



Gravedad Cuántica

en busca del Santo Grial de la Física



Bert Janssen

Dpto. de Física Teórica y del Cosmos & CAFPE



Gravedad Cuántica

en busca del Santo Grial de la Física



Bert Janssen

Dpto. de Física Teórica y del Cosmos & CAFPE

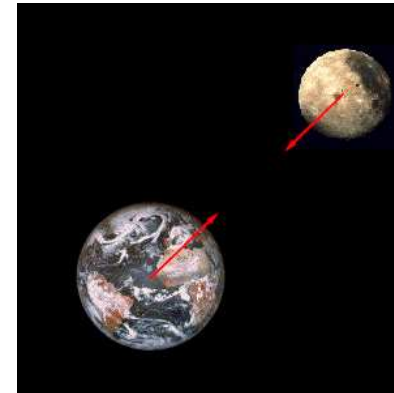
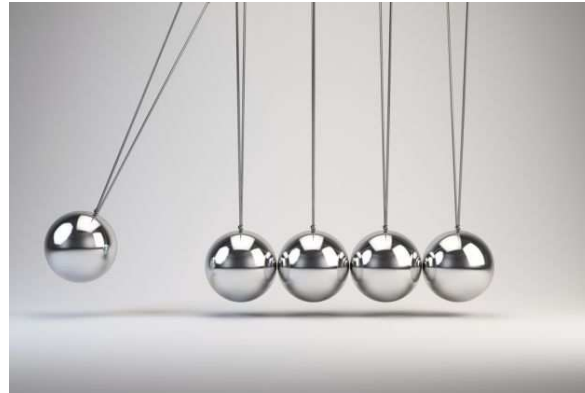
Índice

1. ¿Por qué gravedad cuántica?
2. La constante cosmológica
3. Evaporación de agujeros negros
4. Más indicaciones
5. Teoría cuántica lazos
6. Teoría de cuerdas
7. Resumen

1. Por qué gravedad cuántica?

Física clásica pre-1900

- **Mecánica newtoniana:** dinámica de partículas & interacción gravitatoria

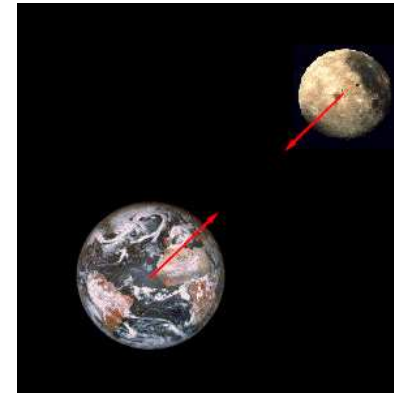
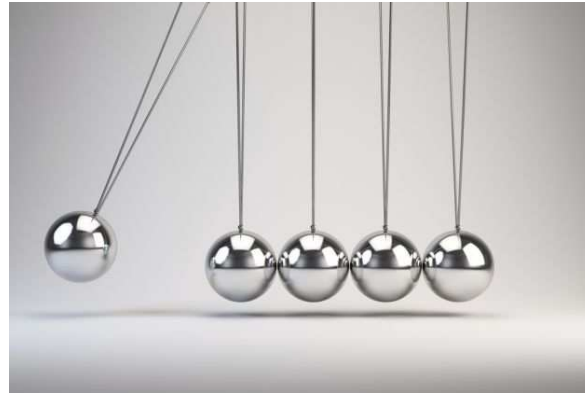


→ interacción a través de fuerzas

1. Por qué gravedad cuántica?

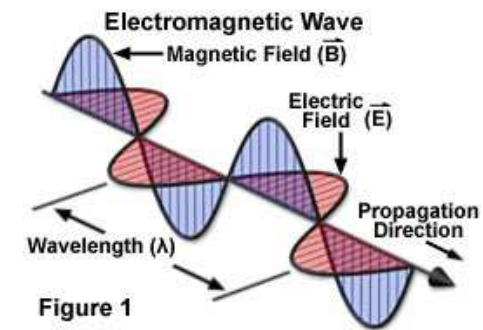
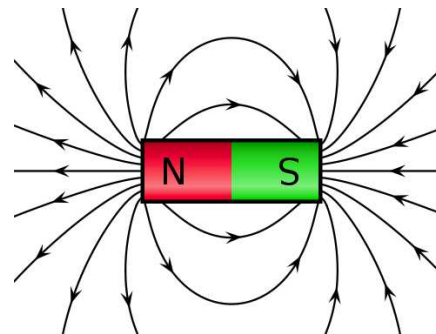
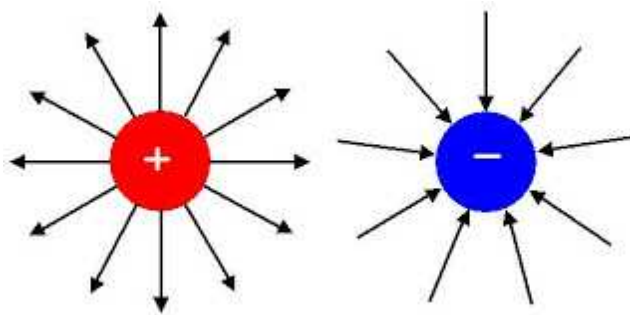
Física clásica pre-1900

