

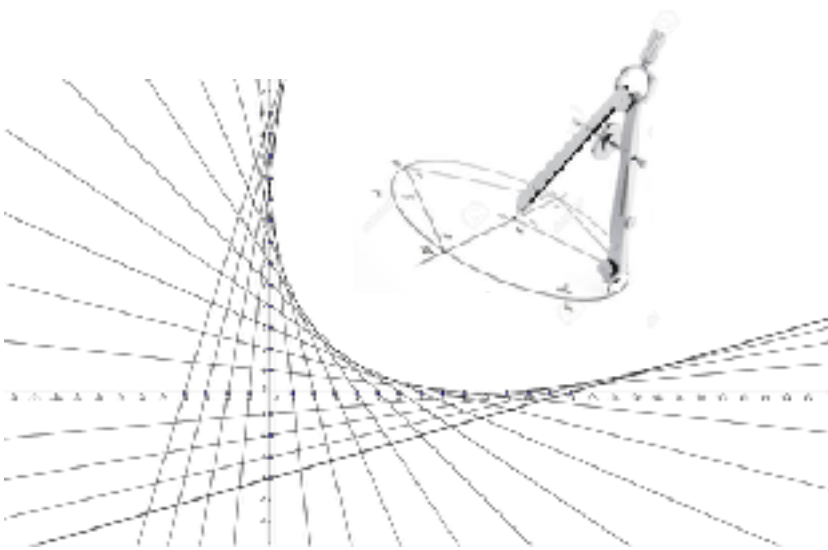
Gravedad Modificada



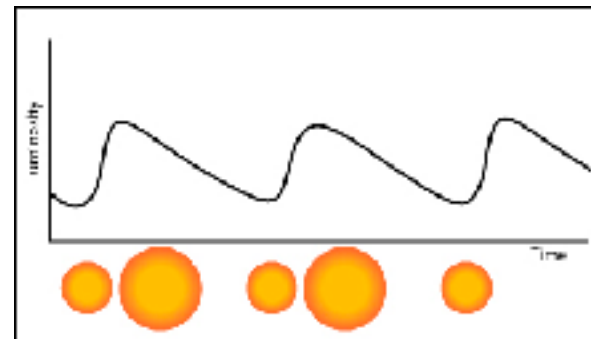
Inverno Astrofísico 2021

Domingos Martins

