

# **Introducción a Física de Partículas y Cosmología**

## **Un mundo cuántico y relativista**

Angel M. Uranga

Instituto de Física Teórica UAM/CSIC, Madrid  
[angel.uranga@uam.es](mailto:angel.uranga@uam.es)

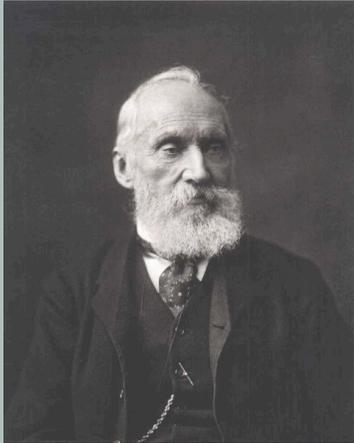
# Un mundo relativista

## Relatividad General y Gravitación

Angel M. Uranga

Instituto de Física Teórica UAM/CSIC, Madrid  
[angel.uranga@uam.es](mailto:angel.uranga@uam.es)

# Recordemos los albores del s. XX



**William Thomson  
(Lord Kelvin)**



Las dos nubes en el horizonte que vislumbró Lord Kelvin desencadenaron dos enriquecedores **chaparrones** que hicieron florecer la Física del s. XX

- La radiación de cuerpo negro

⇒ **Mecánica Cuántica**

- El experimento de Michelson-Morley

⇒ **Teoría de la Relatividad**

**Nueva visión del espacio y el tiempo**

- Relatividad Especial  
**y las interacciones  
fundamentales**

- Relatividad General  
**Descripción del Universo**  
Gravedad y Cosmología

# Cosmología antes del s. XX

- Antes s. XX: - Gravitación Newtoniana  
- Universo infinito en el espacio y eterno en el tiempo

Sin embargo, esto último es incompatible con un hecho familiar:  
**¡La noche es oscura!**

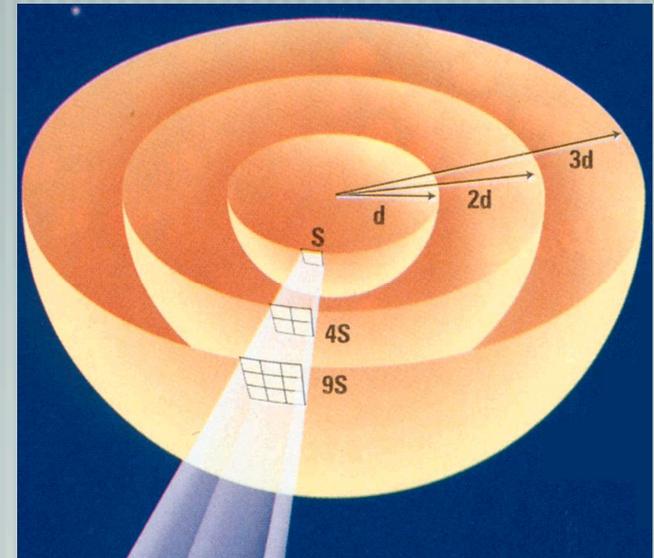
## La paradoja de Olbers (1823)

Supongamos el Universo infinito, eterno, y uniformemente poblado de estrellas. Entonces se obtiene un cielo infinitamente iluminado.

### Demostración:

- Divídase el espacio en un número infinito de "capas de cebolla"
- Una estrella en la capa a distancia  $r$  tiene luminosidad  $\sim 1/r^2$ , pero el número de estrellas crece como  $\sim r^2$
- Cada una de las infinitas capas contribuye con la misma cantidad

**Resolución: Universo finito en el tiempo**

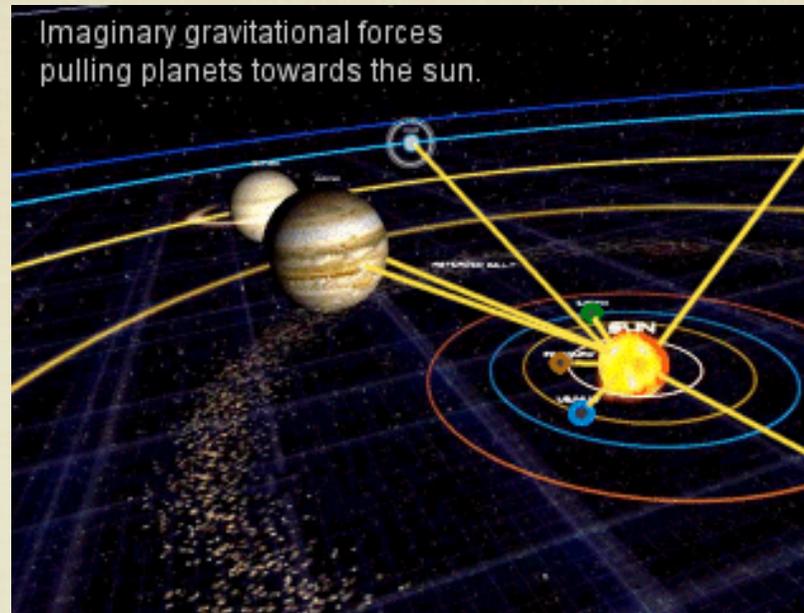


**Requirió cambio radical en la concepción del espacio-tiempo y la gravedad**

**Teoría de la Relatividad General**

# RELATIVIDAD GENERAL

La gravitación Newtoniana es una acción instantánea a distancia



Pero la Relatividad prohíbe que nada se propague más rápidamente que la velocidad de la luz