- **Mecánica newtoniana:** dinámica de partículas & interacción gravitatoria



→ interacción a través de fuerzas

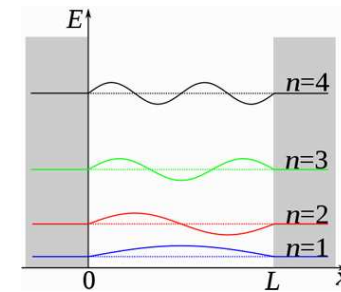
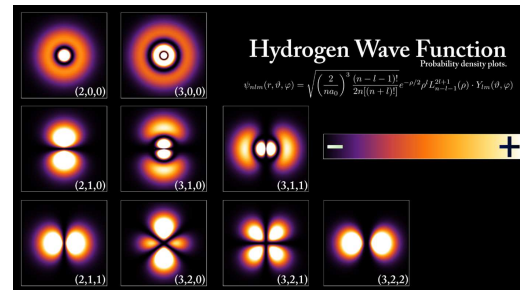
- **Teoría de Maxwell:** teoría de campos dinámicos



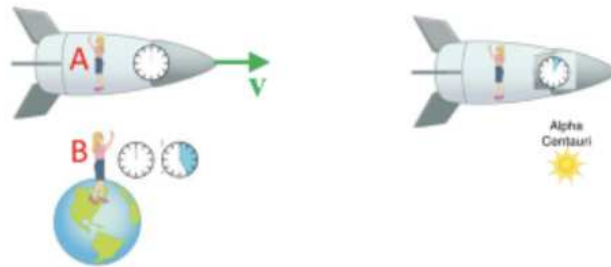
→ interacción a través de campos

Revoluciones físicas de 1900 - 1930:

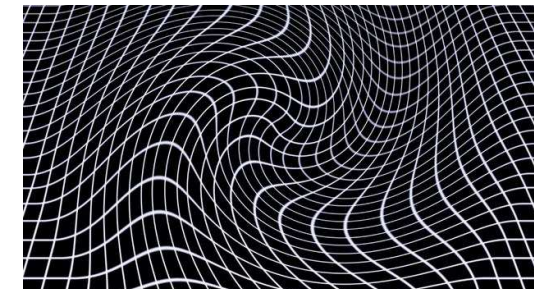
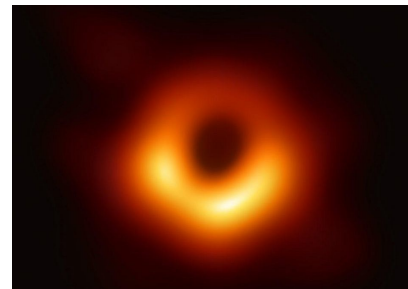
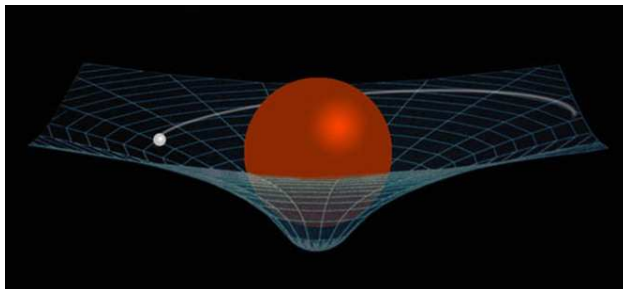
- **Mecánica cuántica:** descripción del mundo (sub)atómico



- **Relatividad especial:** formulación covariante de mecánica newtoniana



- **Relatividad general:** gravedad como teoría de campos



Tres constantes fundamentales:

- Constante de Planck \hbar : efectos cuánticos
- Velocidad de la luz c : efectos relativistas
- Constante de Newton G_N : efectos gravitatorios

Tres constantes fundamentales:

- Constante de Planck \hbar : efectos cuánticos
- Velocidad de la luz c : efectos relativistas
- Constante de Newton G_N : efectos gravitatorios

Unidades de Planck: unidades naturales universales

$$\ell_P = \sqrt{\frac{\hbar G_N}{c^3}} = 1,616199(97) \cdot 10^{-35} m$$

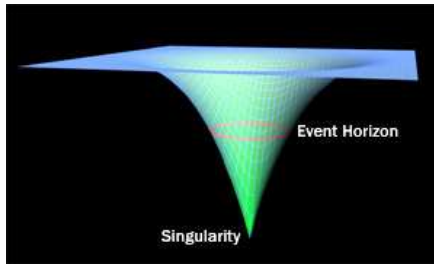
$$m_P = \sqrt{\frac{c \hbar}{G_N}} = 2,17651(13) \cdot 10^{-8} kg$$

$$t_P = \sqrt{\frac{\hbar G_N}{c^5}} = 5,39106(32) \cdot 10^{-44} s$$

—→ escalas donde **efectos cuánticos, relativistas y gravitatorios** son importantes a la vez

Unificando teorías

- Relatividad General = Relatividad Especial & gravedad



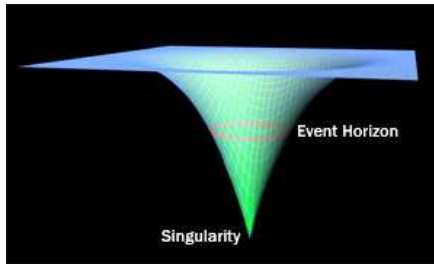
Teoría puramente clásica

Predice su propio rango de validez

→ teoría incompleta!

Unificando teorías

- Relatividad General = Relatividad Especial & gravedad

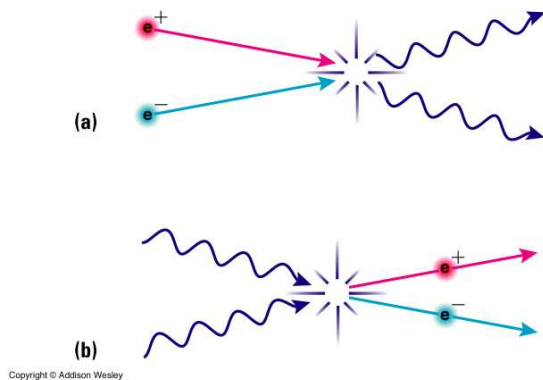


Teoría puramente clásica

Predice su propio rango de validez

→ teoría incompleta!