Geometria (Cefeidas) $\Rightarrow$ Cefeidas - SNe Ia $\Rightarrow$ SNe Ia



anchors
D~kpc or Mpc



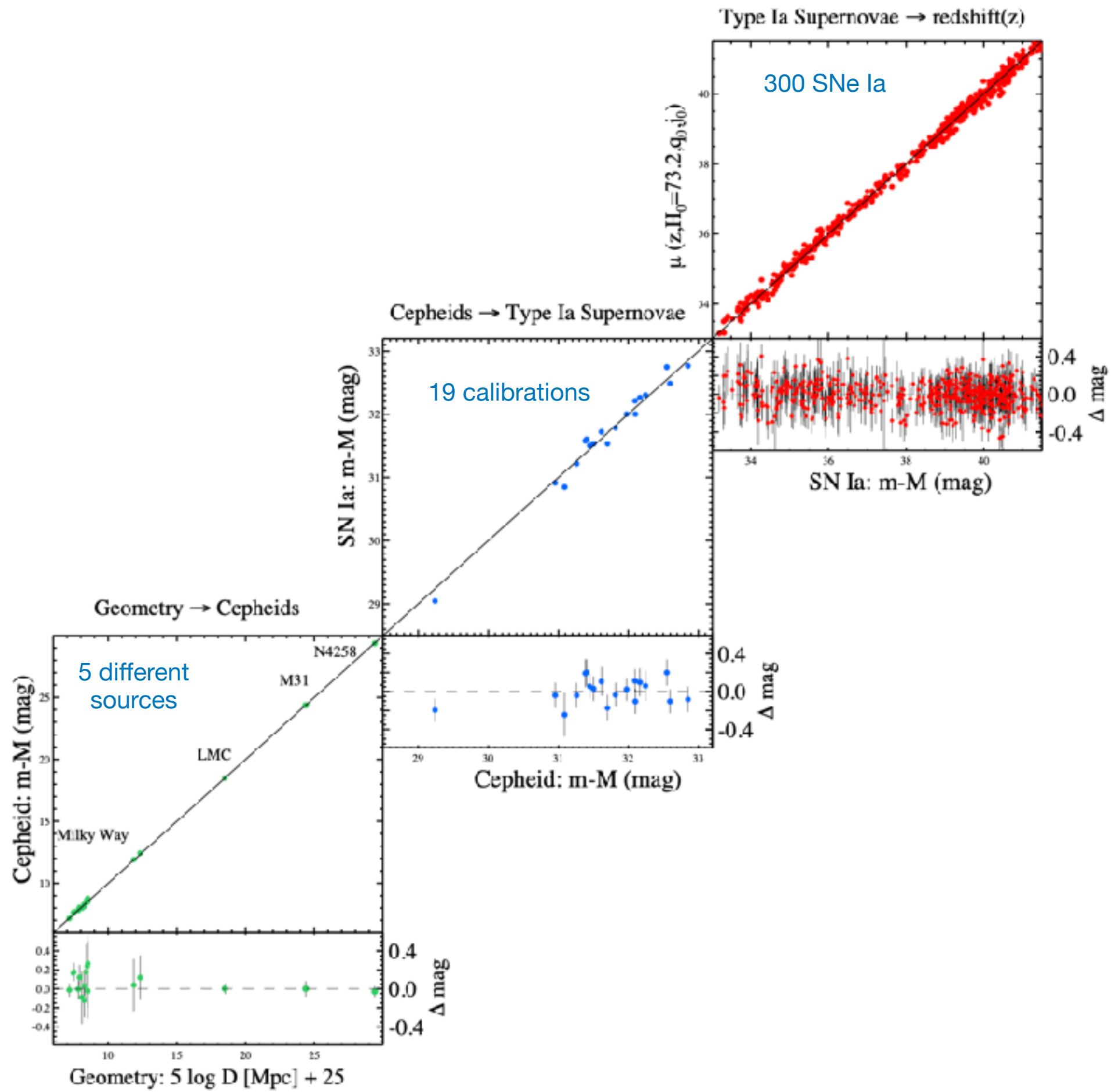