La gravedad de Newton es incompatible con la teoría de la relatividad

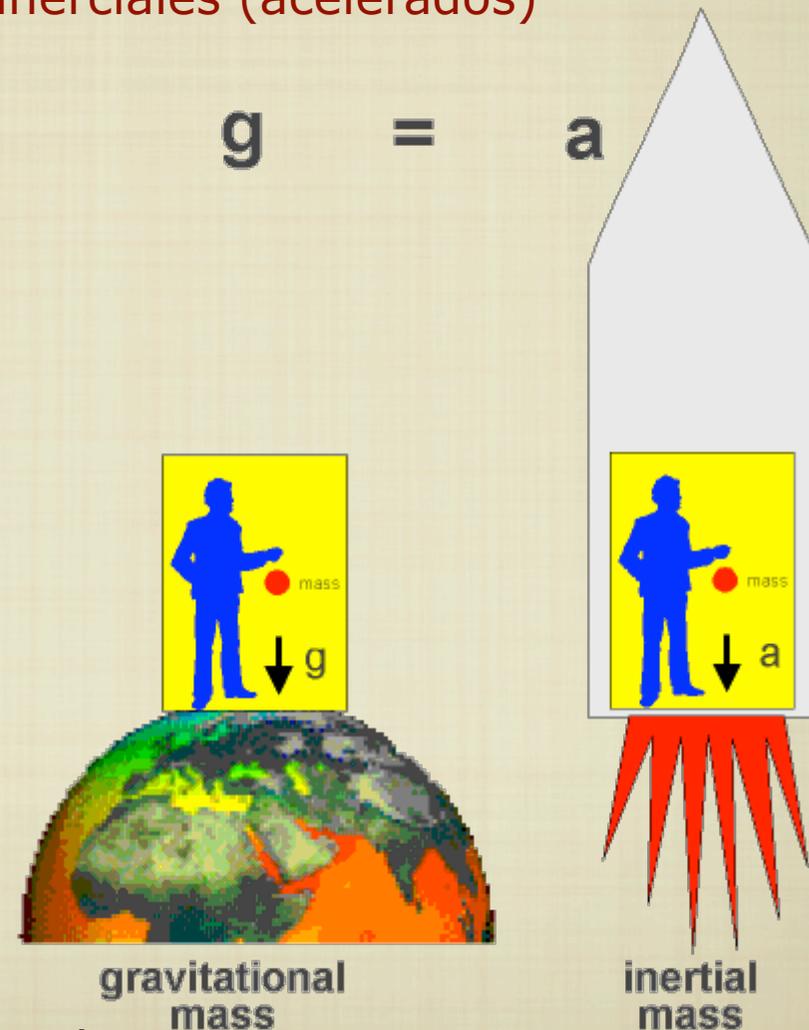


**Relatividad General**(Einstein): leyes físicas para observadores en sistemas de referencia no inerciales (acelerados)

⇒ **Principio de equivalencia**

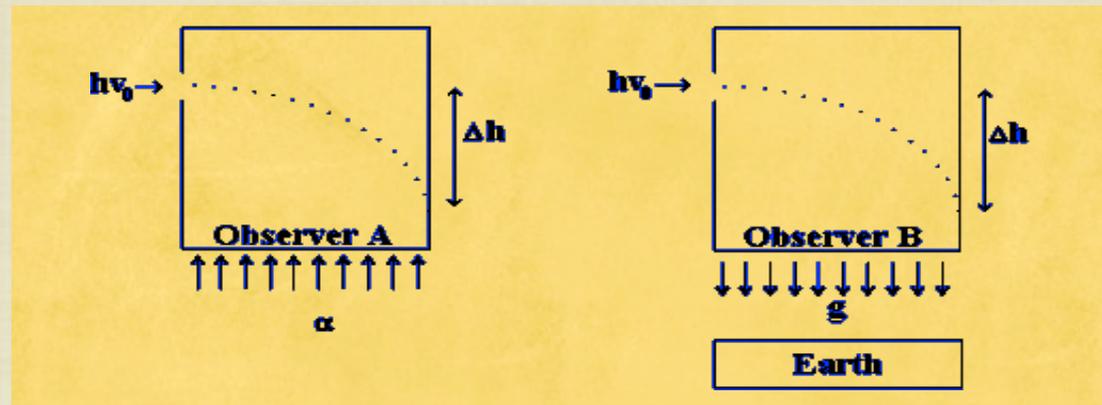
Una aceleración es indistinguible de un campo gravitacional (equivalencia de masa inercial y masa gravitatoria)