- Teoría Cuántica de Campos = Mecánica Cuántica & Relatividad Especial



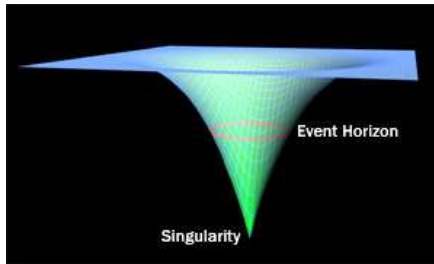
Creación y aniquilación de partículas

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma \quad \text{con } E_\gamma \geq m_e$$

$$2\gamma \rightarrow e^- + e^+ \quad \text{cuando } E_\gamma \geq m_e$$

Unificando teorías

- Relatividad General = Relatividad Especial & gravedad

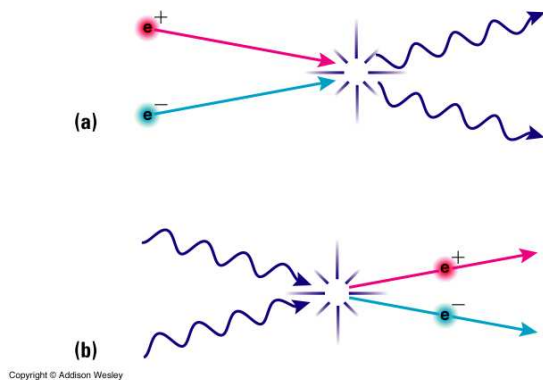


Teoría puramente clásica

Predice su propio rango de validez

→ teoría incompleta!

- Teoría Cuántica de Campos = Mecánica Cuántica & Relatividad Especial



Creación y aniquilación de partículas

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma \quad \text{con } E_\gamma \geq m_e$$

$$2\gamma \rightarrow e^- + e^+ \quad \text{cuando } E_\gamma \geq m_e$$

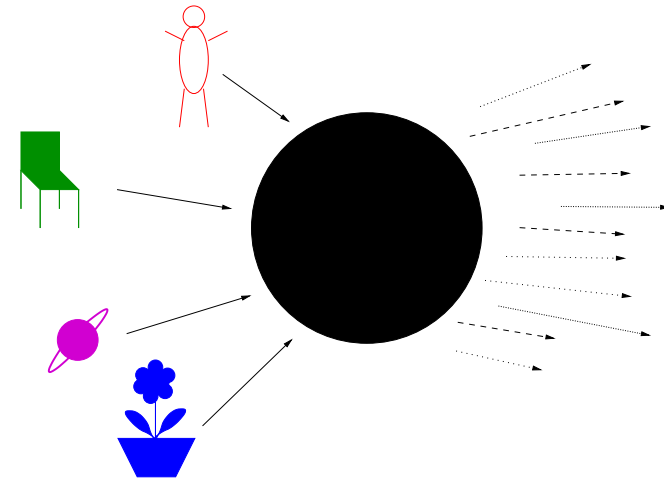
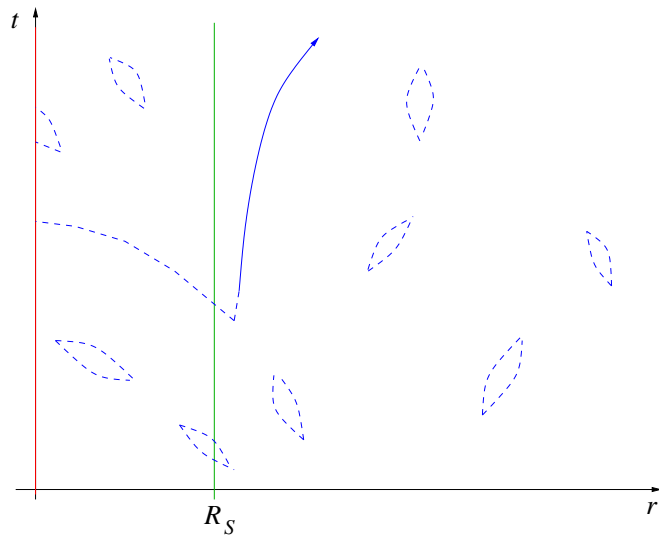
→ Partículas son excitaciones (cuántos) de campos:

fotón γ es excitación de $\vec{E}(x)$ y $\vec{B}(x)$

electrón e^- es excitación de $\psi(x)$

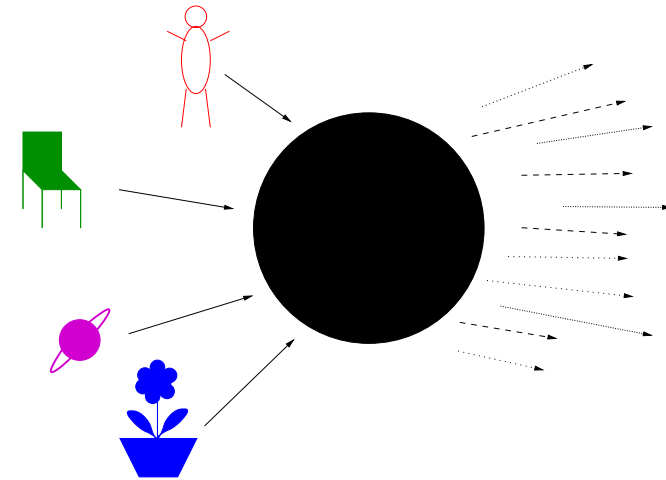
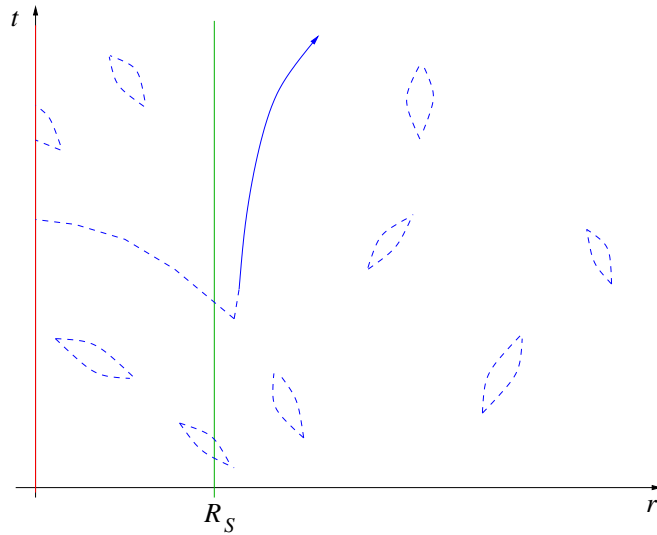
→ describe 3 de las 4 interacciones fundamentales