Cross-calibrate
D~10 - 40 Mpc

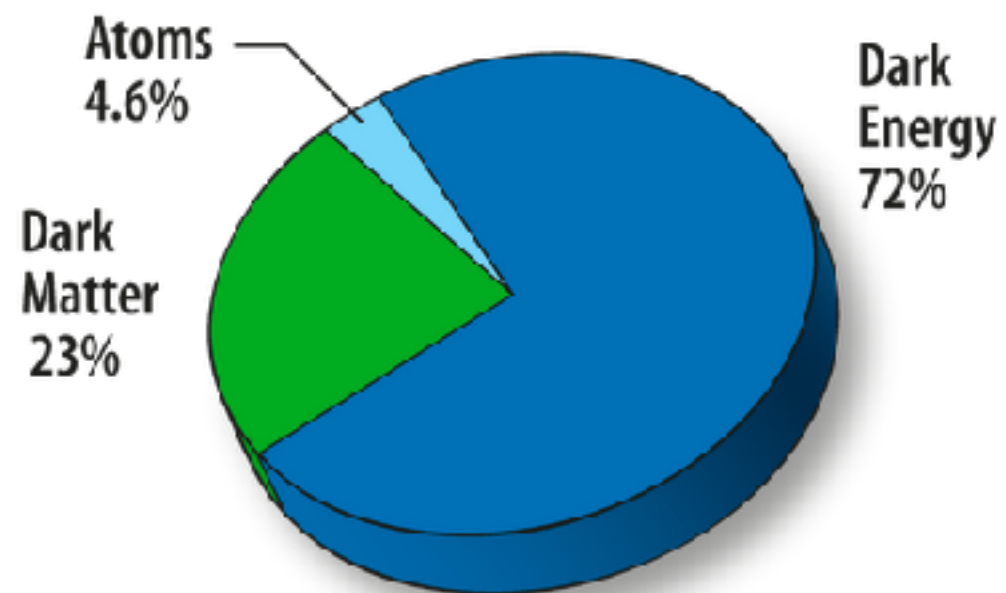
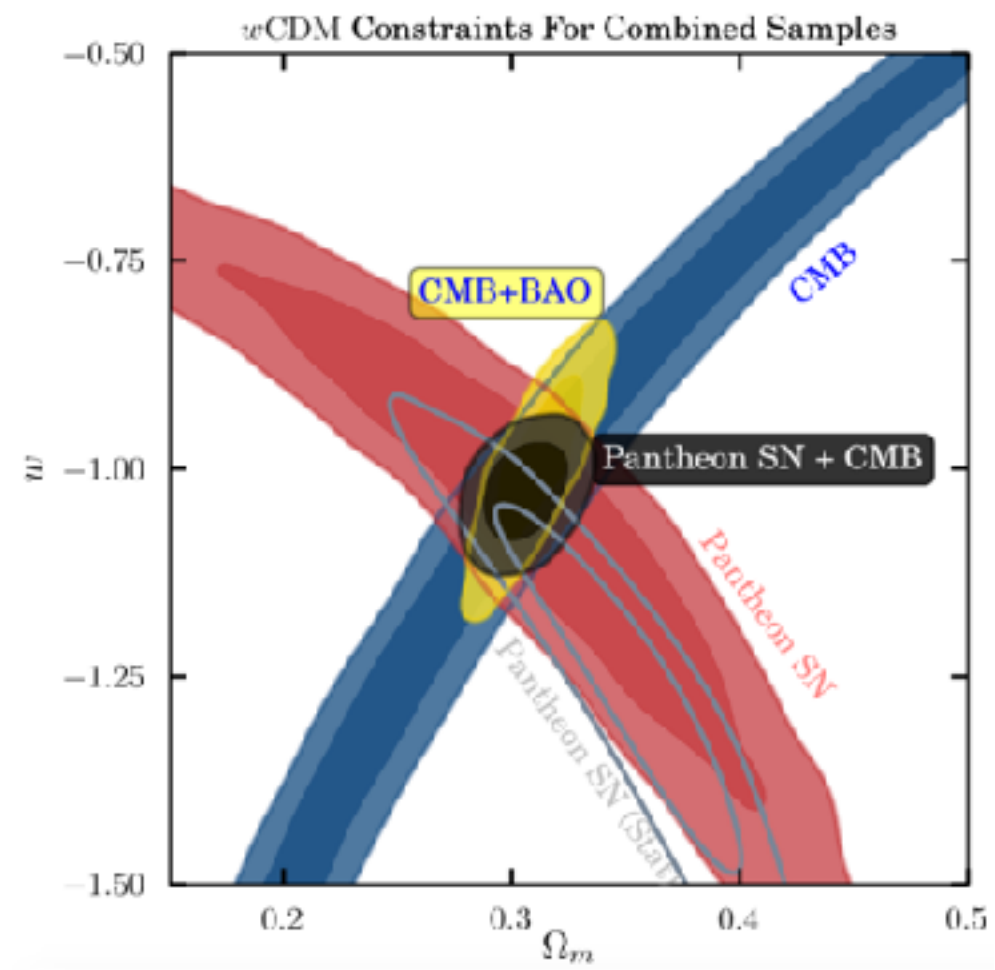
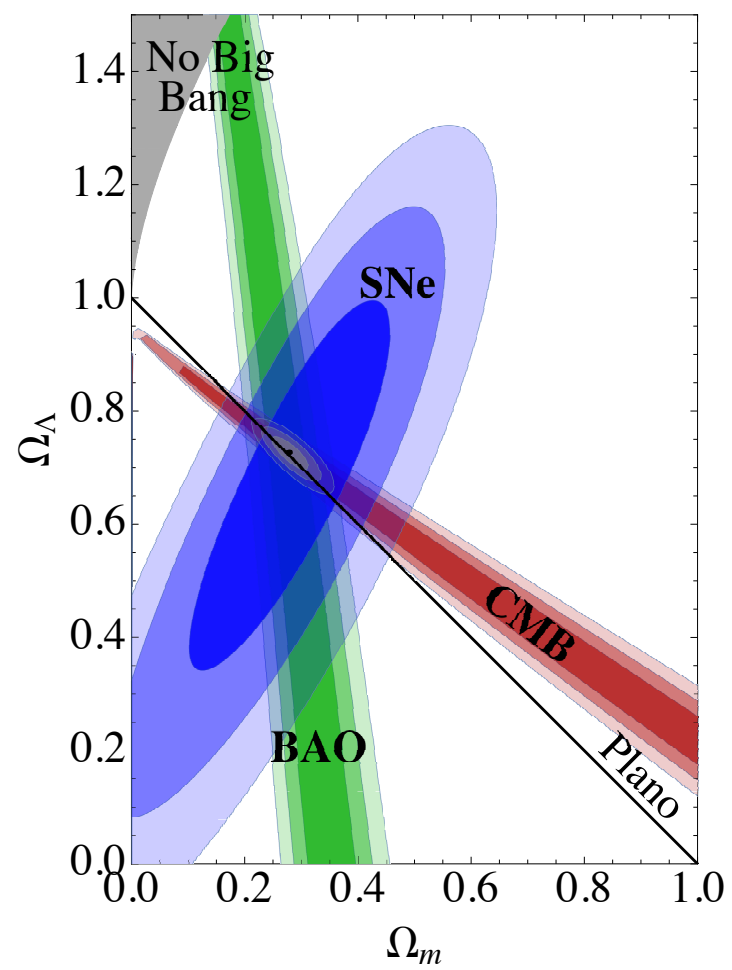


