

Introducción a Física de Partículas y Teoría de Cuerdas

Gravedad y Mecánica Cuántica (2)

Angel M. Uranga

Instituto de Física Teórica UAM/CSIC, Madrid
angel.uranga@uam.es

Gravedad Semiclásica

Plan

- El gravitón
- Agujeros negros
- ¿y el Big Bang?
- Agujeros de gusano, viajes en el tiempo, ...

(recordar código de colores)



más especulativo

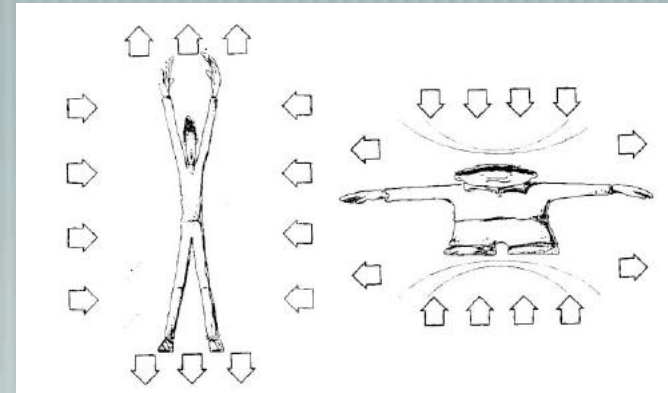
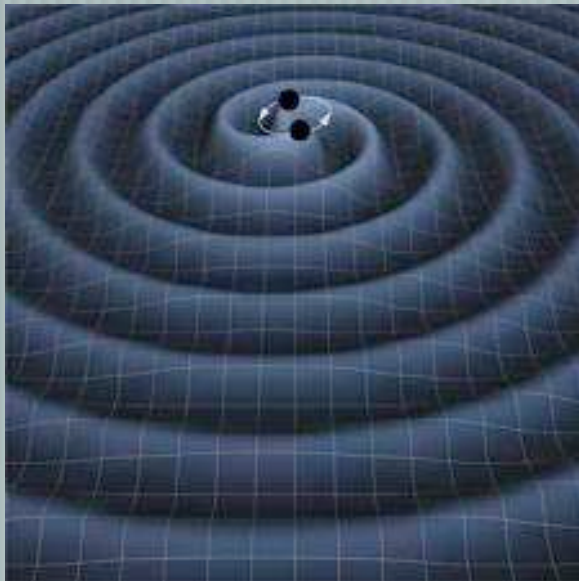
Gravitones

Flash
back

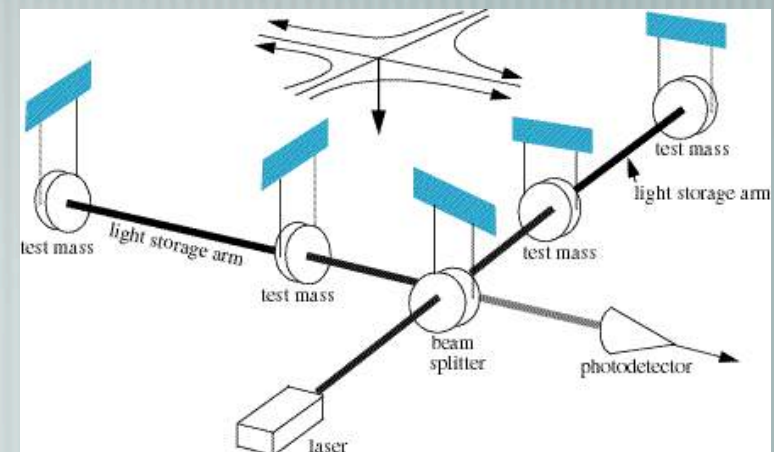
Recordemos: Relatividad General predice Ondas gravitacionales

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

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



En Mecánica cuántica, cualquier onda tiene una partícula asociada
⇒ **gravitón**



Fotón

Efecto fotoeléctrico

Flash
back



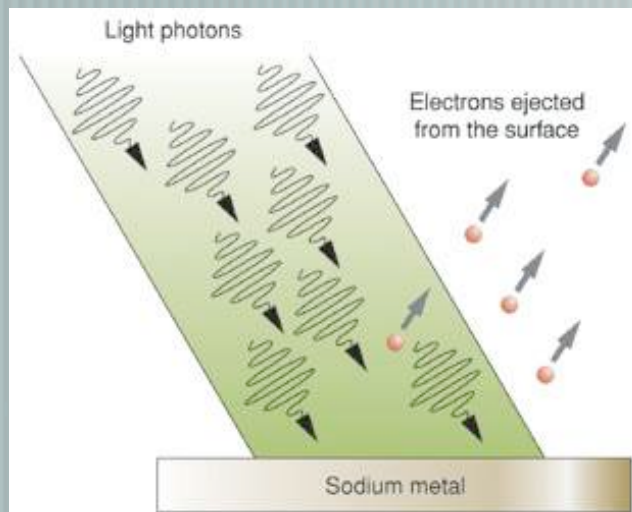
Albert Einstein

“Mi única contribución revolucionaria”

La luz es emitida y absorbida en cuantos de energía $E = h \nu$

Un cuanto de luz entrega toda su energía a un único electrón

(demostrado experimentalmente por Compton, 1923)



$$E_{\max} = h\nu - W$$

Fotón: El cuanto de luz se comporta como una partícula

Dualidad onda-partícula

Así como la radiación electromagnética (ondas) se comporta como partículas (fotones), ...

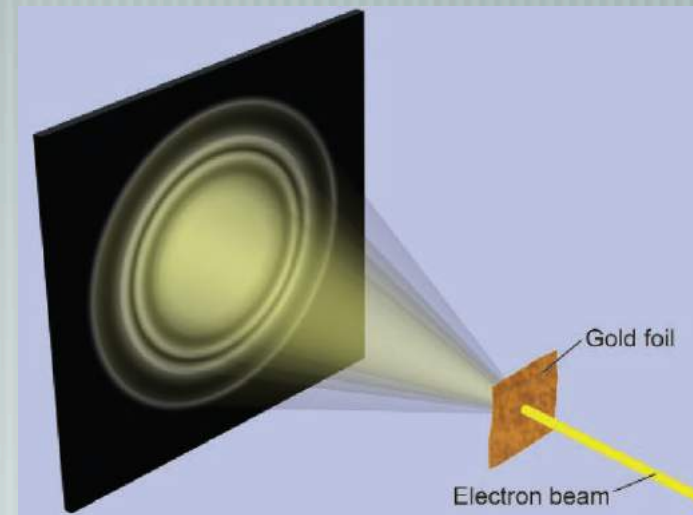
Flash
back



Louis de Broglie

Las partículas se comportan como ondas

$$\lambda = \frac{h}{p}$$



*Confirmado experimentalmente en 1927
En la difracción de electrones (Davisson/Germer)

Gravitones

¿propiedades del gravitón?

