$ Masa no bariónica $<<$ Energía oscura



Materia oscura en galaxias espirales



Materia oscura en galaxias espirales



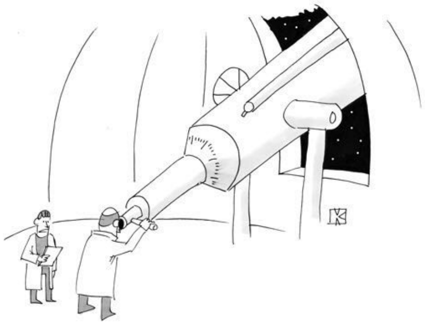
$$\frac{V_{rot}^2(R)}{R} = \frac{GM(R)}{R^2}$$

$$\xrightarrow[R>R_{25}]{} V_{rot}^2 \sim \frac{1}{R}$$

$$\rho(r) \sim \rho_0 e^{-\alpha r}$$

¿Alternativas a la materia oscura?

- La naturaleza de la materia oscura sigue siendo desconocida.
- Alternativas fenomenológicas
  - $F_{grav} \neq 1/r^2$
  - MOND: $F \neq ma$
- Relativistas
- ...



"That isn't dark matter, sir—you just forgot to take off the lens cap."

Nuestra pregunta:

¿Es posible encontrar una ley fenomenológica del tipo de la de Newton, diferente de ésta para distancias grandes, que pueda explicar la dinámica observada en galaxias espirales sin suponer la presencia de una componente oscura no detectada, y cuyo límite para distancias pequeñas sea compatible con la ley newtoniana?

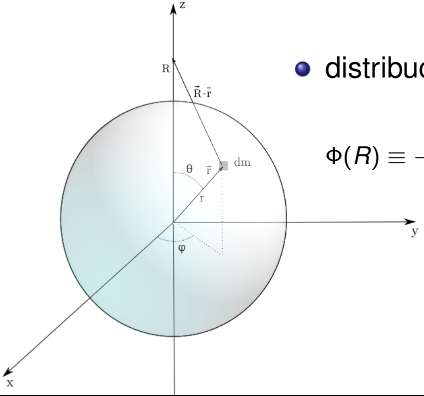
Planteamiento: notación

- ley gravitatoria elemental

$$\phi(r) \equiv -\frac{G_0 m}{r} g(r), \quad F(r) \equiv -\frac{G_0 m}{r^2} g_{\rm eff}(r)$$

$$\text{Newton} \Leftrightarrow g(r) = g_{\rm eff}(r) = 1$$

$$g_{\rm eff}(r) = g(r) - r\, g'(r)$$



- distribución macroscópica:

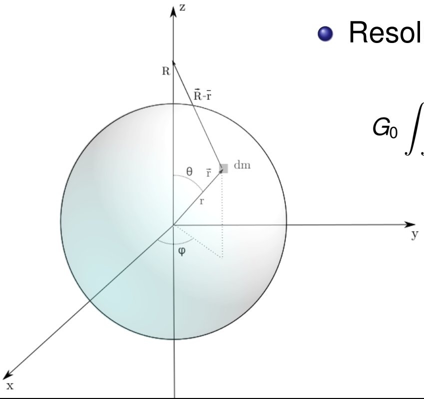
$$\Phi(R) \equiv -\frac{G_0 M_{\rm tot}}{R} \Psi(R), \quad F(R) \equiv -\frac{G_0 M_{\rm tot}}{R^2} \Psi_{\rm eff}(R)$$

$$\Psi_{\rm eff}(R) = \Psi(R) - R\, \Psi'(R)$$

$$\frac{V_{\rm rot}^2(R)}{R} = \frac{G_0 M_{\rm tot}}{R^2} \Psi_{\rm eff}(R)$$

Planteamiento: ecuación integral

- El objetivo NO es proponer una $g_{\mathrm{eff}}(r)$ y ver si funciona.
- Queremos obtenerla directamente a partir de la velocidad de rotación observada.



- Resolución de una ecuación integral:

$$G_0 \iiint_{\Omega} d^3\vec{r}\, \frac{g_{\mathrm{eff}}(|\vec{R}-\vec{r}|)}{|\vec{R}-\vec{r}|^2}\rho(r) \equiv \frac{G_0 M_{\mathrm{tot}}}{R^2}\,\Psi_{\mathrm{eff}}(R)$$

$$\frac{G_0 M_{\mathrm{tot}}}{R^2}\Psi_{\mathrm{eff}}(R) = \frac{V^2_{\mathrm{rot}}(R)}{R}$$

Solución: Simetría esférica

- Densidad exponencial.

$$\rho(r) = \rho_0 \, e^{-\alpha r}$$

- Ecuación:

$$\int_0^\infty dr \int_0^\pi d\theta \int_0^{2\pi} d\phi \frac{g_{\text{eff}}(\sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr\cos\theta})}{(R^2 + r^2 - 2Rr\cos\theta)^{\frac{3}{2}}} (R - r\cos\theta) r^2 \sin\theta e^{-\alpha r} = \frac{8\pi}{\alpha^3} \frac{\Psi_{\text{eff}}(R)}{R^2} .$$

- Solución (exacta)

$$\boxed{\begin{aligned} g_{\text{eff}}(x) \quad = \quad & \Psi_{\text{eff}}(x) - \frac{2}{\alpha^2}\Psi''_{\text{eff}}(x) + \frac{1}{\alpha^4}\Psi^{(iv)}_{\text{eff}}(x) + \frac{4}{\alpha^2 x}\Psi'_{\text{eff}}(x) - \\ & \frac{4}{\alpha^4 x^4}[2x\Psi'_{\text{eff}}(x) - 2x^2\Psi''_{\text{eff}}(x) + x^3\Psi'''_{\text{eff}}(x)] \end{aligned}}$$