+
redshift

Hubble flow
D~Gpc (z~0.023-0.15)

Medición directa





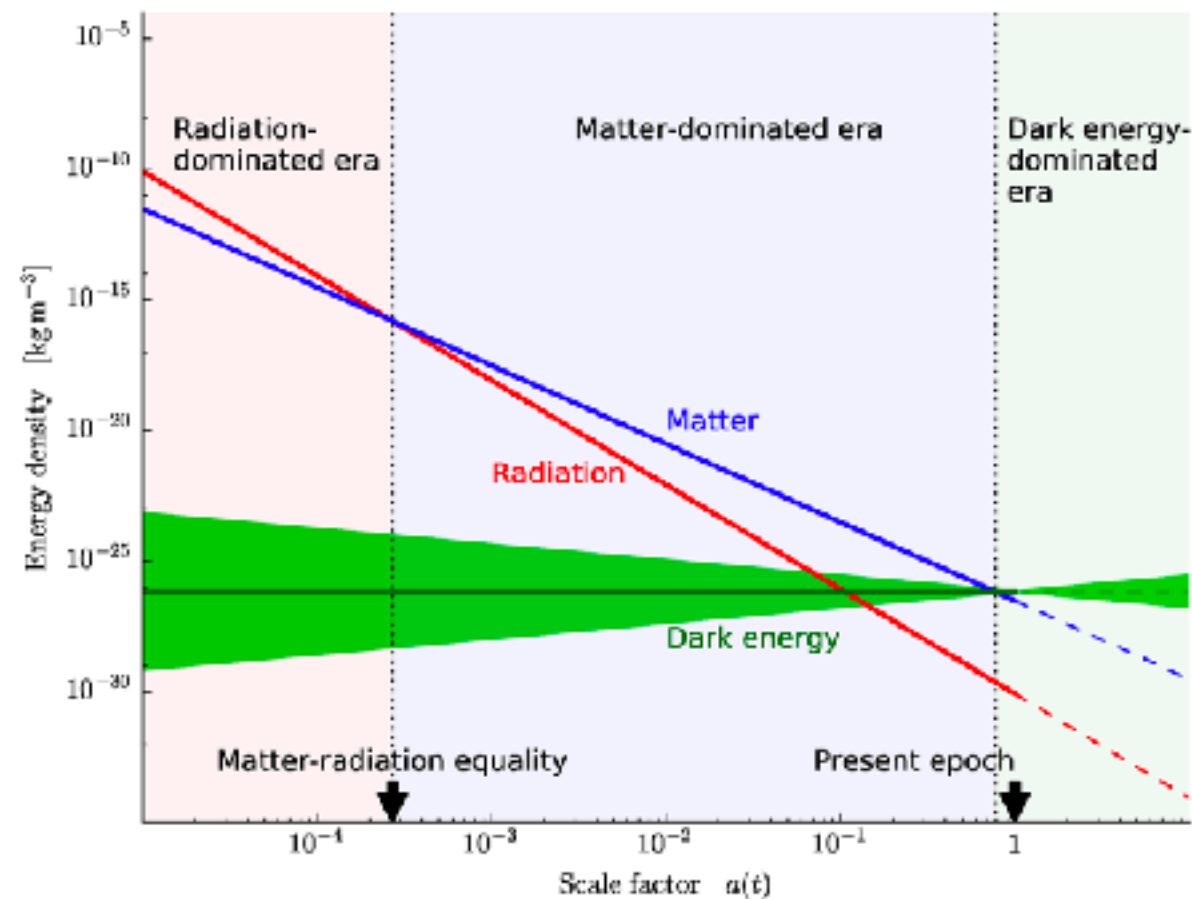
Problema de la constante cosmológica

1- Ajuste fino

$$\Lambda = (2.10^8 + 10^{-47}) \text{ GeV}^4$$

Es un problema difícil..... degravitación?

2- Coincidencia



Es un problema más simple
atractor

A- Podemos resolver el problema de la constante cosmológica y la expansión acelerada del universo

B- La constante cosmológica es nula, no sabemos todavía porque. Tenemos que explicar la aceleración del universo sin constante cosmológica.

Son los modelos de energía oscura

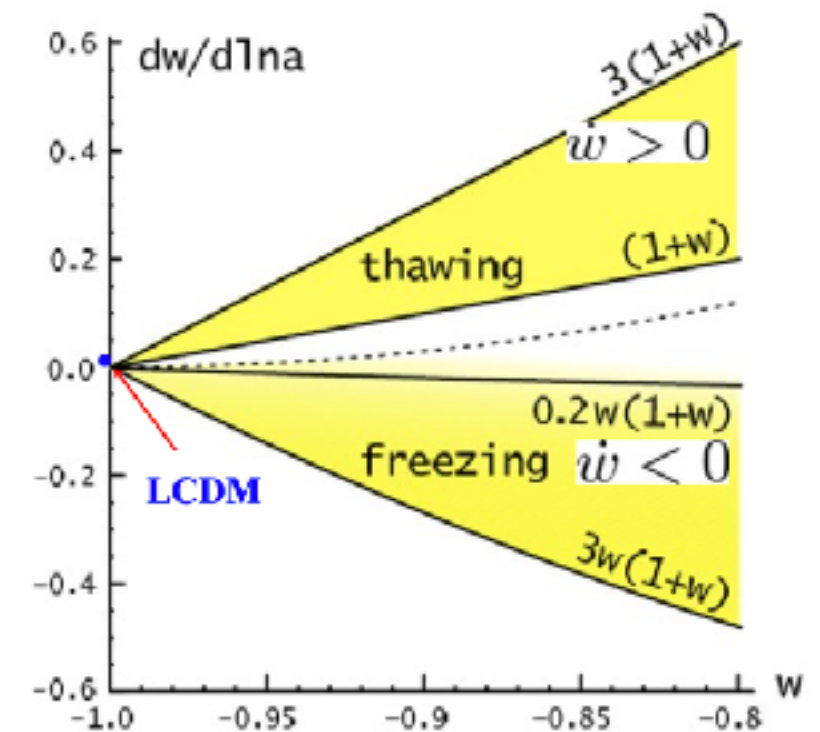
Energía oscura (quintaesencia, gas de Chaplygin...)