$$g = a$$



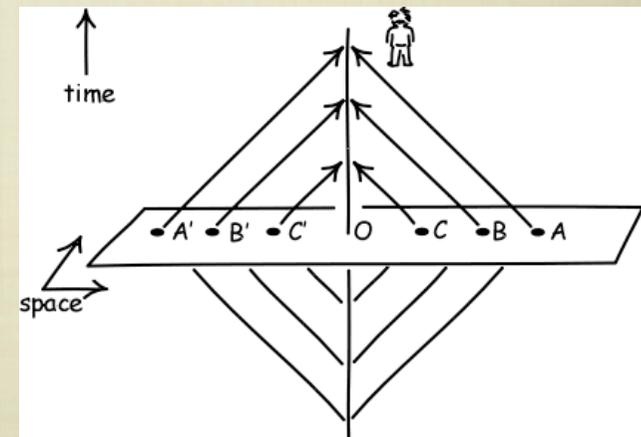
"El pensamiento más feliz de mi vida"  
"The happiest thought of my life" (A. Einstein)

⇒ Las trayectorias de la luz se curvan en campos gravitatorios



Recordemos que en Relatividad, los rayos de luz son un ingrediente crucial en la definición operativa del espacio-tiempo

**¡La gravedad se describe como la curvatura del espacio-tiempo!**

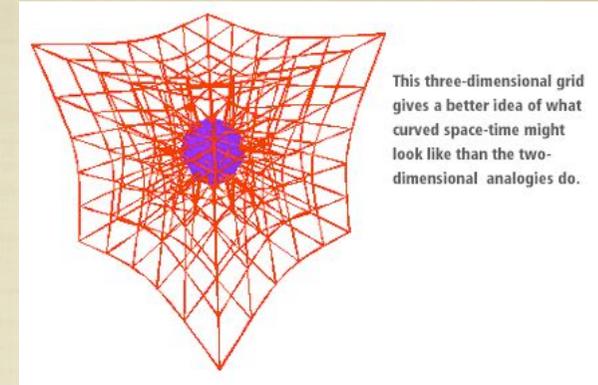


## Relatividad General y Gravitación

Los rayos de luz definen el camino más corto en el espacio

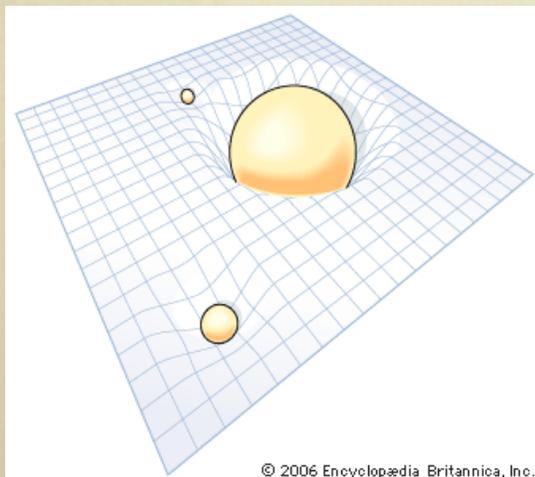
- Ascensor acelerado: la luz sigue trayectorias parabólicas
- Campo gravitatorio: los rayos de luz deben curvarse!