Teoría cuántica de campos en espacios curvos = Relat General & TCC



→ Gravedad clásica!

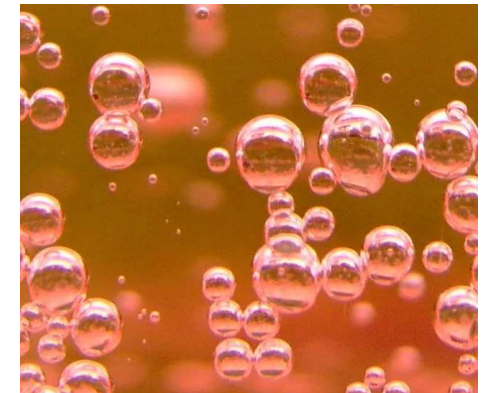
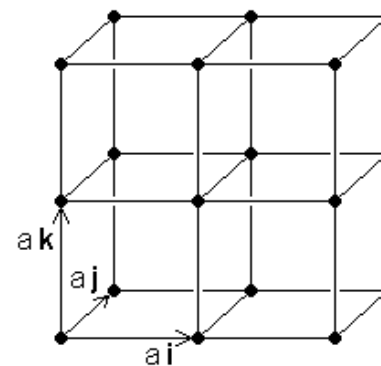
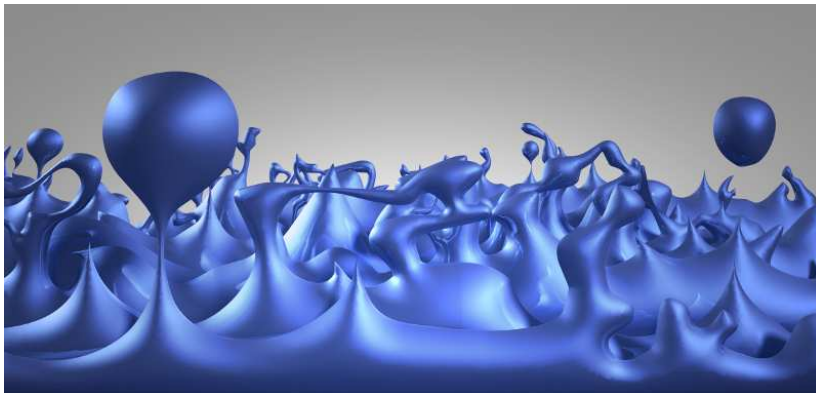
Teoría cuántica de campos en espacios curvos = Relat General & TCC



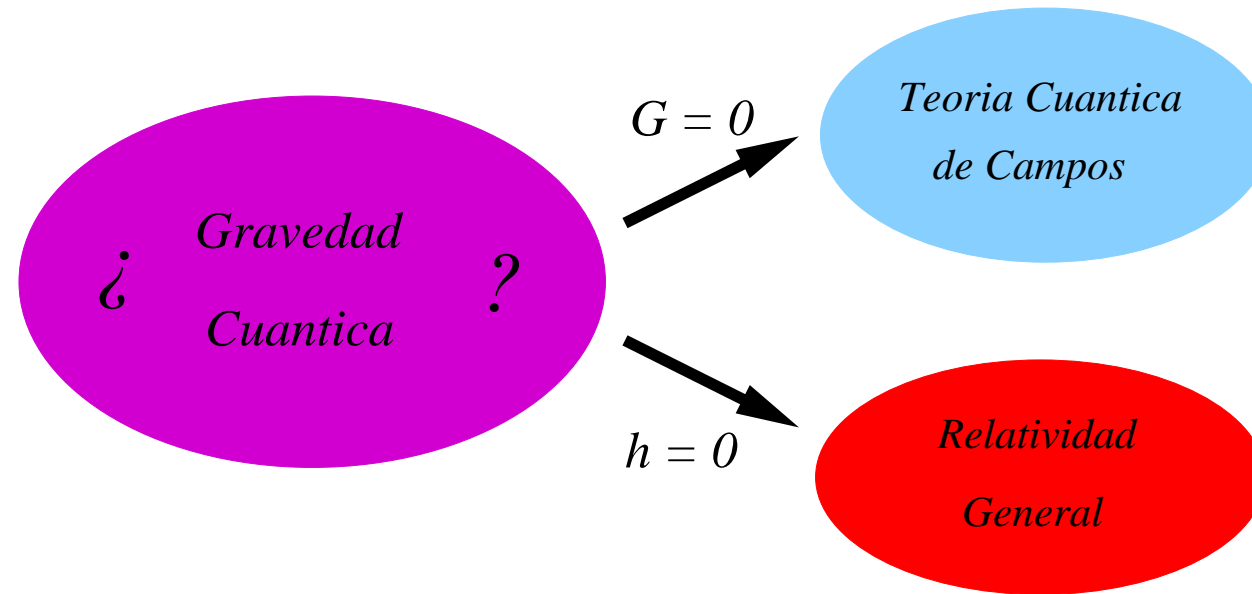
→ Gravedad clásica!