Ejemplo:

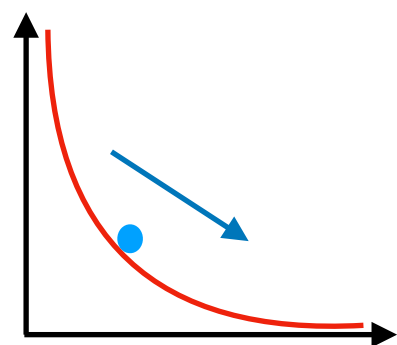
$$P = w\rho$$

$$S = \int \sqrt{-g} \left[R - \frac{1}{2} (\partial_\mu \phi)^2 - V(\phi) \right]$$

$$w \equiv \frac{P}{\rho} = \frac{\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V}{\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V}$$



Freezing models

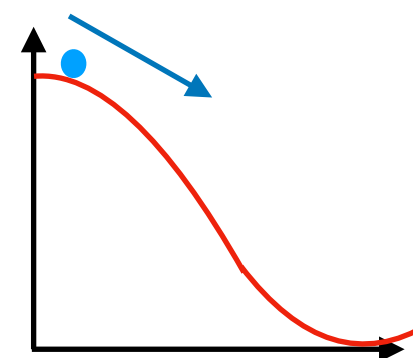


$$V(\phi) = M^{4+n} \phi^{-n}$$

w decrece hacia -1

$$\dot{w} < 0$$

Thawing models



$$V(\phi) = M^4 (1 + \cos \phi)$$

w crece desde -1

$$\dot{w} > 0$$

Usualmente introducen de manera no natural una pequeña escala

La relatividad general es directamente verificada a pequeñas escalas: sistema solar, estrellas....
pero no a grandes escalas

Debemos modificar la relatividad general a grandes escalas

Para explicar la aceleración del Universo

Debemos recubrir la relatividad general a pequeñas escalas
se necesita un mecanismo Vainshtein, camaleón, symmetron....

Ejemplo de mala teoría: Brans-Dicke

$$S = \int \sqrt{-g} \left[\phi R - \frac{\omega}{\phi} (\partial_\mu \phi)^2 \right]$$

Explica la aceleración del Universo

Pero las condiciones en el sistema solar ponen como restricción

$$\omega > 50000$$

Ajuste fino

Queremos una teoría que explica la aceleración del Universo

Queremos una teoría consistente con experimentos locales: laboratorio, sistema solar....

Queremos una teoría que no tiene patologías: el ghost de Ostrogradski....

No queremos tener ajuste fino

No es facil

$$S = \int \sqrt{-g} R \quad \Rightarrow \quad S = \int \sqrt{-g} f(R)$$

Queremos una teoría que explica la aceleración del Universo

Por ejemplo

$$S = \int \sqrt{-g} \left[R - \frac{\mu}{R} \right]$$

Queremos una teoría consistente con experimentos locales: laboratorio, sistema solar....

Es posible, gracias a un mecanismo que se llama mecanismo de Vainshtein

Queremos una teoría que no tiene patologías: el ghost de Ostrogradski....

No tiene este problema

No queremos tener ajuste fino

Es difícil, $\mu \simeq H_0$

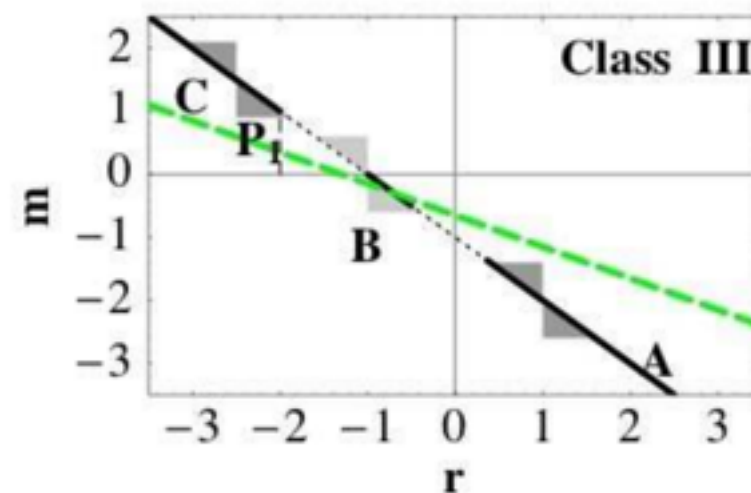
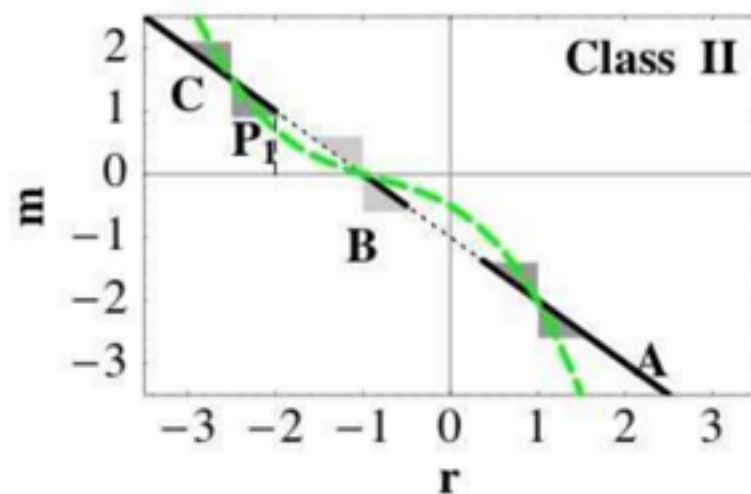
Buena cosmología, si