**¡La gravedad se describe como la curvatura del espacio-tiempo!**

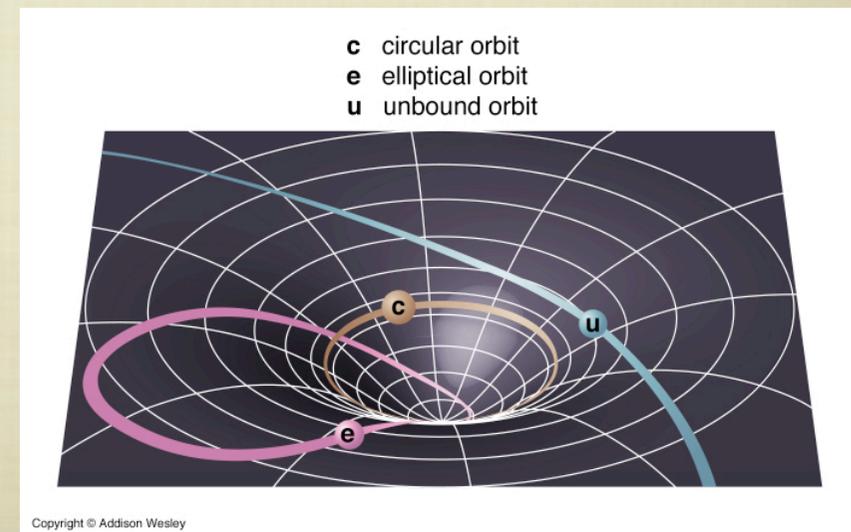


## Ecuaciones de Einstein:

- La Materia dicta al Espacio cómo curvarse



- El Espacio dicta a la Materia cómo moverse



# RELATIVIDAD GENERAL

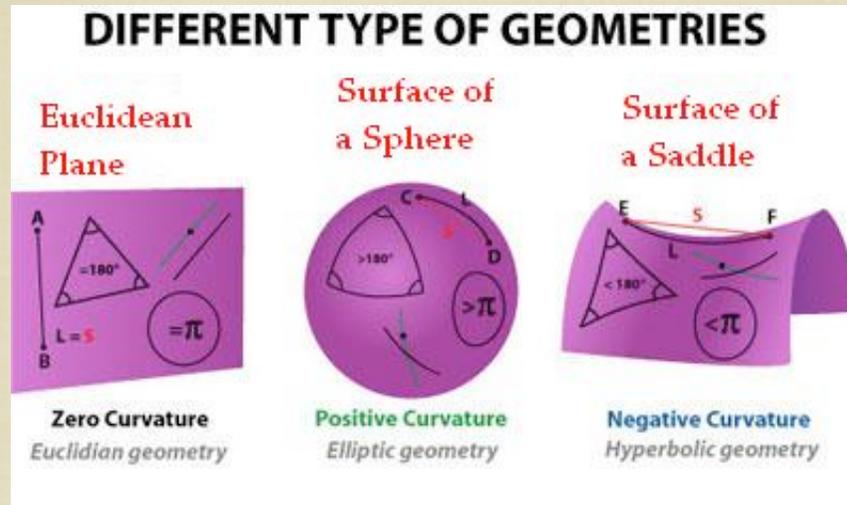


**¡ Nos lanzamos al estudio  
de espacios curvos !**

# RELATIVIDAD GENERAL

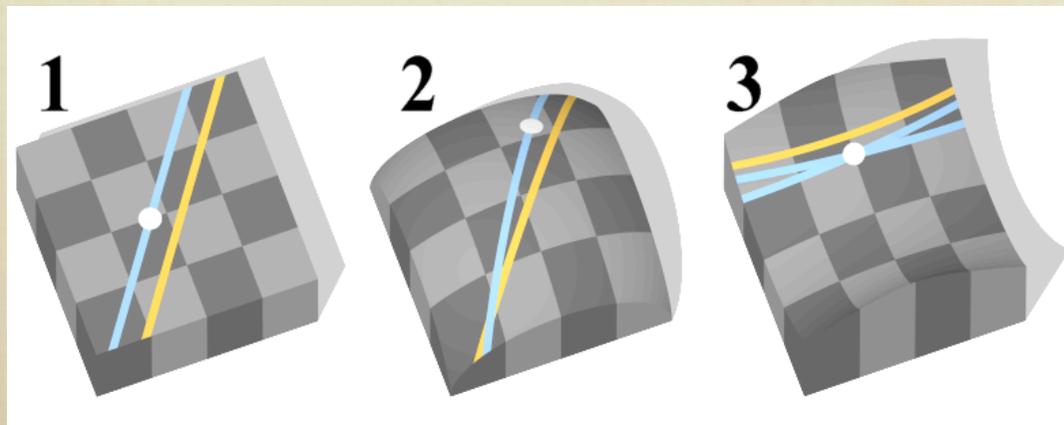
## Geometrías curvas

Plana, curvatura positiva o curvatura negativa



Carl Friedrich Gauss  
s.XIX

Suma de los ángulos de un triángulo igual que, o mayor o menor a 180 grados

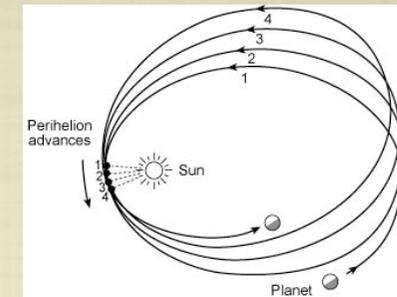
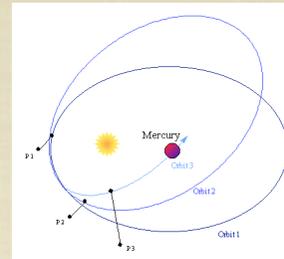


Líneas paralelas permanecen paralelas, o convergen, o divergen

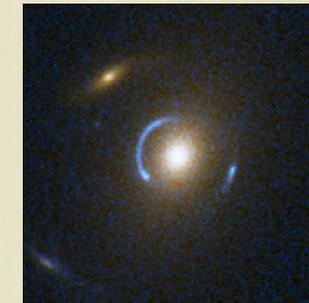
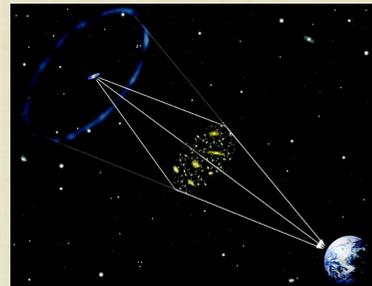
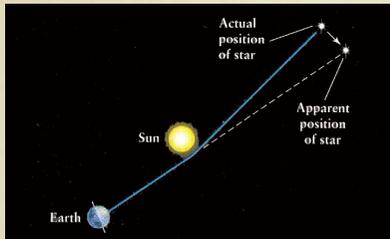
# RELATIVIDAD GENERAL

