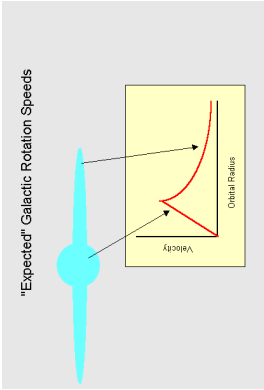


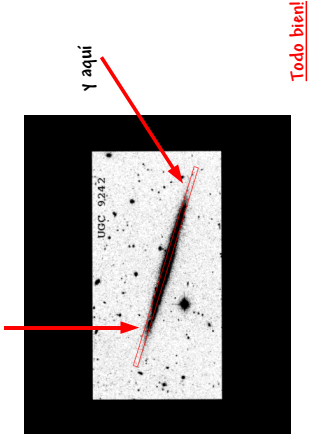
Curvas de rotación



Todo bien!

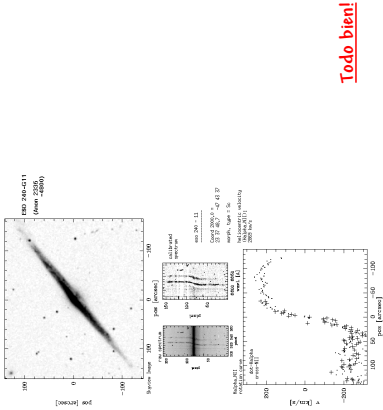
Curvas de rotación

Obtengo espectro aquí...



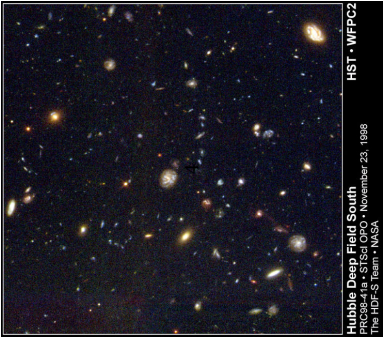
Todo bien!

Curvas de rotación



Todo bien!

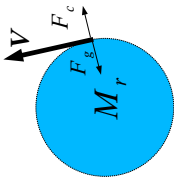
Materia oscura en galaxias:



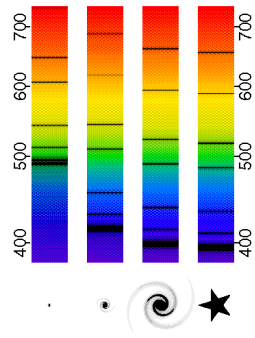
No se ve.
¿Cómo detectarla?
...
¡Gravitación!

Fuerza de gravedad: $F_g = \frac{G \times M_r \times m}{r^2}$

Fuerza centrípeta: $F_c = \frac{m \times V^2}{r}$



Efecto Doppler



$(\lambda_{obs} - \lambda_{lab}) / \lambda_{lab} = v / c$
permite determinar v midiendo λ_{obs}

Materia oscura en galaxias:

Los movimientos internos de las galaxias (rotación en el caso de espirales) deben estar regidos por la fuerza de gravedad.

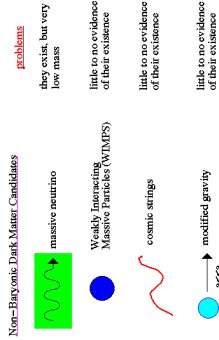
$$F = \frac{G \times M \times m}{r^2}$$

Galaxias más brillantes $\Rightarrow$ galaxias más masivas... ?

¡No!

Materia oscura

Pero los bariones son ~4% de toda la materia...



¿Neutrinos masivos?

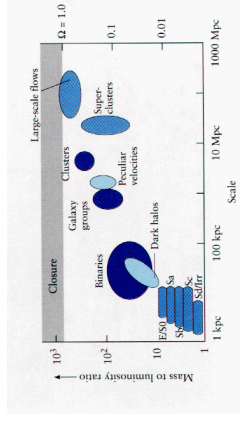
- Son tan numerosos que saber si su masa es distinta de cero tiene consecuencias para cosmología
- Reacción típica: neutrón $\rightarrow$ proton + electron + anti-neutrino
- Sección eficaz $\sim 10^{-21}$ veces aquella del scattering de Thompson (electrones)
- Interactúan muy poco con la materia, MUY difíciles de detectar.
- <http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm> (Ned Wright)

¿MOND?