(arXiv: 0612180)

$$f''(R) \geq 0 \quad f'(R) > 0$$

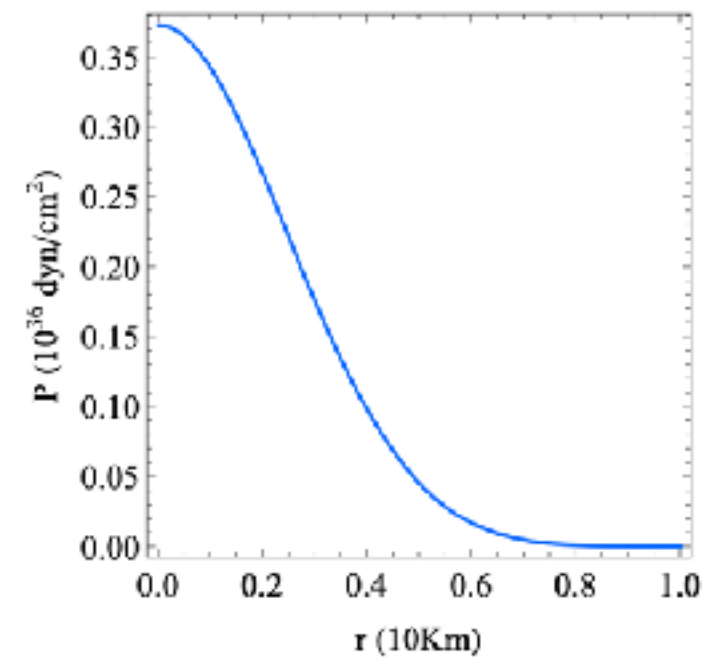
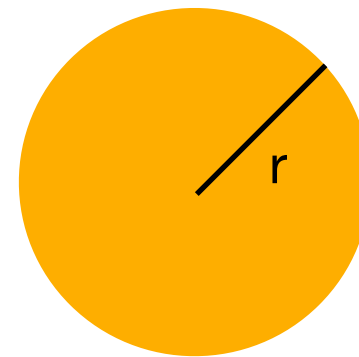
También si:

$$m = R \frac{f''(R)}{f'(R)} \quad r = -R \frac{f'(R)}{f(R)} \Rightarrow m(r)$$



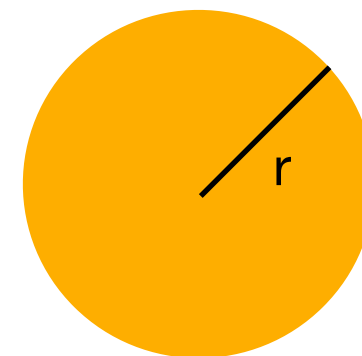
Problemas con objetos compactos (arXiv: 1309.3279)

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} R$$



$$S = \int d^4x \sqrt{-g} [R + \alpha R^2]$$

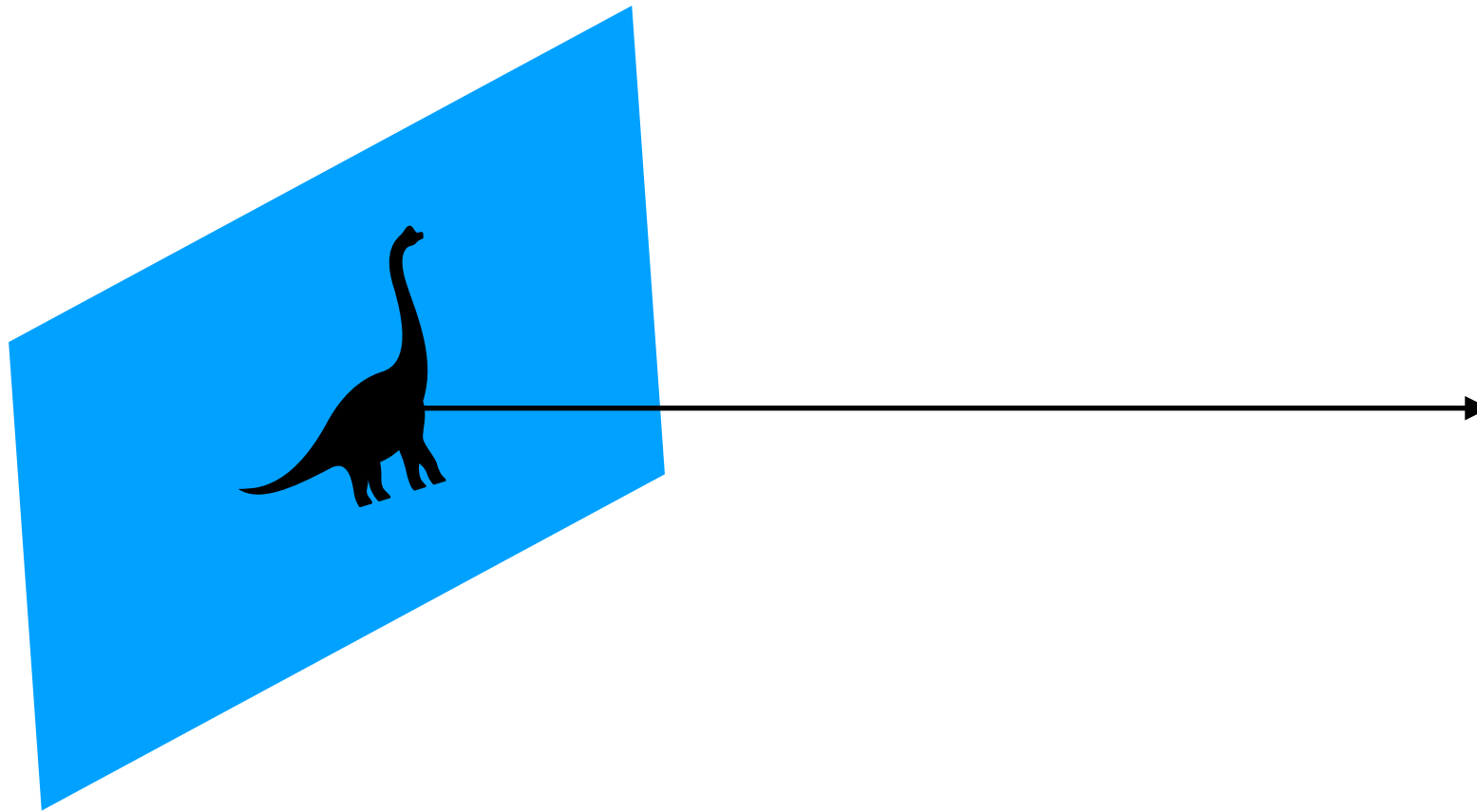
No hay soluciones, tampoco cuando $\alpha \rightarrow 0$