## Tests clásicos

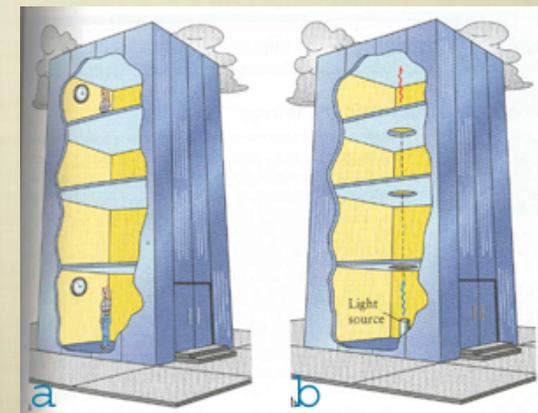
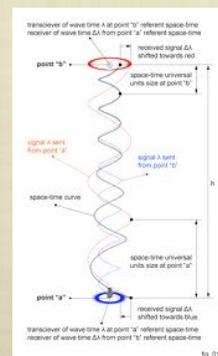
- Precesión anómala del perihelio de Mercurio



- Lentes gravitacionales: Eddington 1919, telescopio Hubble



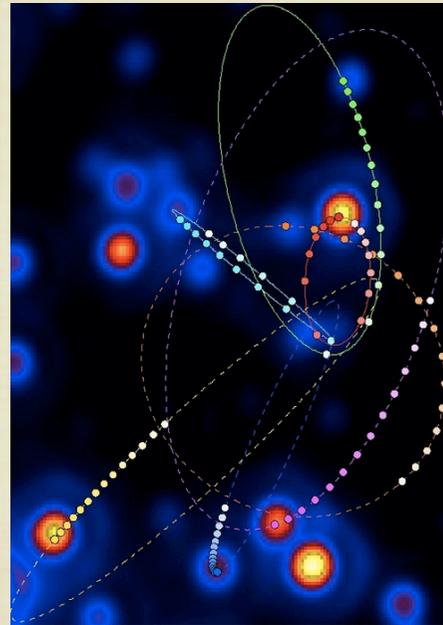
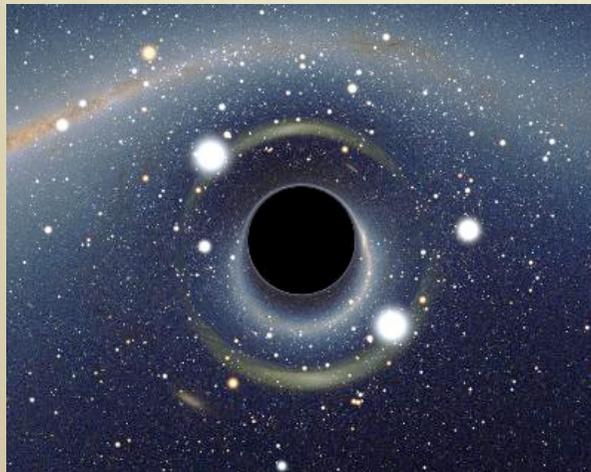
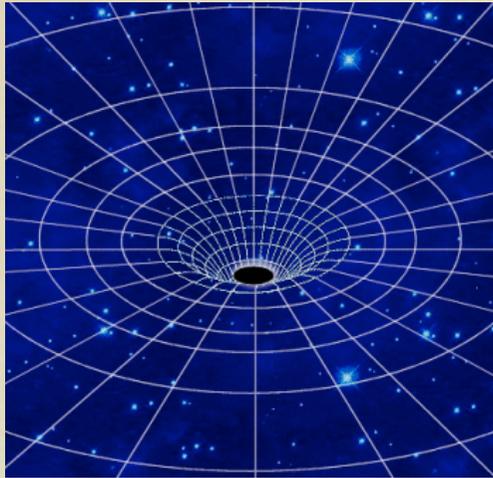
- Corrimiento al rojo en campos gravitatorios  
Pound-Rebka 1959