- El gravitón sería el mediador de la fuerza gravitatoria entre partículas

largo alcance \Rightarrow **partícula sin masa**



- Las partículas se acoplan al gravitón proporcionalmente a su energía-momento total

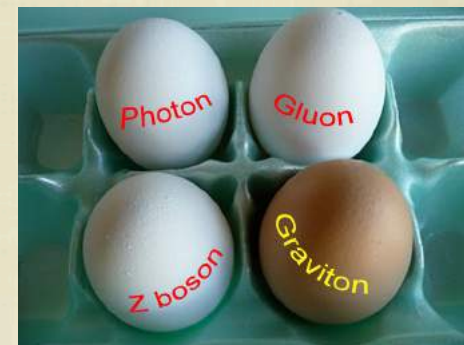
no sólo su masa en reposo (a diferencia del bosón de Higgs)

- Spin 2: $G_{\mu\nu}$

Electromagnetismo: carga eléctrica: escalar $Q \Rightarrow$ corriente eléctrica: vector $j_\mu \Rightarrow$
 \Rightarrow el fotón tiene spin 1: A_μ

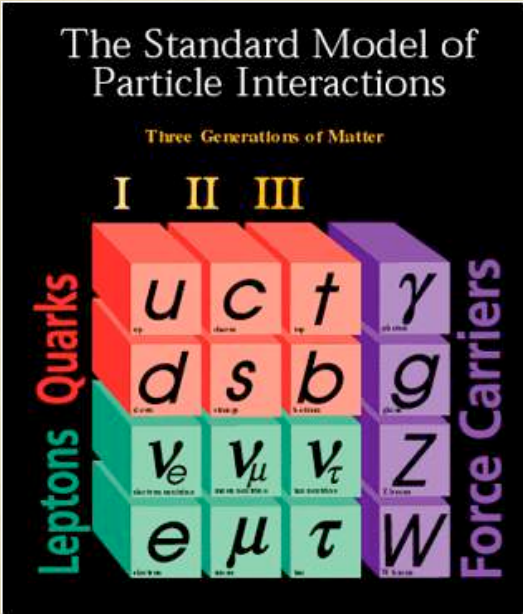
Gravedad: carga=energía momento $P_\mu \Rightarrow$ `corriente` =tensor energía momento $T_{\mu\nu} \Rightarrow$
 \Rightarrow el gravitón tiene spin 2: $G_{\mu\nu}$

interacción atractiva entre cargas iguales (opuesto a spin 1)



Gravitones

El gravitón es el eterno candidato a nuevo miembro de las tablas de partículas elementales



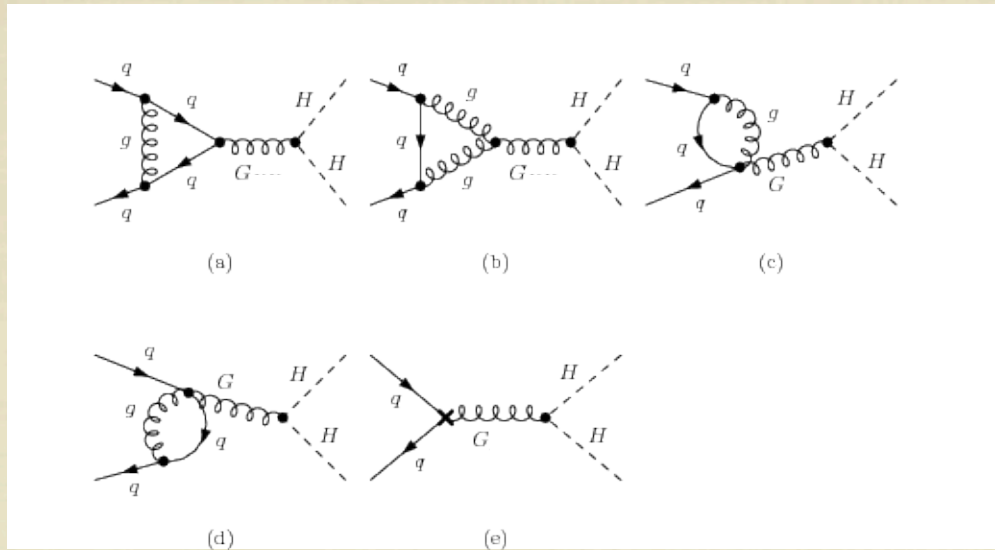
Aquí no



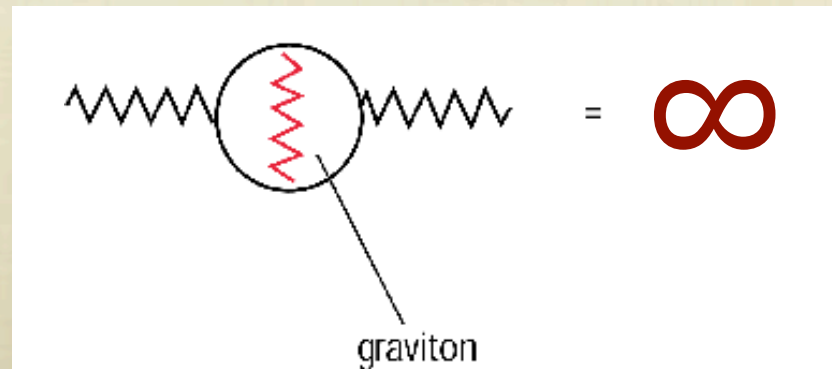
Aquí sí

Gravitones

Ingenuamente, la gravedad cuántica sería la suma de diagramas de Feynman involucrando gravitones



Pero la teoría es "no renormalizable": Infinitos problemáticos



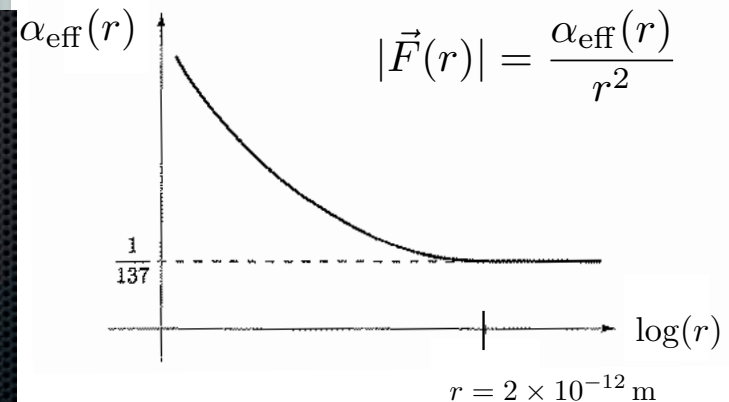
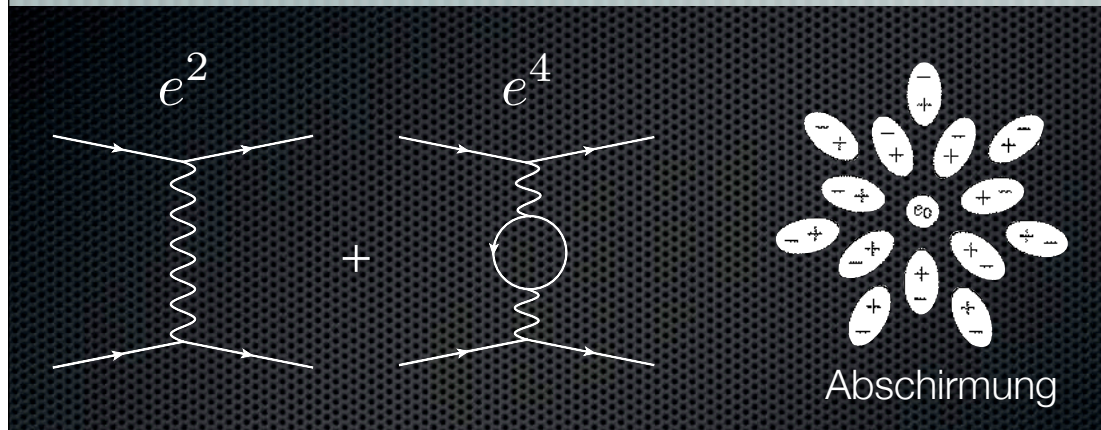
Renormalización: la Teoría Cuántica de Campos

Flash
back

Los infinitos no son tales: desaparecen si se acepta que la magnitud de las fuerzas (valores de cargas y masas) **cambia como función de la distancia**.



Dyson, Feynman, Schwinger, Stückelberg, Tomonaga 1934-1948

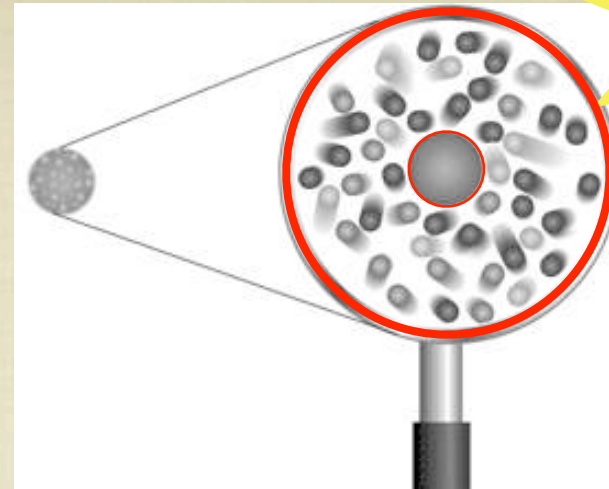


N.B.: el juego de la renormalización NO funciona siempre. Es consistente para la electrodinámica, pero NO para los modelos de Fermi y Yukawa.