Gravedad cuántica = teoría cuántica del espaciotiempo mismo

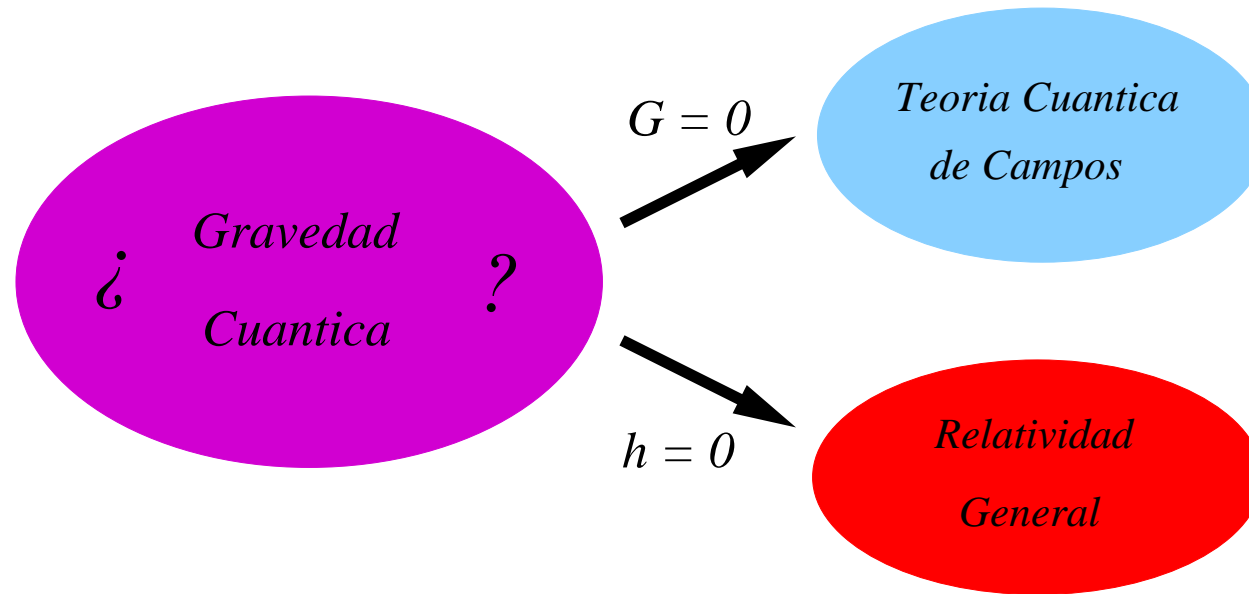
→ Concepto clásico de espaciotiempo deja de ser válido



Queremos teoría que recupere tanto Relatividad General, como TCC



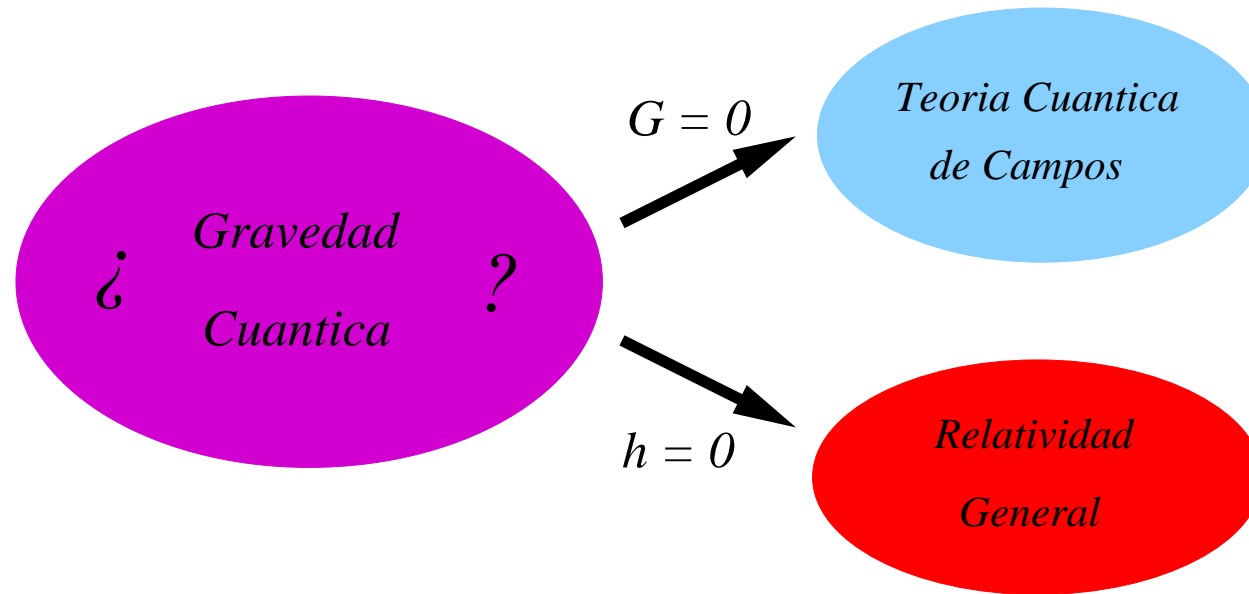
Queremos teoría que recupere tanto Relatividad General, como TCC