Solución: Disco plano

- Densidad exponencial.

$$\rho(r) = \rho_0 \, \delta(z) \, e^{-\alpha r}$$

- Ecuación:

$$\int_0^\infty dr \int_0^{2\pi} d\theta \frac{g_{\mathrm{eff}}(\sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr\cos\theta})}{(R^2 + r^2 - 2Rr\cos\theta)^{\frac{3}{2}}} (R - r\cos\theta) r \, e^{-\alpha r} = \frac{2\pi}{\alpha^2} \frac{\Psi_{\mathrm{eff}}(R)}{R^2}$$

- Solución (aproximación gausiana)

$$\boxed{g_{\mathrm{eff}}(x) = \Psi_{\mathrm{eff}}(x) - \frac{1}{\alpha^2} \Psi''_{\mathrm{eff}}(x) + \frac{2}{\alpha^2 x} \Psi'_{\mathrm{eff}}(x)}$$

- donde $\frac{G_0 M_{\mathrm{tot}}}{R} \Psi_{\mathrm{eff}}(R) = V^2_{\mathrm{rot}}(R)$

Aplicación a galaxias reales.

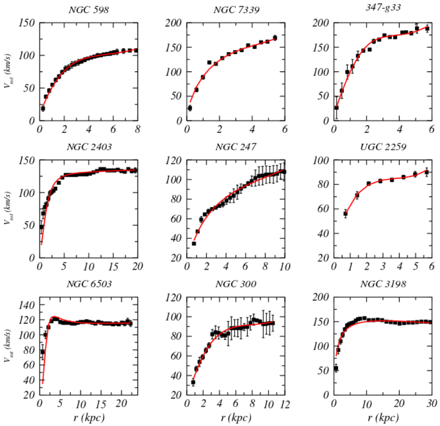
Muestra de galaxias con:

- Curvas de rotación suficientemente extensas.
- Distribución de masa compatible con disco plano exponencial.

Galaxia	Distancia (Mpc)	Escala exponencial $1/\alpha$ (kpc)	Luminosidad $10^{10} L_\odot$	Curva de rotación
NGC 2403	3.2 [a]	2.1 [a]	0.8 [a]	a
NGC 3198	9.4 [a]	2.4 [e]	0.9 [a]	a
NGC 0598	0.9 [g]	1.89[h]	0.36 [h]	h
NGC 6503	5.9 [a]	1.72[a]	0.48 [a]	a
NGC 0247	2.5 [b]	2.9 [b]	0.24 [b]	d
NGC 0300	1.9 [b]	2.0 [b]	0.24 [b]	i
347-g33	20.9[f]	1.46[h]	1.675 [h]	h
UGC 2259	9.8 [c]	1.34[e]	0.1 [c]	d
NGC 7339	20.6[h]	1.9 [h]	1.159 [h]	h

Referencias a los datos originales: (a) Begeman 1988; (b) Carignan 1985; (c) Carignan et al. 1988; (d) Carignan & Puche 1990; (e) Kent 1987; (f) Mathewson et al. 1992; (g) Metcalfe & Sanks 1991; (h) Persic & Salucci 1995, Persic et al. 1995; (i) Puche et al. 1990.

Aplicación a galaxias reales.

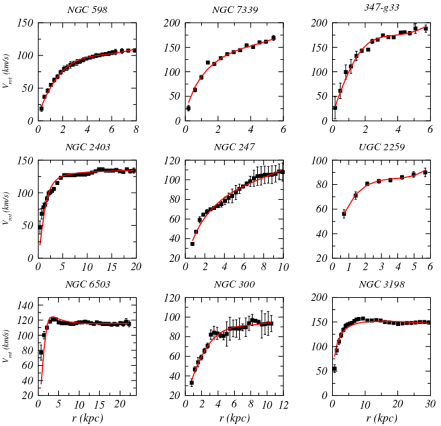


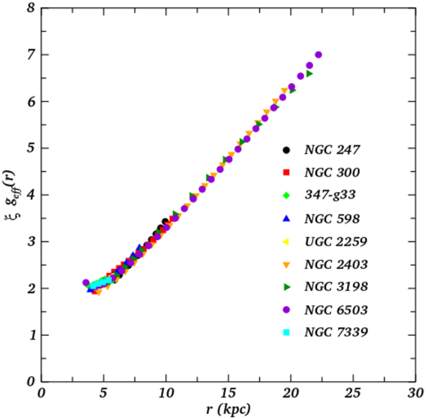
$$\frac{G_0 M_{\mathrm{i}}}{R}\Psi_{\mathrm{eff,i}}(R) = V^2_{\mathrm{rot,i}}(R)$$

$$\Downarrow$$

$$g_{\mathrm{eff,i}}(x) = \Psi_{\mathrm{eff,i}}(x) - \frac{1}{\alpha^2}\Psi''_{\mathrm{eff,i}}(x) + \frac{2}{\alpha^2 x}\Psi'_{\mathrm{eff,i}}(x)$$

Aplicación a galaxias reales.





donde: $\xi \equiv \dfrac{M_{6503}}{10^{10}\ M_{\odot}}$

Resumen + Trabajo futuro

- **Solución a la ecuación integral** que relaciona la fuerza gravitatoria elemental con la macroscópica en dos casos:
  - Esfera con densidad exponencial (solución exacta)
  - Disco plano con densidad exponencial (aprox. gausiana).
- Aplicación a las curvas de rotación observadas de 9 galaxias espirales:
  $\Rightarrow$ **fuerza gravitatoria no Newtoniana compatible para todas ellas.**
- Plan futuro:
  - Aplicar el método a una muestra más amplia de galaxias.
  - Catálogo VO de galaxias con curva de rotación, distancia, perfil luminoso, etc.