## y fenómenos espectaculares, p.ej **Agujeros negros**

K. Schwarzschild

Campo gravitatorio tan intenso  
que ni la luz puede escapar

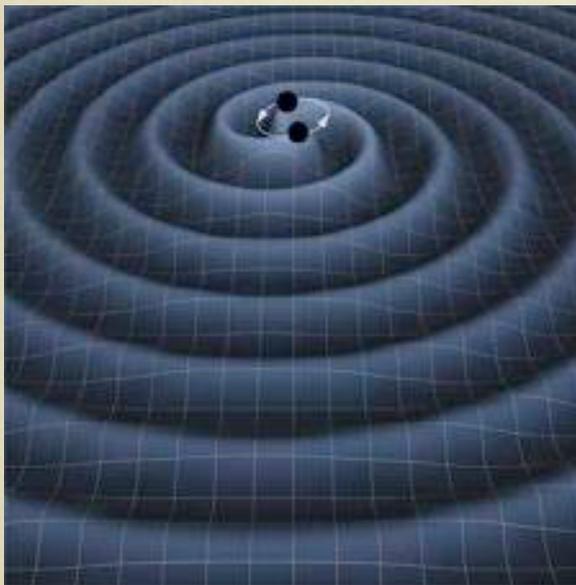


$$c^2 d\tau^2 = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

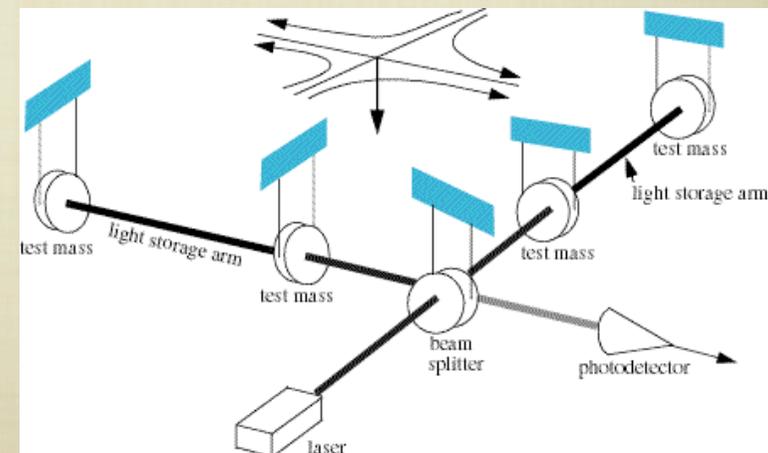
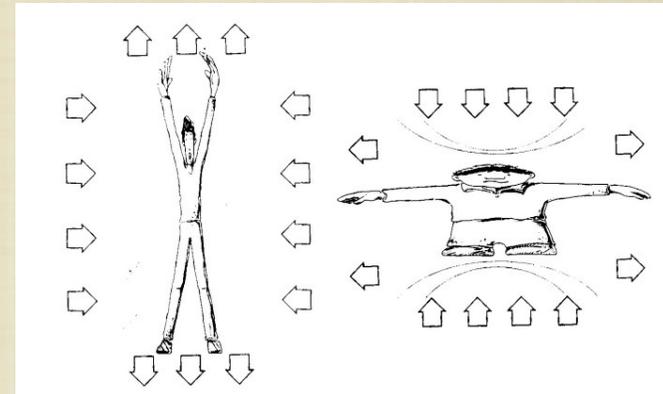
## y fenómenos espectaculares, p.ej Ondas gravitacionales

Distorsiones del espacio-tiempo que se propagan como ondas análogas a las electromagnéticas

Se busca su detección directa con interferómetros (LIGO, LISA)



Medidas indirectamente como pérdida de energía en púlsares binarios



# RELATIVIDAD GENERAL

1922

**y la más fascinante....:**

**Aplicación a Universo dinámico y en evolución**

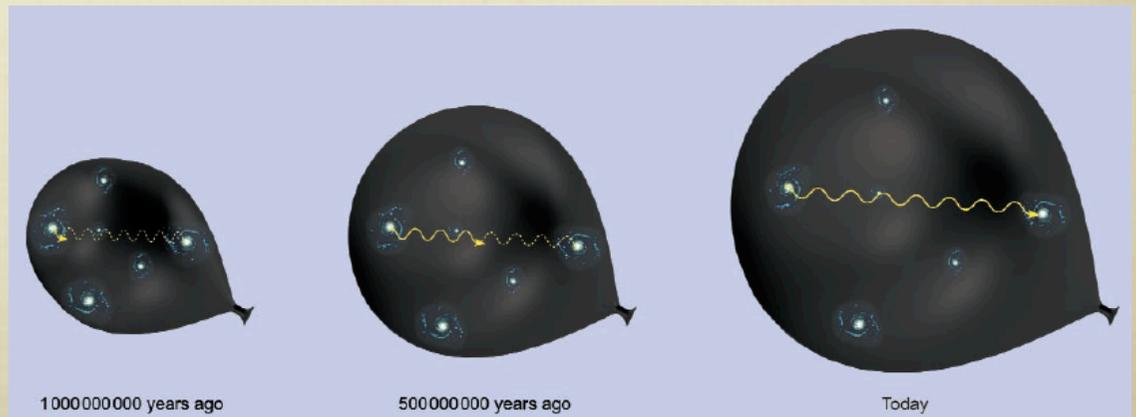
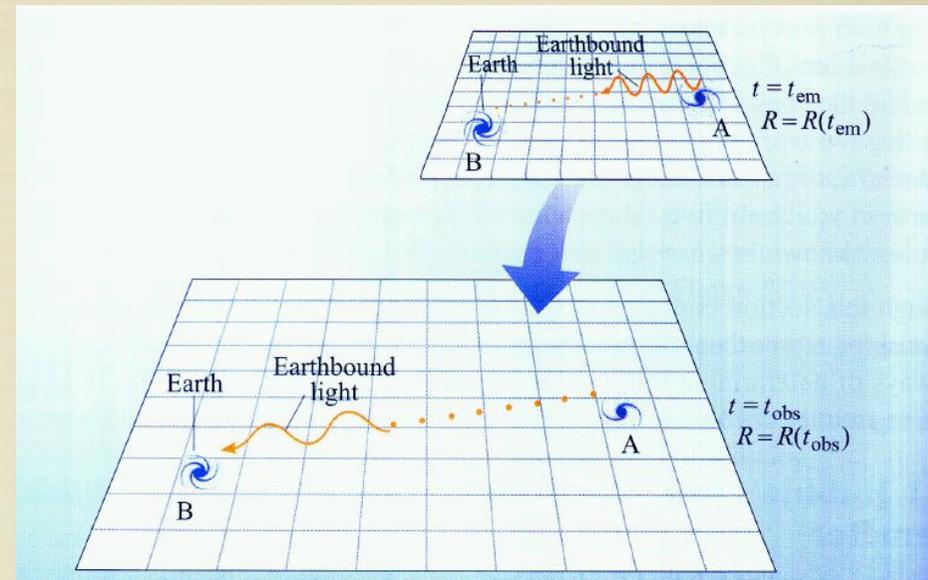
A. Friedmann (1922),  
G. Lemaitre (1927)