Renormalización

Las partículas están rodeadas de una nube de partículas virtuales

Las propiedades de las partículas (carga, masa, etc) dependen de a qué escala de distancia/energía se midan

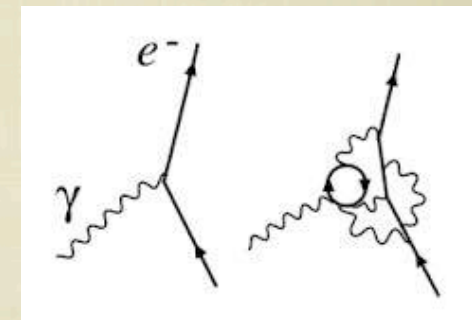


Flash
back

Los diagramas con partículas virtuales permiten relacionar las propiedades de las partículas a distintas escalas

A veces, resultados infinitos a distancias infinitamente pequeñas. Dos posibilidades:

- Los infinitos se absorben "**renormalizando**" propiedades de la partícula "desnuda"
- Infinitos "**no renormalizables**": La teoría es patológica a distancias pequeñas / altas energías



Gravitones

No es la primera vez que surgen infinitos en Física de Partículas...

Analogy:

- Vértice



General Relativity



- Acoplamiento

G_F

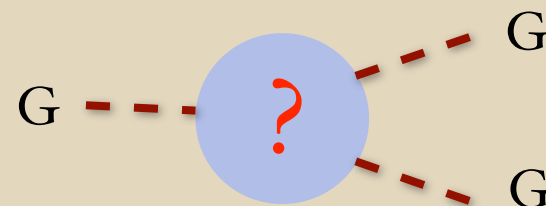
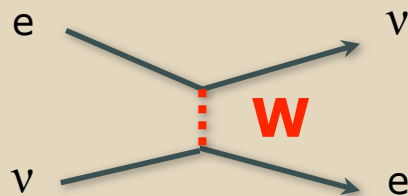
G_N

- Escala

$$L_F \approx (100 \text{ GeV})^{-1}$$

$$L_F \approx (10^{19} \text{ GeV})^{-1}$$

- Compleción
a alta energía



Los infinitos indican que hay nueva Física a altas energías:

La escala de Planck, M_P

¿Gravedad Cuántica?



Masa de Planck

$$M_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$$

Interpretación: masa necesaria para que la fuerza de gravedad entre partículas sea comparable p.ej. a la electromagnética

$$M_P = 2,4 \times 10^{18} \text{ GeV}/c^2$$

Masa a partir de la que el radio de Schwarzschild de una partículas es mayor que su longitud de Compton. La propia partícula es un agujero negro.

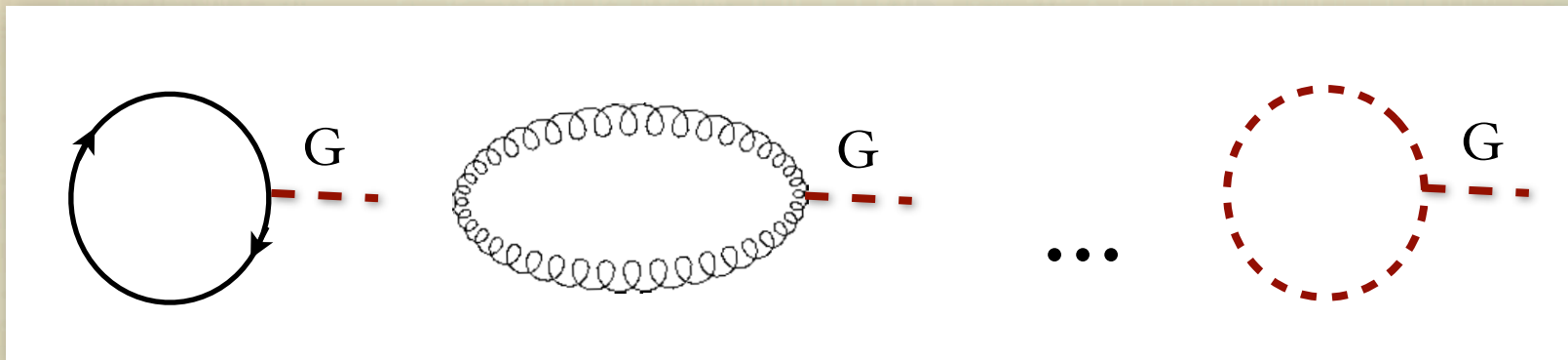
Constante cosmológica



La divergencia más intrigante...

La constante cosmológica (energía oscura) es diminuta en la escala de energías de Física de Partículas: $(10^{-3} \text{ eV})^4$

Sin embargo, la aplicación de Teoría Cuántica de Campos implica que la c.c. se renormaliza enormemente



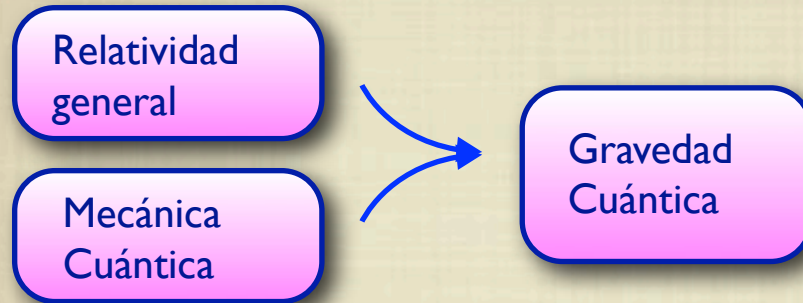
Su escala natural sería $M_p^4 \sim (10^{19} \text{ GeV})^4$
Muchos órdenes de magnitud de diferencia

¿Extrañas cancelaciones? ¿Cosas que no entendemos? ¿...?

Uno de los problemas más importantes de la Física Teórica para el s. XXI

¿Gravedad Cuántica?

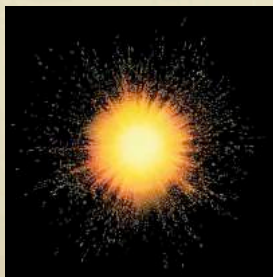
De momento, sólo ideas especulativas...



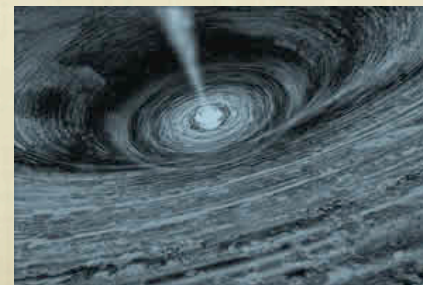
Intenta reconciliar la Gravedad y la Mecánica Cuántica

- La teoría cuántica describe sistemas pequeños
- La relatividad general describe sistemas muy masivos

¿ Cómo describir sistemas muy masivos y muy pequeños?