- Modified Newtonian Dynamics. Milgrom (1983)
- Modifica la aceleración “g”
- $g(\text{Newton}) = GM/r^2$
- $g(\text{MOND}) = \sqrt{g \cdot a_0}$ **cuando** $g(\text{Newton}) < a_0$
- Curvas de rotación: $V = \text{cte a grandes distancias}$
- $a_0 = 1.2 \times 10^{-10} \text{ m s}^{-2}$!!!!

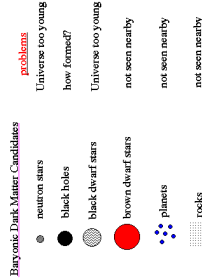
Materia oscura

$$M/L > 1!$$



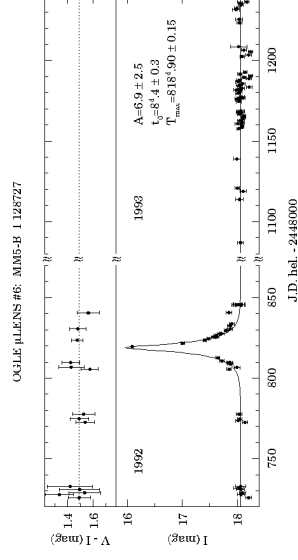
Materia oscura

Pero los bariones son ~4% de toda la materia...

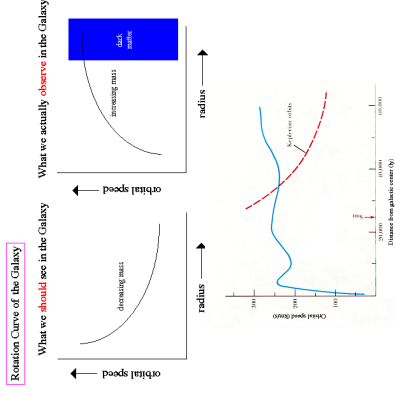


Materia oscura

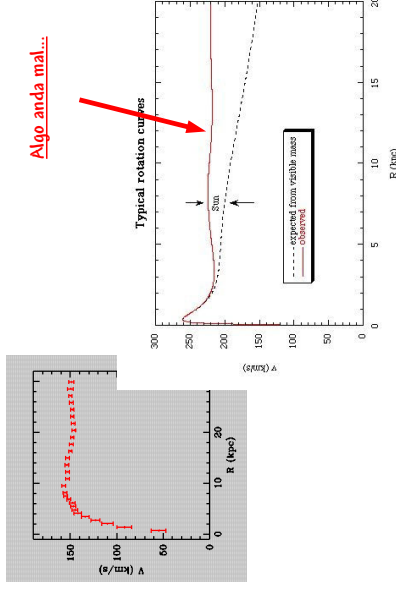
Efecto de “microlensing”



Curvas de rotación



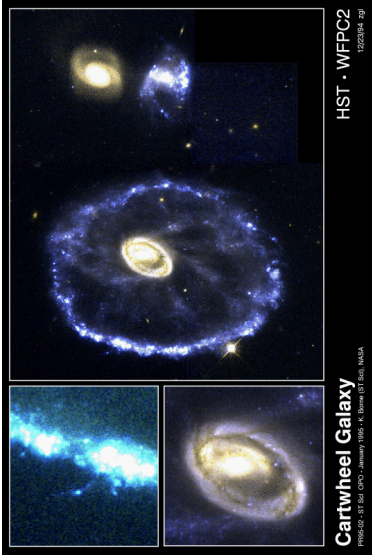
Curvas de rotación



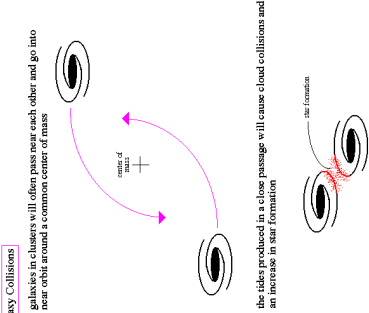
Curvas de rotación

- Las curvas de rotación “planas” se explican por presencia de materia en el halo!
- $\sqrt{\frac{G \times M_r}{r}} = V$
- Porque no vemos esta materia, la llamamos **materia oscura**. Su origen es un misterio aún.