Escala cuántica: longitud de onda de Compton $\lambda_C = \frac{\hbar}{mc}$

Escala de gravedad: radio de Schwarzschild $R_s = \frac{2G_N m}{c^2}$

Queremos teoría que recupere tanto Relatividad General, como TCC



Escala cuántica: longitud de onda de Compton $\lambda_C = \frac{\hbar}{mc}$

Escala de gravedad: radio de Schwarzschild $R_s = \frac{2G_N m}{c^2}$

$$R_s = \lambda_C \iff m \sim m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G_N}} \sim 10^{15} \text{ TeV} \sim 10^{15} E_{LHC}$$

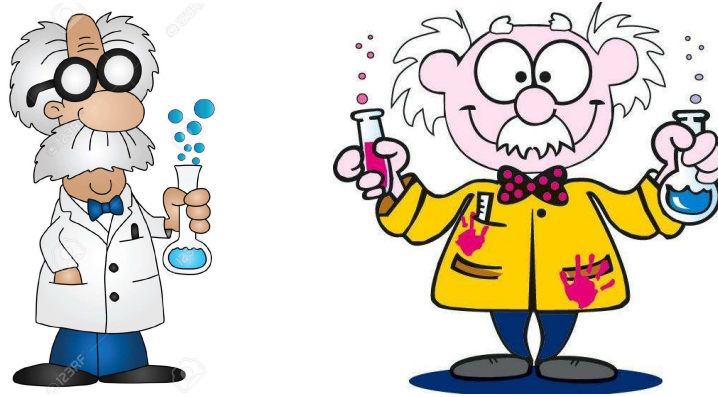
$$\iff L \sim \ell_P = \sqrt{\frac{G_N \hbar}{c^3}} \sim 10^{-35} \text{ m} \sim 10^{-19} R_{p+}$$

→ Completamente fuera del alcance experimental!

Entonces, ¿por qué preocuparse?

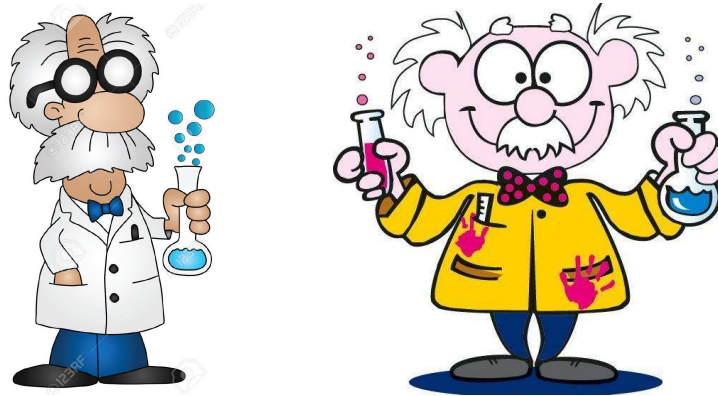
Entonces, ¿por qué preocuparse?

- ¡No lo hagas! Sigue con tus experimentos...

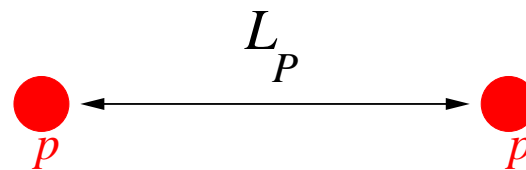


Entonces, ¿por qué preocuparse?

- ¡No lo hagas! Sigue con tus experimentos...



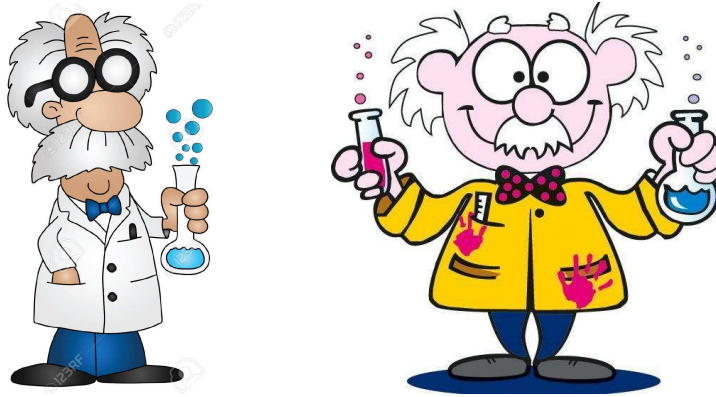
- Porque es una pregunta válida sin respuesta!



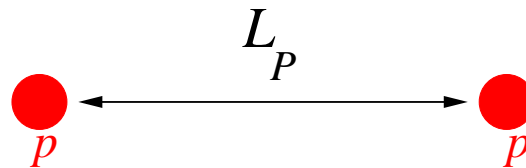
→ ¿Qué pasa si pongo dos protones a una distancia $L = \ell_P$?

Entonces, ¿por qué preocuparse?

- ¡No lo hagas! Sigue con tus experimentos...



- Porque es una pregunta válida sin respuesta!



→ ¿Qué pasa si pongo dos protones a una distancia $L = \ell_P$?

- Porque hay cosas que no entendemos a escalas más bajas
→ constante cosmológica, evaporación de agujeros negros,
problema de Jerarquía, expansión acelerada del universo, ...