Primeros instantes del Big Bang



Singularidades en agujeros negros

Agujeros negros (clásicos)

Velocidad de escape

Velocidad necesaria para que un objeto escape de la atracción gravitatoria de un cuerpo de masa M a distancia R

Conservación de la energía:

$$\frac{1}{2}mv^2 = G\frac{Mm}{R}$$

$$v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$



Ejemplos:

Tierra: 11 km/s

Sol: 617 km/s

Enana blanca: 5.000 km/s

Estrella de neutrones: 100.000 km/s

Agujeros negros (clásicos)

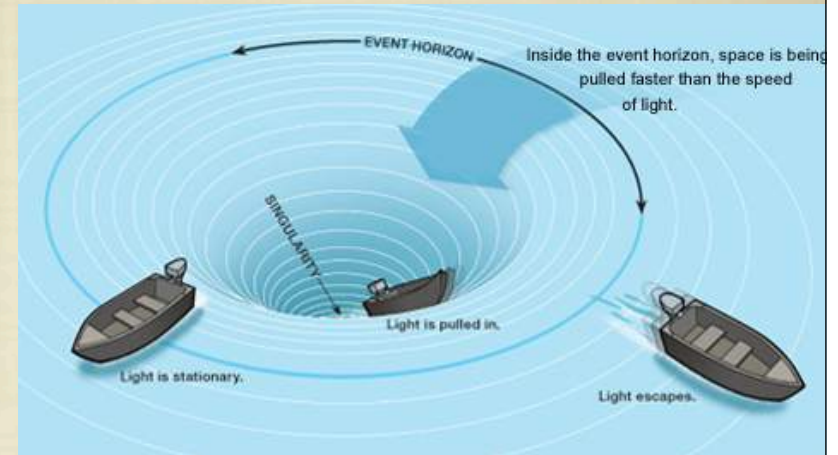
Agujero negro

Objeto tan masivo y compacto que su velocidad de escape es mayor que la de la luz

¡Nada puede escapar!

Horizonte

Superficie alrededor del agujero negro más allá de la cual nada puede escapar



Radio de Schwarzschild

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Ejemplos:

Tierra: 9 mm (radio real 6000 km)

Sol: 3km (radio real 700.000.000 km)

Estrella de neutrones: 6km (radio real 10km)

Agujeros negros supermasivos: 3 Mkm (muy compactos)

Agujeros negros (clásicos)



Agujero negro de Schwarzschild

Agujero negro "básico" en Relatividad General:
totalmente determinado por su masa
(equiv. su radio de Schwarzschild)
teorema "no-hair"

Karl Schwarzschild

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

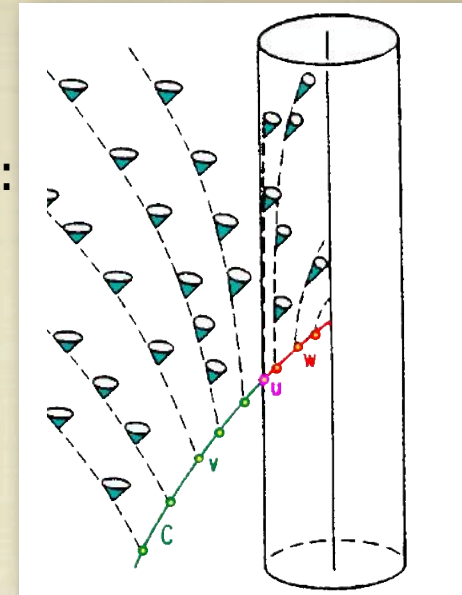
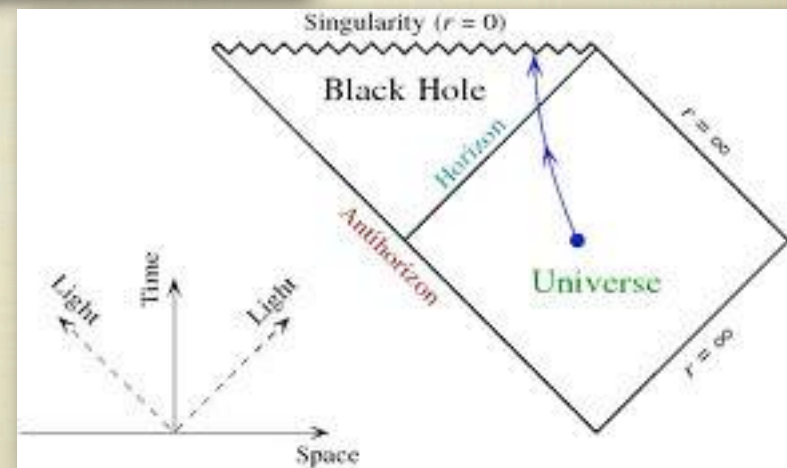


Diagrama de Penrose

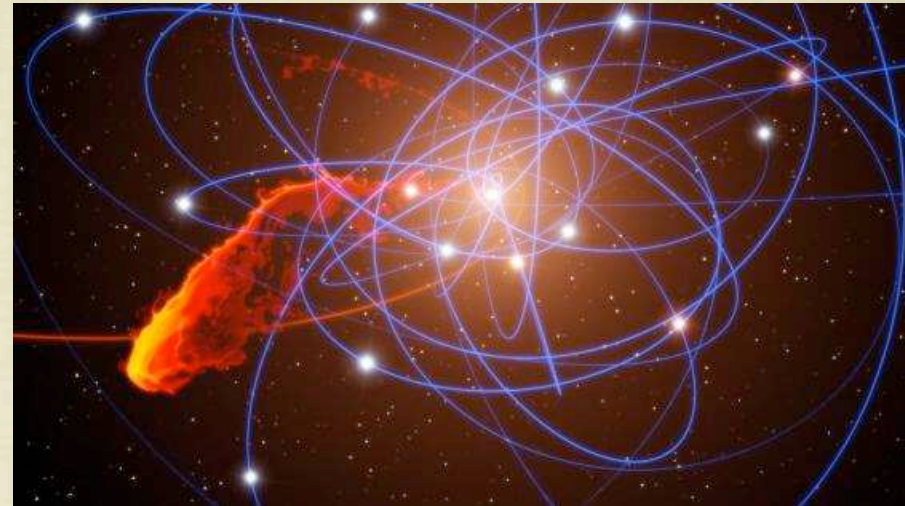
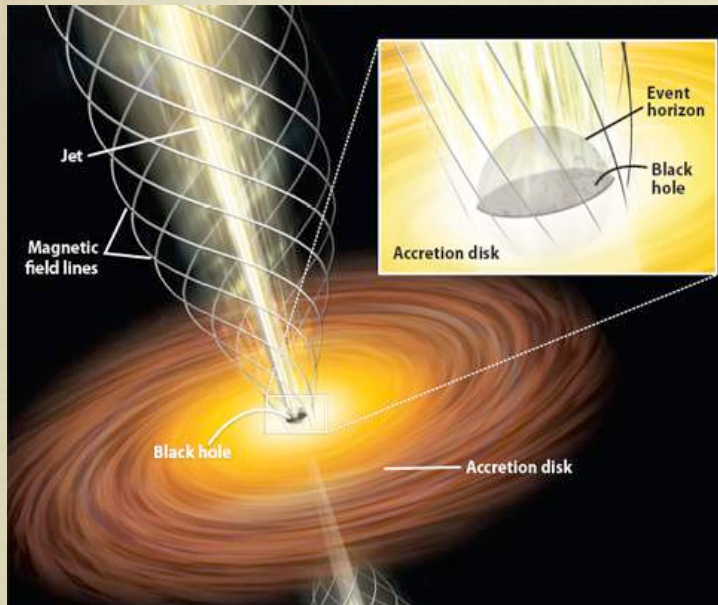
Estructura causal del espacio-tiempo
(la luz viaja en líneas a 45°)



Generalizaciones con momento angular (Kerr), carga eléctrica (Reissner-Nordstrom) o ambos (Newman)

Agujeros negros astrofísicos

Intenso debate sobre la existencia de agujeros negros físicos
Consenso a partir de los '80 (Cygnus X-1, ...)



Muy distintos de puro Schwarzschild
Pero los modelos sencillos encierran muchas lecciones...