Schwarzschild

$$R = 0$$

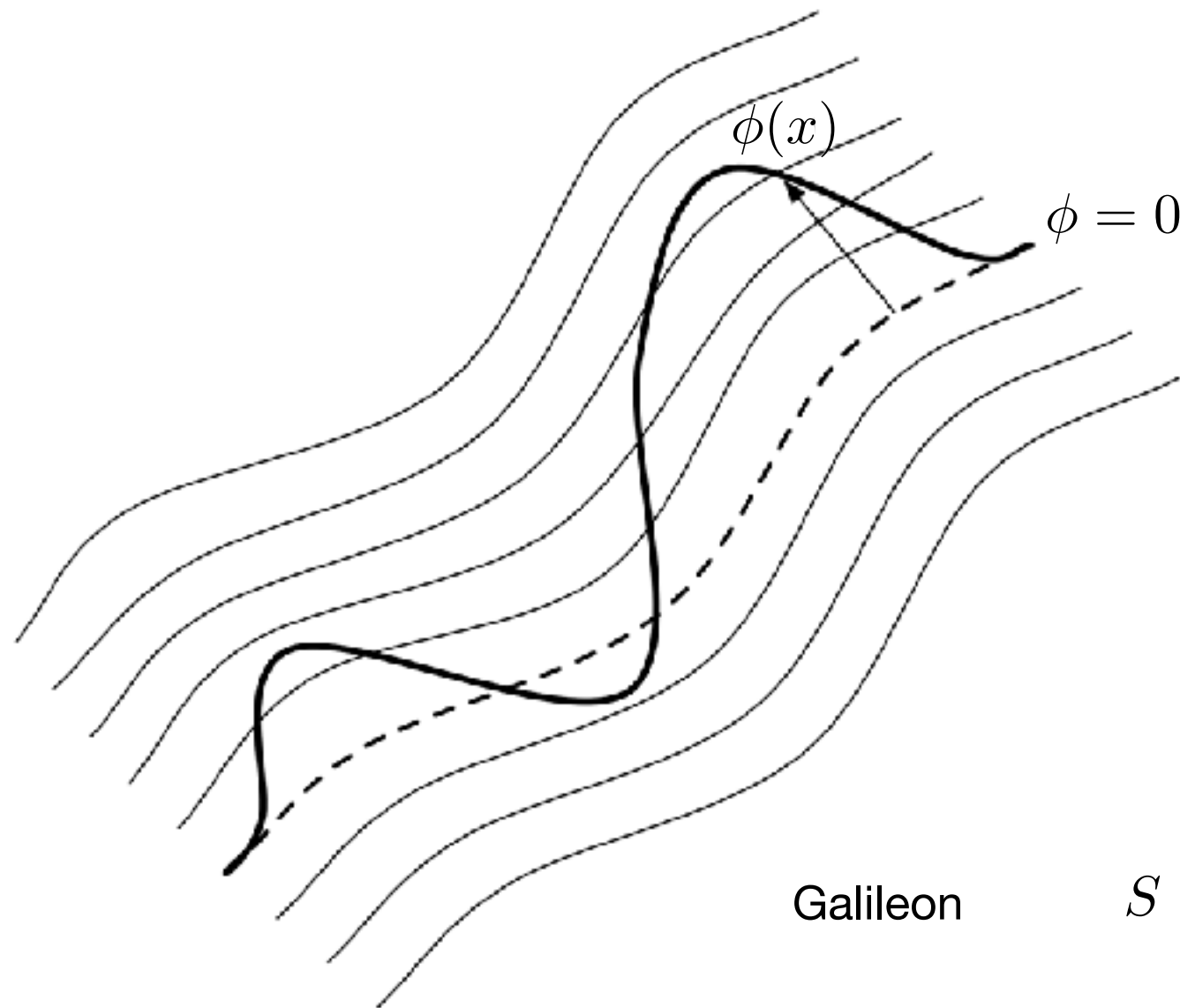
$$R' = 0$$



Ejemplo: DGP

$$S = \frac{1}{r_c} \int d^5x \sqrt{-g} \mathcal{R} + \int d^4x \sqrt{-h} R$$

$$H^2 - \frac{H}{r_c} = \frac{8\pi G}{3} \rho$$



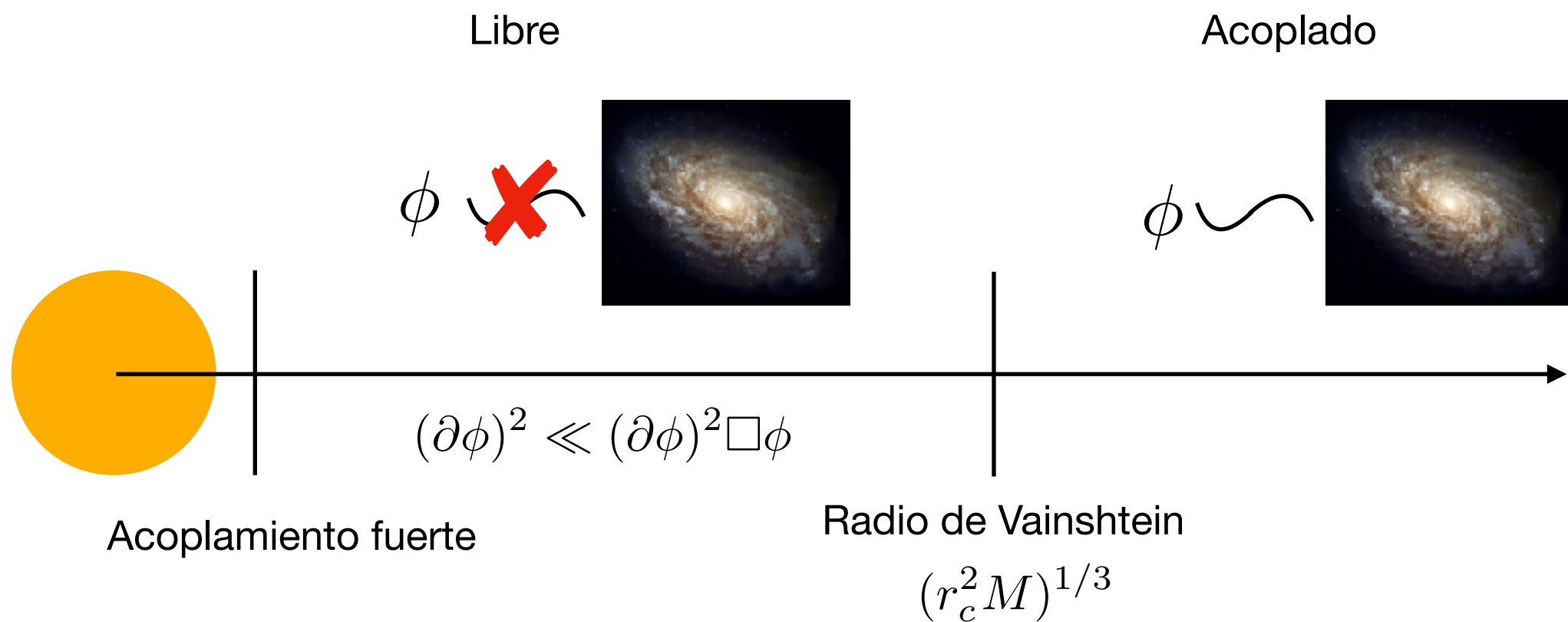
$$S = \frac{1}{r_c} \int d^5x \sqrt{-g} \mathcal{R} + \int d^4x \sqrt{-h} R$$

$$(\partial\phi)^2 \ll 1$$

$$S = \int d^4x \sqrt{-h} \left[R - (\partial\phi)^2 + \frac{1}{r_c} (\partial\phi)^2 \square\phi \right]$$

Mecanismo de Vainshtein

Galileon
$$S = \int d^4x \sqrt{-h} \left[R - (\partial\phi)^2 + \frac{1}{r_c} (\partial\phi)^2 \square\phi \right]$$



La mejor solución es resolver el problema de la constante cosmológica y explicar la aceleración del Universo

Una posible solución es la degravitación

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi G(\square)T_{\mu\nu}$$

←
Filtra una constante cosmológica

Unimodular, la constante aparece de nuevo

Gravedad masiva, pero no funciona bien

Extra dimensiones, buena motivación pero no resuelven el problema con D=5

La segunda solución es imaginar que la gravedad cuántica o otra teoría podrá resolver el problema de la constante cosmológica

$$\Rightarrow \Lambda = 0$$

$\Rightarrow$ Hay que explicar la aceleración del universo

Modelos de energía oscura, gravedad modificada

Hay que estudiar la cosmología, la evolución de fondo

$\Rightarrow$ Sistema dinámico SNIa, BAO...

Hay que estudiar las perturbaciones

$\Rightarrow$ CMB, formación de estructuras

Objetos compactos

Agujeros negros, estabilidad, modos QNM

Estrellas de neutrones, signature, existencia

Ondas gravitacionales



Obrigado