2. La constante cosmológica

Introducida por Einstein en 1917 para conseguir un universo estático:

“...que las ecuaciones de gravedad que he defendido hasta ahora necesitan una pequeña modificación.”

$$\mathcal{R}_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \mathcal{R} + \kappa g_{\mu\nu} \Lambda = -\kappa T_{\mu\nu}$$

2. La constante cosmológica

Introducida por Einstein en 1917 para conseguir un universo estático:

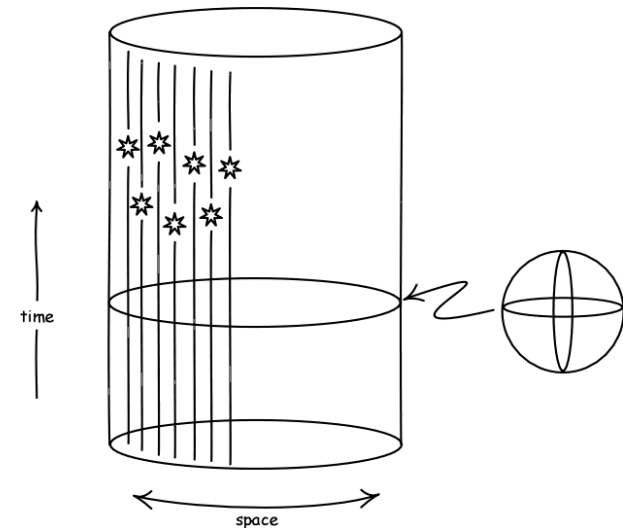
“...que las ecuaciones de gravedad que he defendido hasta ahora necesitan una pequeña modificación.”

$$\mathcal{R}_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \mathcal{R} + \kappa g_{\mu\nu} \Lambda = -\kappa T_{\mu\nu}$$

The diagram shows the Friedmann acceleration equation with labels for each term:

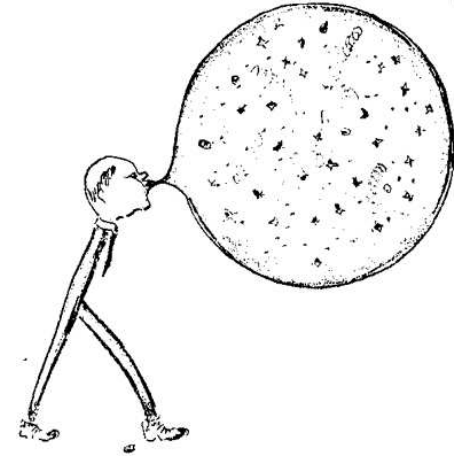
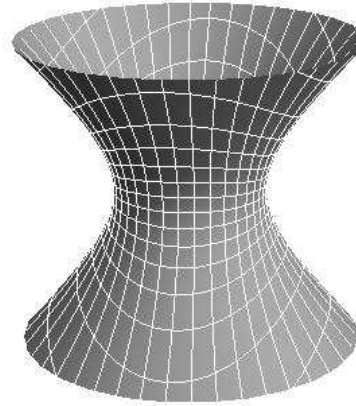
$$\boxed{\frac{\ddot{a}}{a}} = - \boxed{\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3p)} + \boxed{\frac{\Lambda}{3}}$$

- acceleration**: $\frac{\ddot{a}}{a}$
- gravity**: $\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3p)$ (labeled "slows down expansion")
- cosmological constant**: $\frac{\Lambda}{3}$ (labeled "speeds up expansion")

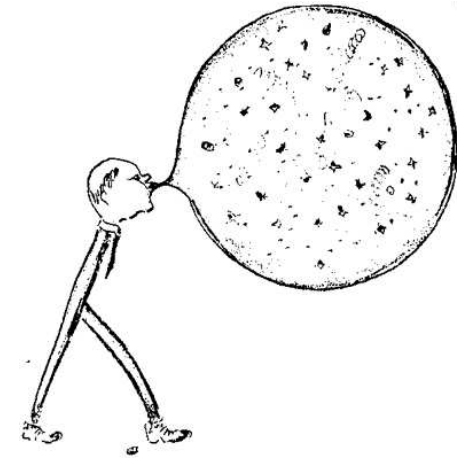
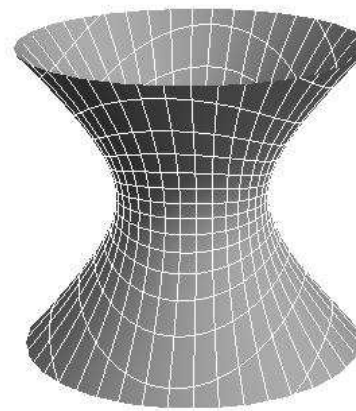