Agujeros negros (cuánticos)

Radiación de Hawking

A nivel cuántico, los agujeros negros son grises, pueden emitir partículas procedentes de las fluctuaciones del vacío cerca del horizonte

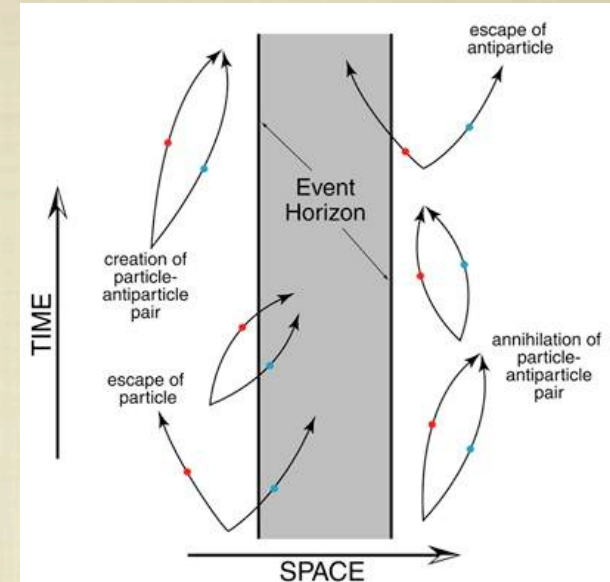
Temperatura de Hawking

El espectro de la radiación es como el cuerpo negro con temperatura

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi GM k_B} \left(\approx \frac{1.227 \times 10^{23} \text{ kg}}{M} \text{ K} \right),$$

Los agujeros negros más masivos están más fríos

Los agujeros negros astrofísicos están muy muy fríos, y absorben muchísimo más de lo que emiten



Ejemplos:

1 masa solar: $T=60$ nK

1 masa lunar: $T=2,7$ K

Agujeros negros (cuánticos)

⇒ Termodinámica de agujeros negros

Entropía de Bekenstein-Hawking

$$S = \frac{A k c^3}{4 h G}$$

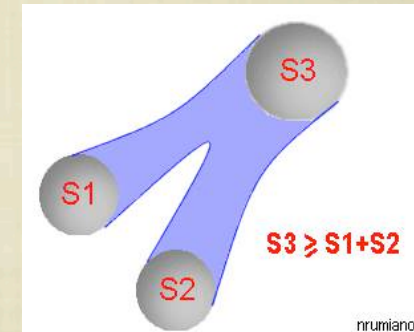
Leyes de la termodinámica

0. La temperatura es una constante del sistema
(T constante en el horizonte)

1. $dU = TdS$, con $U=M$

2. La entropía siempre aumenta

3. No se puede alcanzar $T=0$ mediante procesos físicos finitos



¿Interpretación estadística de esta termodinámica?

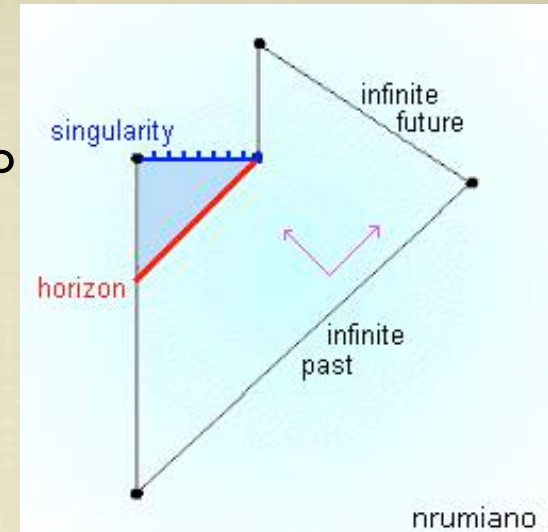
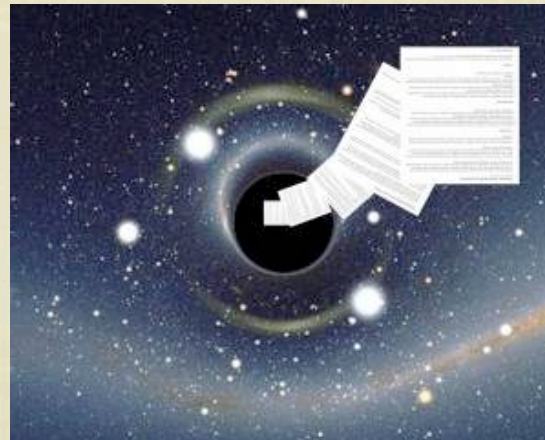
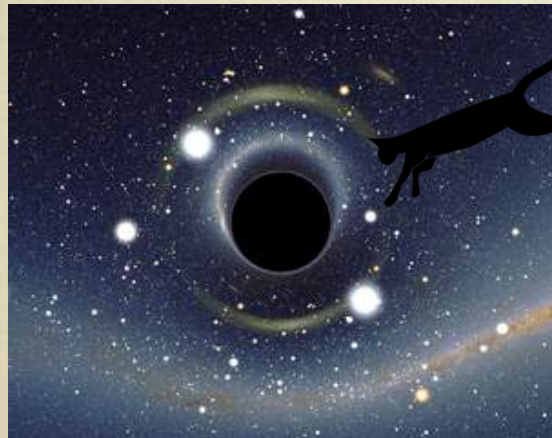
Agujeros negros (cuánticos)

El problema de la información

La radiación de Hawking termina evaporando* el agujero negro (tiempo ENORME para agujeros negros astrofísicos)

$$t_{ev} = \frac{5120\pi G^2 M_0^3}{\hbar c^4} \quad T \approx \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^3$$

¿Se pierde la información caída en el agujero negro?



En Mecánica Cuántica, violación de unitariedad (probabilidad total = 1)

* Asumiendo que no hay “remanentes” (*remnants*)

Agujeros negros (cuánticos)

El problema de la información

Si se pierde información se viola la Mecánica Cuántica

Experimento mental: decoherencia del par EPR



Microestados de agujeros negros

La interpretación mecánico-estadística de la entropía $S = \log N$, sugiere la existencia de una enorme cantidad N de microestados del agujero negro para una masa M dada.

Contradice la unicidad de la solución clásica (que sólo depende de M)
(teorema “no hair”)

¿Qué son esos microestados cuánticos?

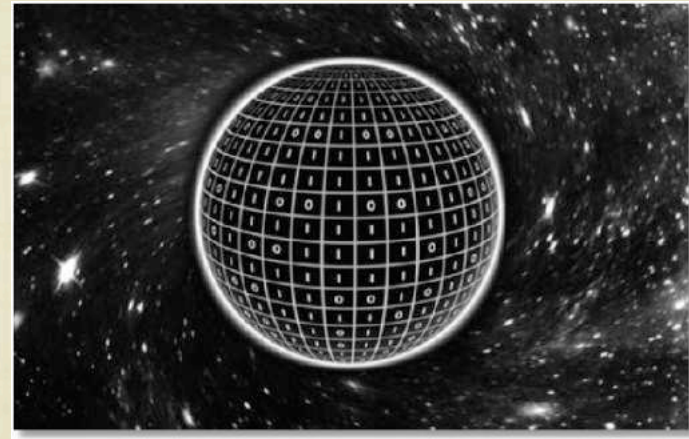
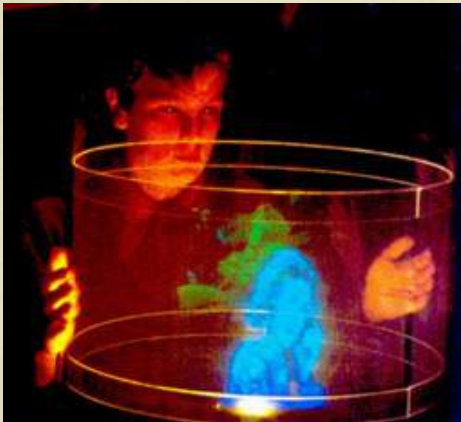
Agujeros negros (cuánticos)

Holografía 't Hooft, Susskind

La entropía de un agujero negro está relacionada con el área de la región, y no con su volumen, al contrario de sistemas usuales (gases, etc).

Sugiere que la información de los microestados cuánticos del agujero negro está almacenada sólo en el horizonte

Analogía con un holograma, imagen 2d que almacena información 3d



Conclusiones

Muchas ideas. Sería necesario un marco concreto donde verificarlas y hacerlas cuantitativas

Volveremos sobre ello en la última sesión

Algunos otros temas

Muchos temas asociados a Gravedad Cuántica...