Universo aproximadamente homogéneo.  
Su evolución se describe mediante  
el **factor de escala  $a(t)$**

$$r_{AB}(t) = a(t) x_{AB}$$

Ritmo de expansión determinado por  
la densidad promedio " $\rho$ "  
y el factor de curvatura espacial " $K$ "

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{Kc^2}{a^2}$$



## Densidad crítica

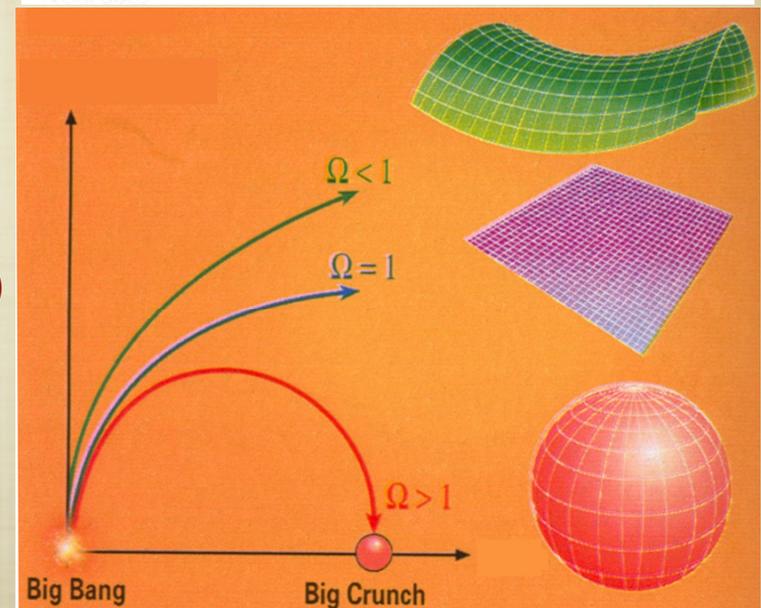
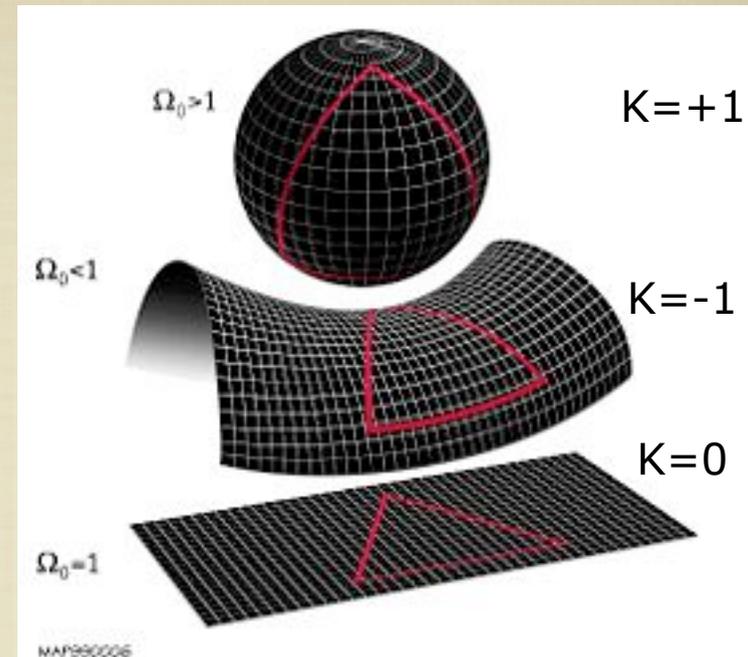
La densidad  $\rho$  determina la geometría del Universo  
La densidad crítica corresponde al valor en el que  
la geometría del espacio es plana

## Densidad crítica y evolución del Universo

En ausencia de lo que hoy se conoce  
como energía oscura:

- Densidad sub-crítica:  
Universo cerrado que colapsa
- Densidad super-crítica:  
Universo abierto en eterna expansión (decelerada)
- Densidad crítica:  
Universo plano en eterna expansión

**(Advertencia: esta conclusión se modifica en  
presencia de energía oscura, ver próximas  
charlas)**

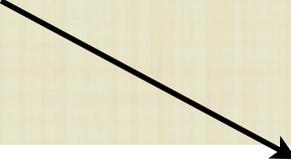


## Constante cosmológica

Einstein buscó soluciones que describieran un Universo estático y eterno

Pero sus propias ecuaciones no admitían soluciones estáticas

Propuso una modificación de las ecuaciones, añadiendo un término denominado '**constante cosmológica**'