Galaxias en colisión



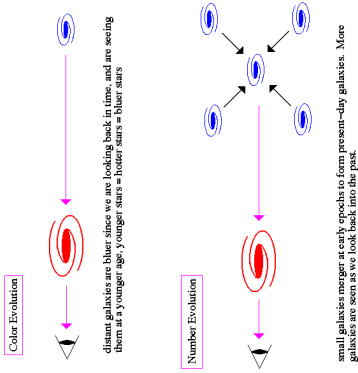
Galaxias en colisión



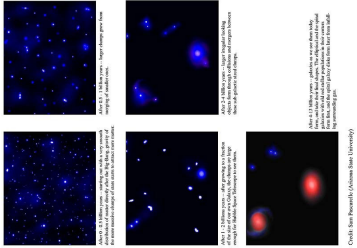
¿MOND?

- Hace predicciones pero no es una teoría que esté aceptada actualmente.
- Por otro lado, por qué aceptar la presencia de materia oscura en forma de partículas no bariónicas desconocidas?
- <http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm> (Ned Wright)

Evolución de galaxias



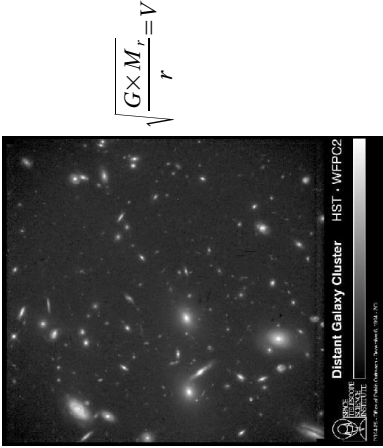
Evolución de galaxias



Galaxias en colisión



Cúmulos de galaxias



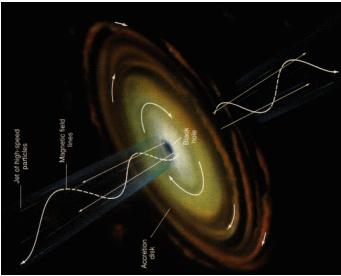
$$\frac{G \times M_r}{r} = V$$

Cúmulos de galaxias

90% de la masa calculada no ha sido identificada aún ("materia oscura")

Salida: Lentes gravitacionales ?

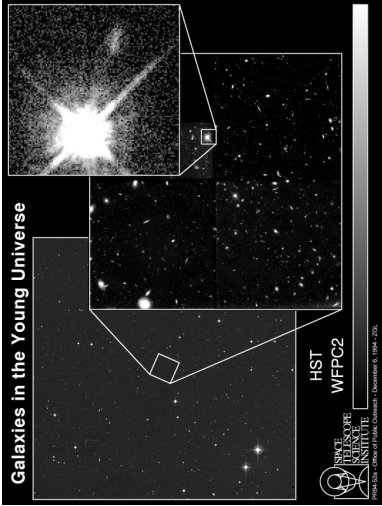
Cuasares



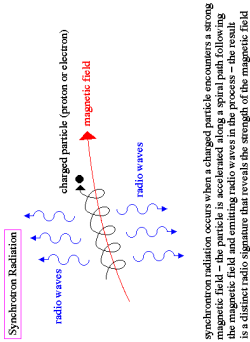
Evolución de galaxias:

/home/slopez/escuela/escuela/2004/galaxy_formation.mpg

Evolución de galaxias:



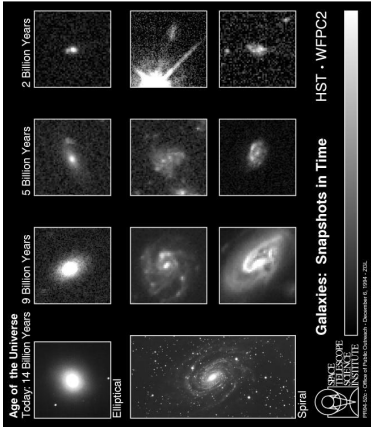
Cuasares



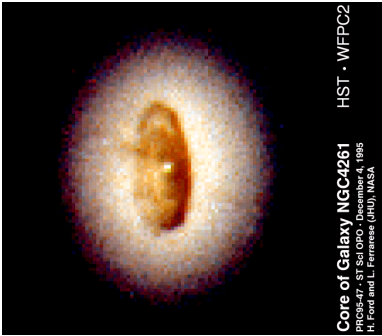
Evolución de galaxias:

</home/slopez/escuela/escuela/2004/100galaxy.mpg>

Evolución de galaxias:



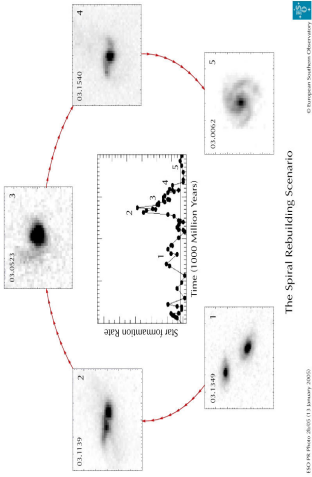
Cuasares



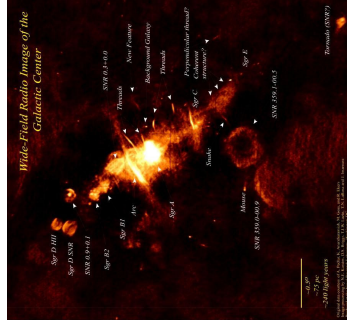
Evolución de galaxias:

</home/slopez/escuela/escuela/2004/cluster.mpg>

Evolución de galaxias:

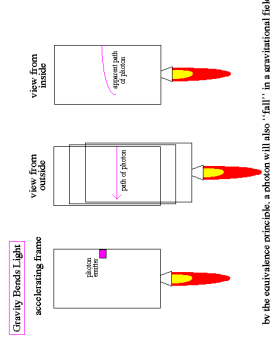


El Centro de nuestra Galaxia



Principio de equivalencia

- Podemos usar el principio de equivalencia para inferir qué pasará con un haz de luz en presencia de un campo gravitatorio.

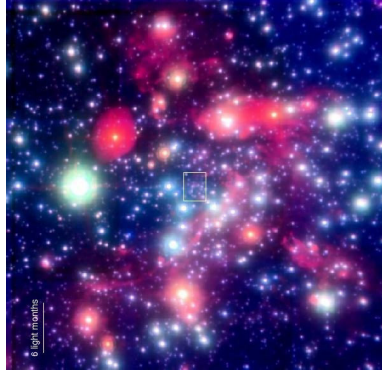


by the equivalence principle, a photon will also “fall” in a gravitational field.

Cuasares

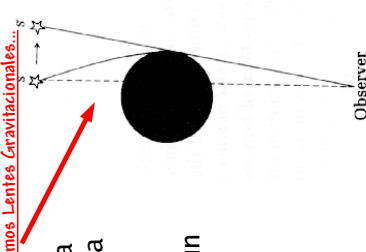
[/home/slopez/escuela/escuela/2004/quasar.mpg](#)

El Centro de nuestra Galaxia



Deflección de la luz

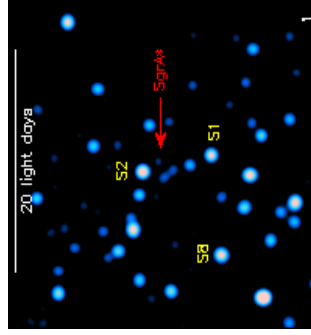
- **Einstein calculó el efecto para luz de una estrella pasando cerca del Sol.**
- **El efecto se midió en 1918 aprovechando un eclipse solar.**
- **Esta medición fue el primer triunfo de la Relatividad General**



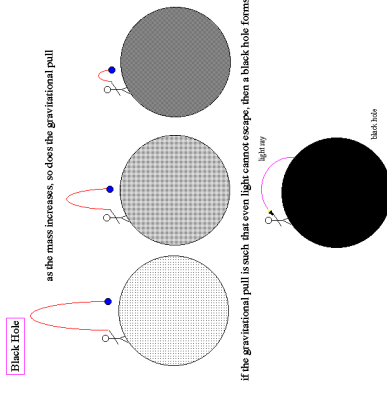
Agujeros negros

- Aunque los fotones no tienen masa, sí poseen **inercia**. Como resultado, un haz de fotones puede ser **deflectado** si pasa cerca de un cuerpo muy masivo.
- Que fotones tengan inercia puede inferirse del **principio de equivalencia**, establecido por Einstein como postulado de la **Relatividad General**.

El Centro de nuestra Galaxia



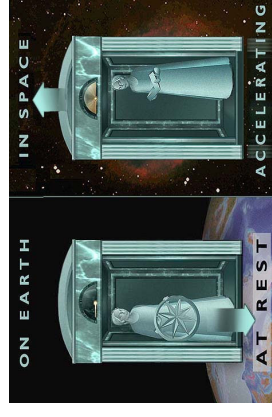
Deflección de la luz y BH's



Principio de equivalencia



- El principio de equivalencia establece que es imposible distinguir localmente entre un campo gravitatorio y aceleración.



El Centro de nuestra Galaxia