- De forma rigurosa

y/o

- En el imaginario colectivo

Algunos de ellos

- ✓ Agujeros negros

Big Bang y origen del Universo

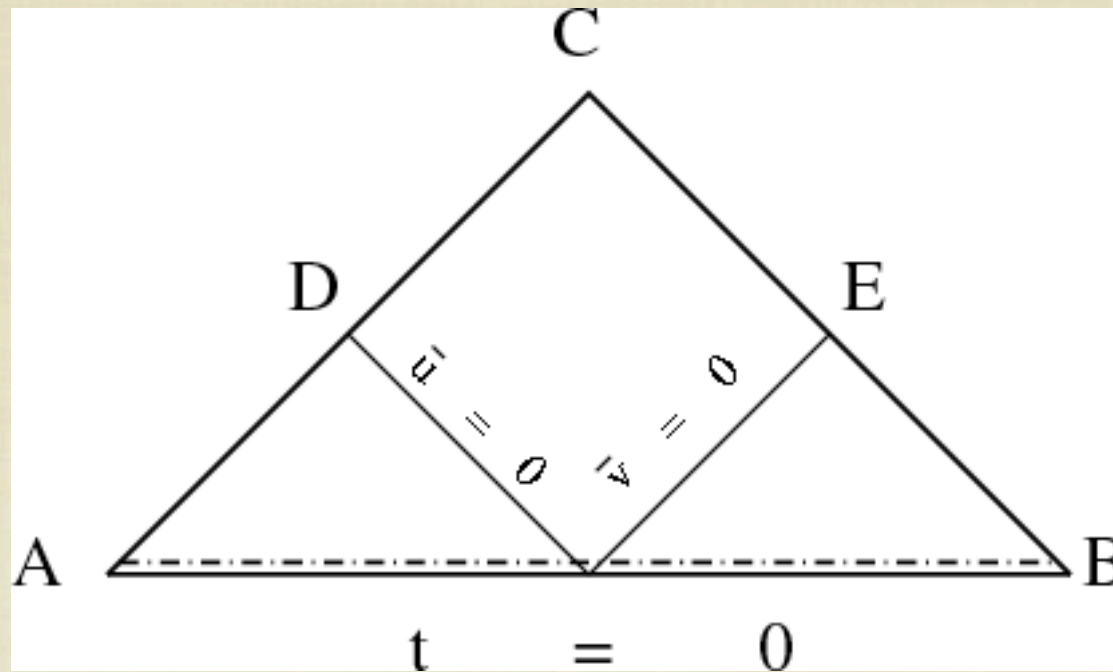
} Singularidades

Líneas temporales cerradas (viajes en el tiempo)

Agujeros de gusano

Big Bang

Singularidad espacial desnuda



Dos puntos cualesquiera están a una distancia arbitrariamente pequeña
(la singularidad del Big Bang tiene lugar en todo el espacio)

¿Resolución de la singularidad en el régimen sub-Planckiano?

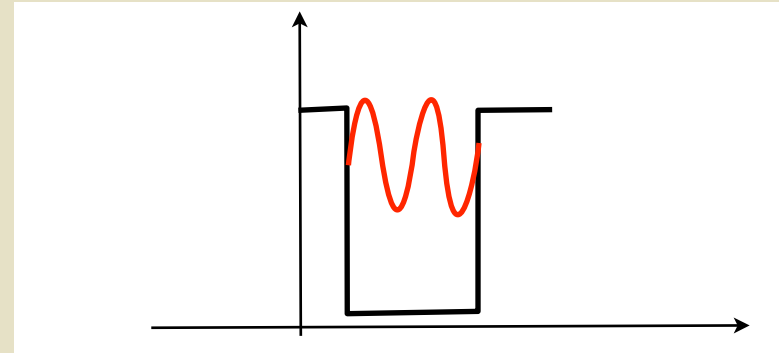
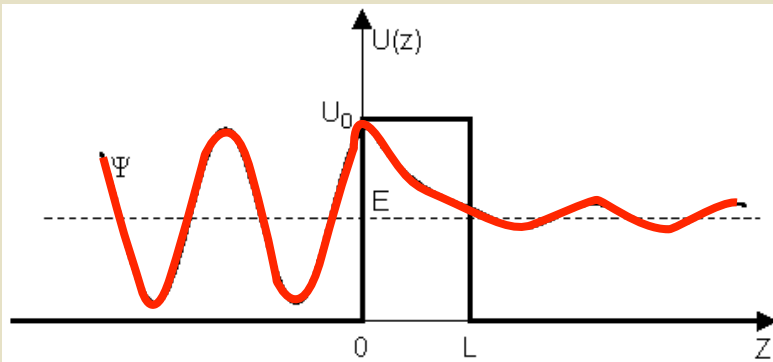
Big Bang

Una propuesta: (gravedad cuántica euclídea)

J. Hartle, S. Hawking

Recordemos el efecto túnel cuántico

Descripción en formalismo euclídeo



$$k^2 = \frac{2m\Delta E}{\hbar^2}$$

$$e^{-\frac{kx}{\hbar}}$$



$$e^{i\frac{k'x}{\hbar}}$$

$$k' \rightarrow ik$$

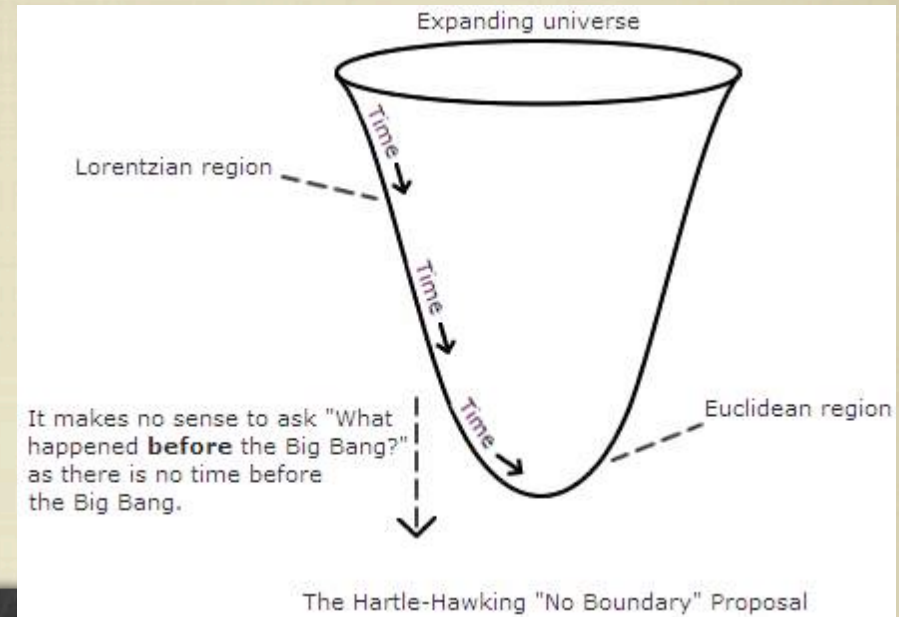
El efecto túnel (región prohibida clásicamente) se puede relacionar con una situación permitida clásicamente mediante una rotación a tiempo euclídeo

Big Bang

“No boundary”: La propuesta de “no-frontera”

J. Hartle, S. Hawking

Un espacio-tiempo emerge como fluctuación cuántica (efecto túnel de “la nada”)