$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho + \Lambda}{3} - \frac{Kc^2}{a^2}$$

### Interpretación:

- Densidad de energía del vacío
- Constante en el espacio y el tiempo
- Genera una repulsión que se opone a la atracción gravitacional

**La determinación del modelo teórico correcto para la estructura del Universo se convirtió en una cuestión experimental**

## ★ ★ Expansión cosmológica

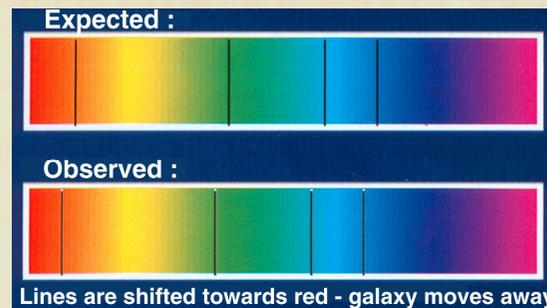
Hubble observó que la velocidad de las galaxias aumenta linealmente con la distancia



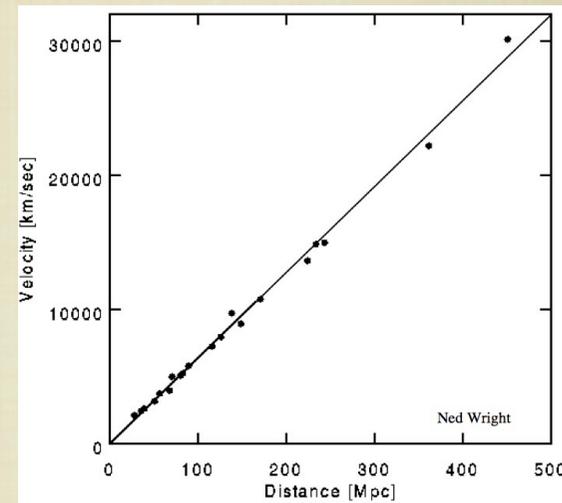
E, Hubble en el telescopio de Mt. Palomar

Explicable en el modelo de expansión de Friedmann

El Universo es como un globo que se infla, de modo que la velocidad de separación entre dos puntos cualesquiera aumenta con la distancia entre ellos



Corrimiento Doppler al rojo en el espectro de galaxias lejanas



La velocidad de recesión de las galaxias aumenta con la distancia

Einstein abandona la idea del Universo estático: **¡El Universo está en expansión!**

(hoy sabemos que la constante cosmológica podría explicar la energía oscura, de forma consistente con la expansión cosmológica, ver próximas charlas)



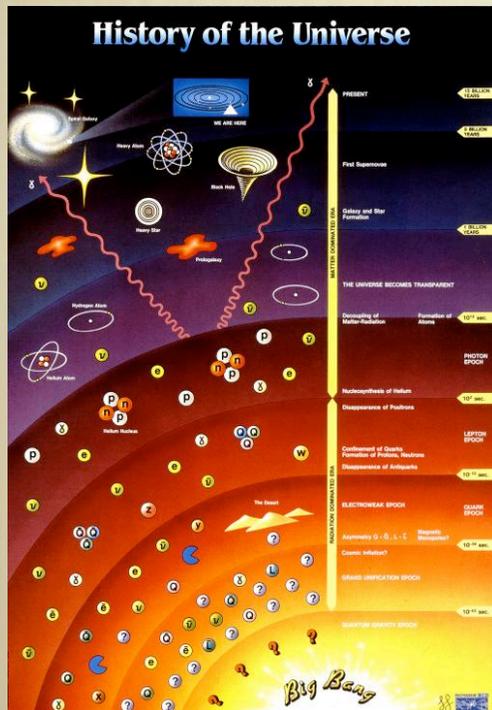
## Modelo del Big Bang:



G. Gamov

- El Universo comenzó comprimido y a altísima temperatura hace unos 13.000.000.000 de años ("huevo primigenio", Lemaitre 1930)
- A partir de ese estado, empezó a expandirse y enfriarse

En las primeras fases, era de la radiación (fotones). Posteriormente aparecen las partículas (protones, neutrones, electrones). Con el progresivo enfriamiento se formaron núcleos, átomos, etc hasta finalmente estructuras astronómicas (estrellas, galaxias)



## Predicciones claras y correctas:

### • Nucleosíntesis primordial:

- Formación de los núcleos ligeros en el rápido enfriamiento los primeros minutos (buen acuerdo con datos observ.)

### • Radiación de fondo de microondas:

- Radiación de cuerpo negro a  $T \sim 5K$ , que llena el Universo Remanente de la era de la radiación, corrida al rojo
- Detectada en 1965

**¡Fascinante nueva visión del Universo!**

# Conclusiones

## Un mundo cuántico y relativista

Mecánica  
Cuántica

Relatividad  
Especial

Relatividad  
General

"Teoría Cuántica de Campos"

**Modelo Estándar  
de Partículas Elementales**

Charlas de C. Pena, A. Casas

"Cosmología"

**Modelo Estándar  
de Cosmología  
 $\Lambda$ CDM**

Charlas de D. G. Cerdeño