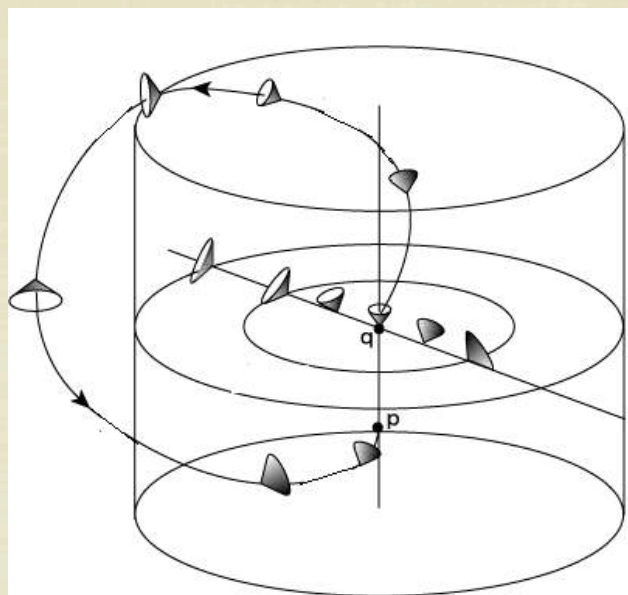
Viajes en el tiempo



Gödel y Einstein

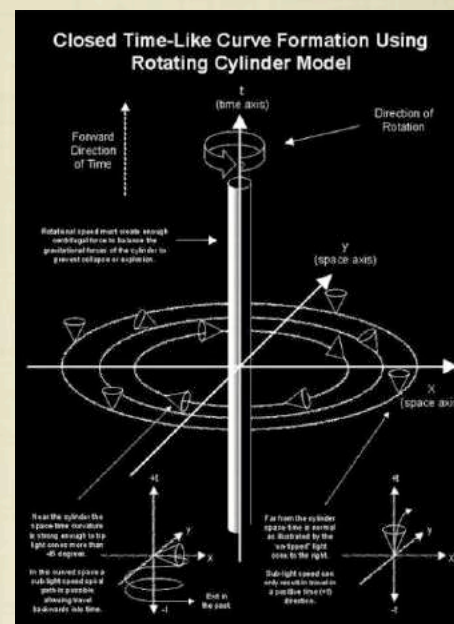
Curvas temporales cerradas (CTCs)

Descripción matemática de la idea intuitiva de viaje al pasado
Existen incluso en soluciones de Relatividad General clásica



Universo en rotación Gödel, 1949

$$ds^2 = \frac{1}{2\omega^2} [-(dt + e^x dz)^2 + dx^2 + dy^2 + \frac{1}{2} e^{2x} dz^2],$$



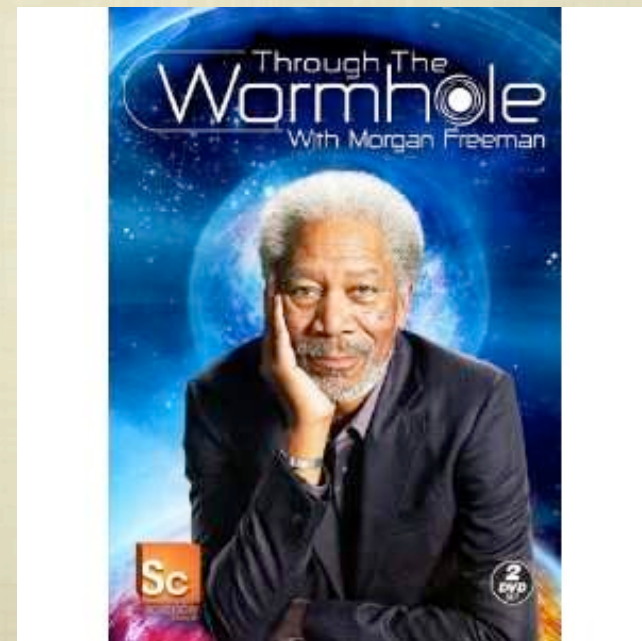
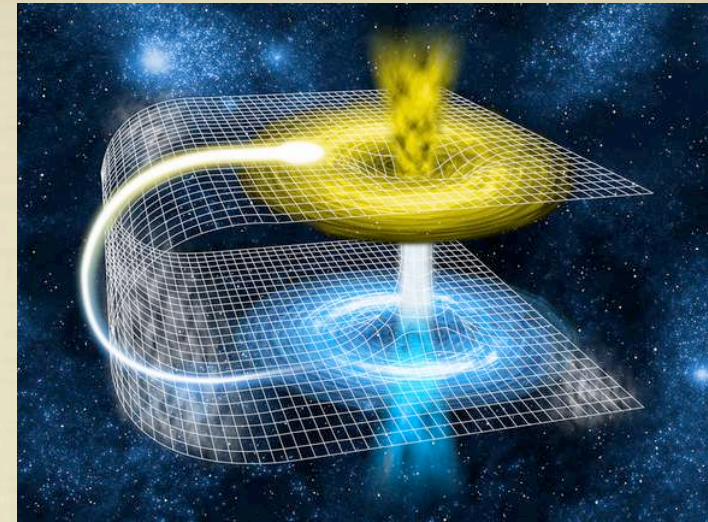
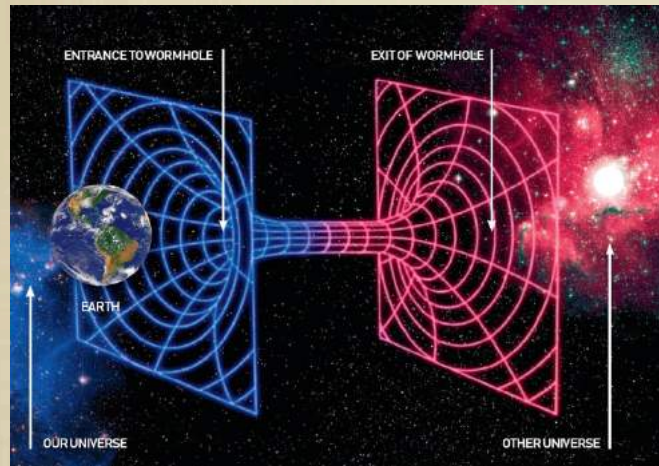
Cilindro de Tipler

CTCs en Gödel, Tipler, Kerr: Regiones infinitas, o horizontes

CTCs en región finita sin horizontes requieren energía negativa (Hawking).

Agujeros de gusano

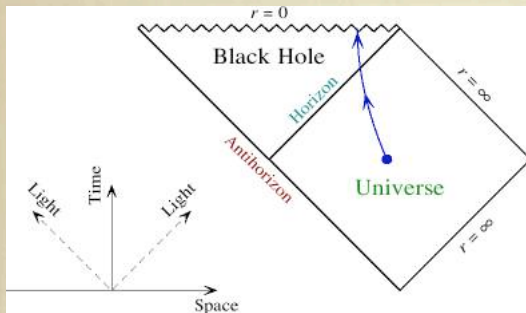
Otra variante de los viajes en el espacio-tiempo



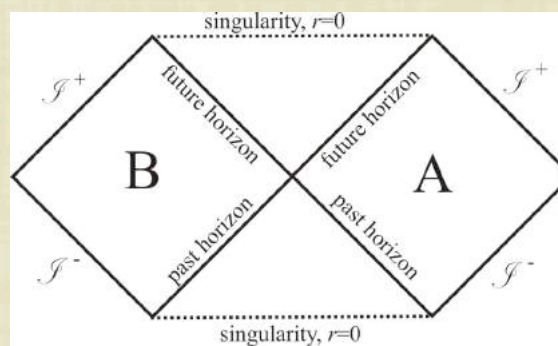
Agujeros de gusano

Existen en “cierto” sentido en soluciones de Relatividad General clásica (asumiendo que Relatividad General describe correctamente la región tras el horizonte, y que tiene significado físico: **Extensión de Kruskal**)

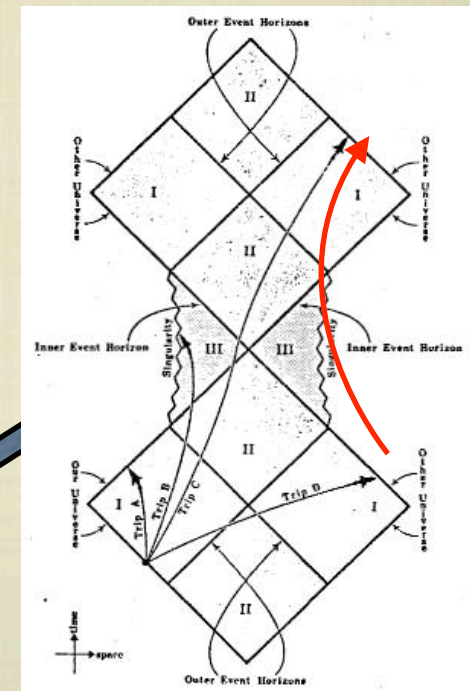
Agujero negro (Schwarzschild)



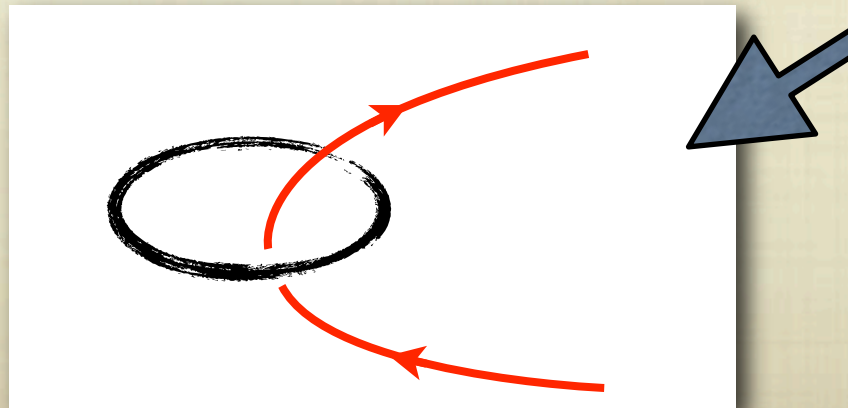
Agujero de gusano no atravesable



Agujero negro de Kerr (agujero de gusano atravesable)



Singularidades en forma de anillo



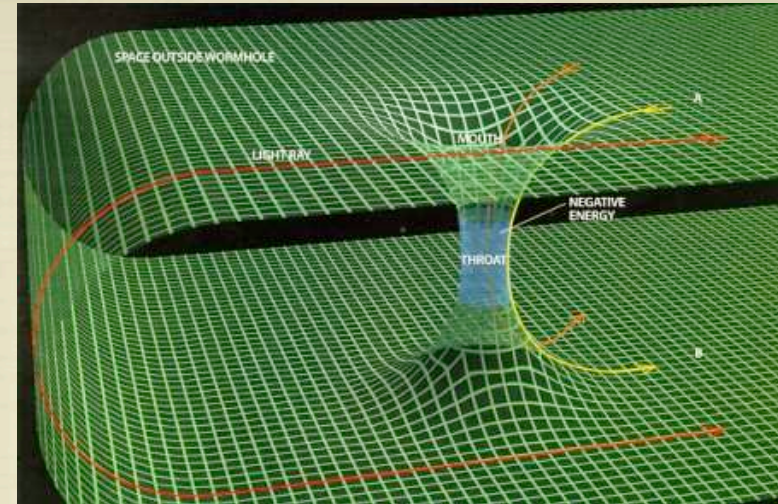
Agujeros de gusano

Ingredientes explotados en “Contacto” de Carl Sagan



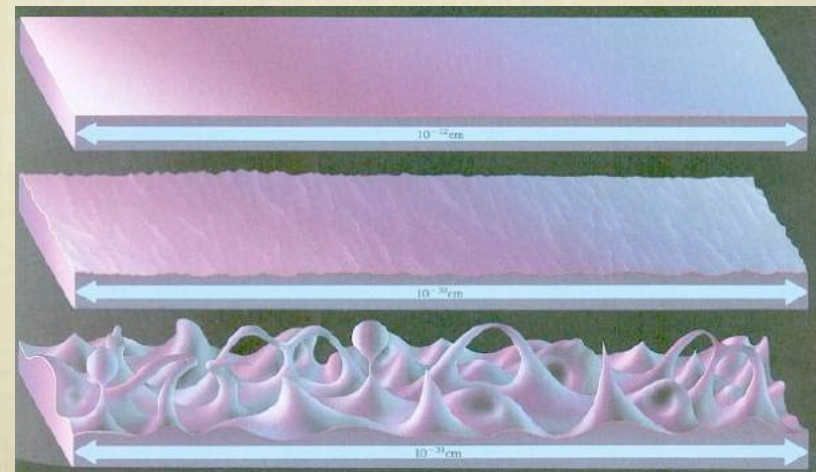
Agujeros de gusano

Agujeros de gusano clásicos sin horizontes requieren energías negativas



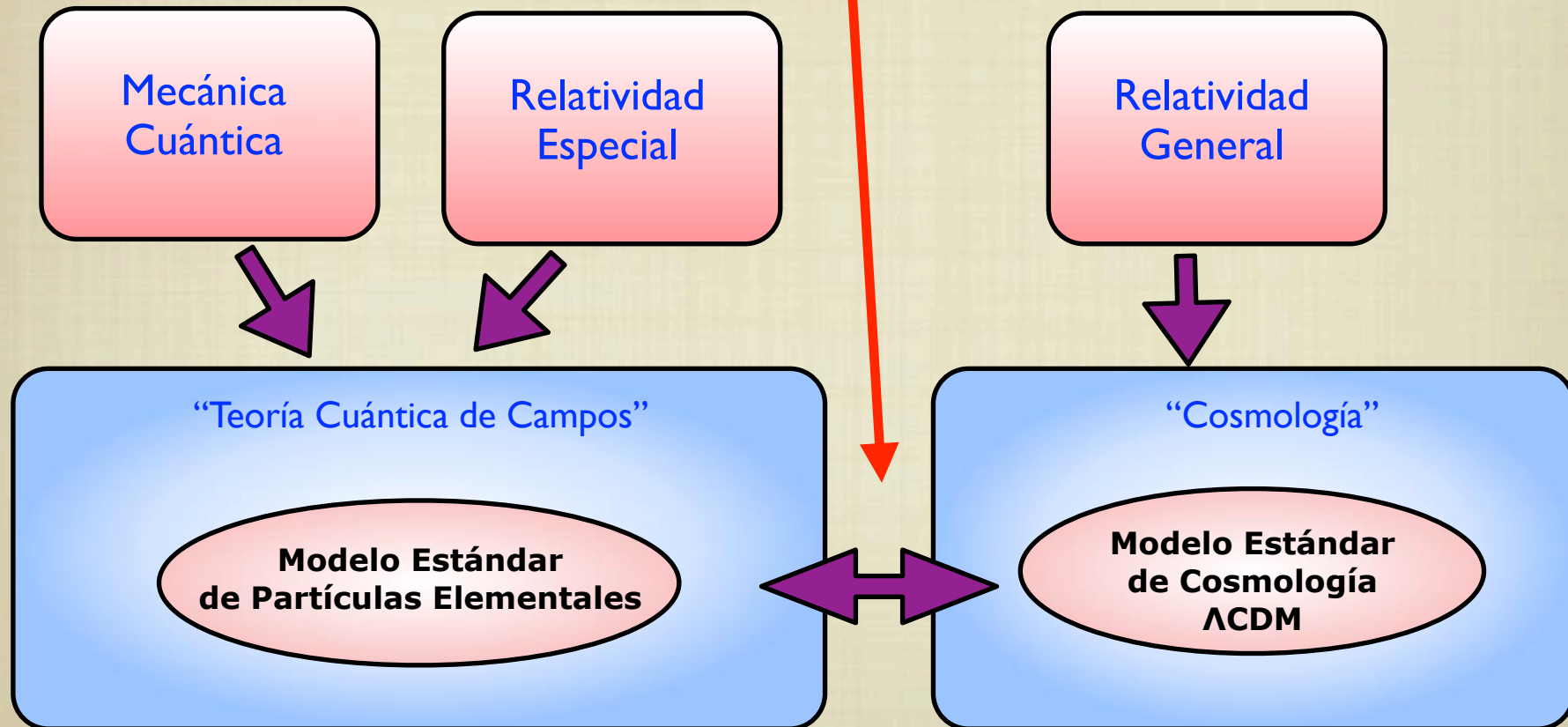
Quizás agujeros de gusano cuánticos
Fluctuaciones de la topología
del espacio-tiempo

¿“Quantum foam”?



Conclusiones

Un matrimonio complicado



¿Cómo cuadran estas dos construcciones?