- Término **introducido ad hoc**
- Genera **repulsión gravitatoria universal**

De Sitter: universo vacío en expansión exponencial gracias a Λ

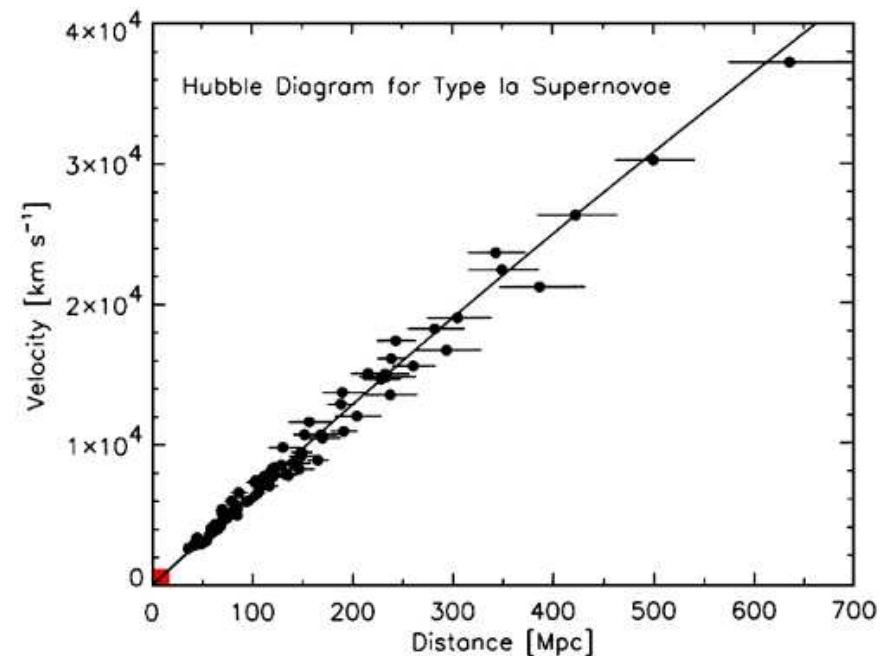
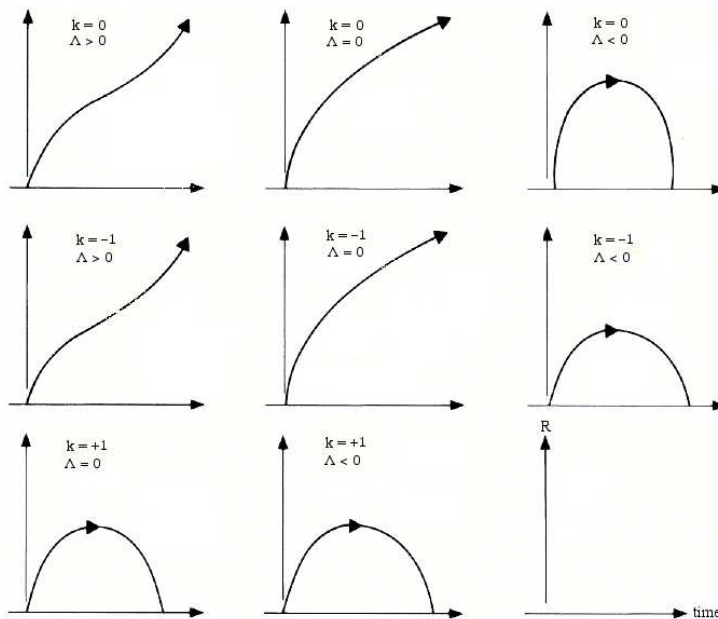


De Sitter: universo vacío en expansión exponencial gracias a Λ

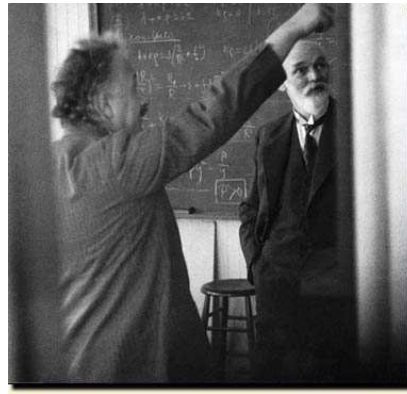


Friedmann & Lemaître: soluciones exactas de universos dinámicos

Hubble: diagrama observacional de redshift de galaxias

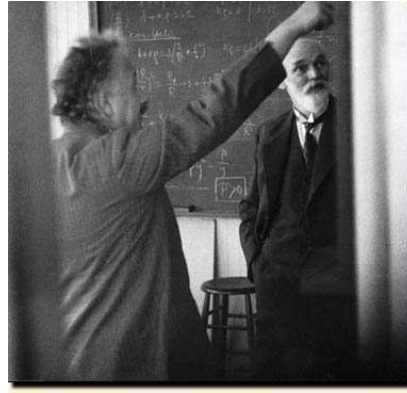


De Sitter y Eddington convencen a Einstein de universos dinámicos



Einstein retira constante cosmológica como “el error más grande de su vida”

De Sitter y Eddington convencen a Einstein de universos dinámicos

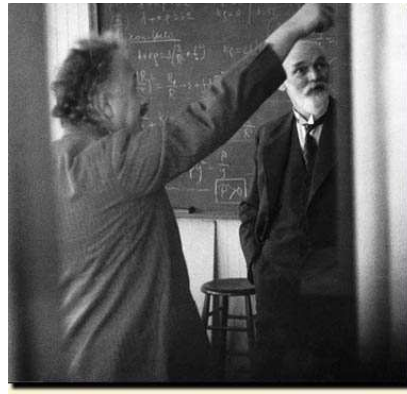


Einstein retira constante cosmológica como “el error más grande de su vida”

¿Por qué de todos los valores posibles, $\Lambda = 0$ en nuestro universo?

$$\mathcal{R}_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \mathcal{R} + \kappa g_{\mu\nu} \Lambda = -\kappa \mathcal{T}_{\mu\nu}$$

De Sitter y Eddington convencen a Einstein de universos dinámicos

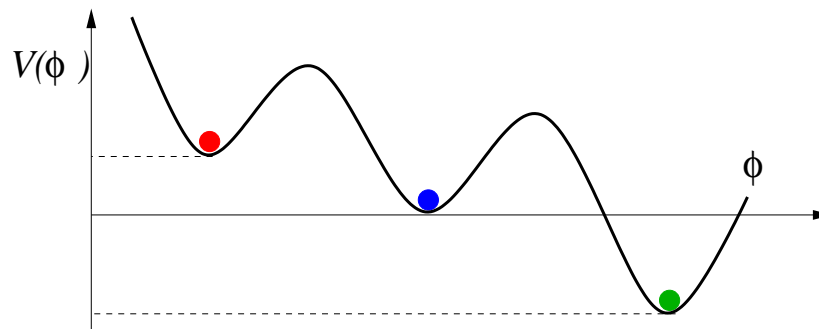


Einstein retira constante cosmológica como “el error más grande de su vida”

¿Por qué de todos los valores posibles, $\Lambda = 0$ en nuestro universo?

$$\mathcal{R}_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \mathcal{R} + \kappa g_{\mu\nu} \Lambda = -\kappa \mathcal{T}_{\mu\nu}$$

En relatividad general: cualquier tipo de energía contribuye a $\mathcal{T}_{\mu\nu}$



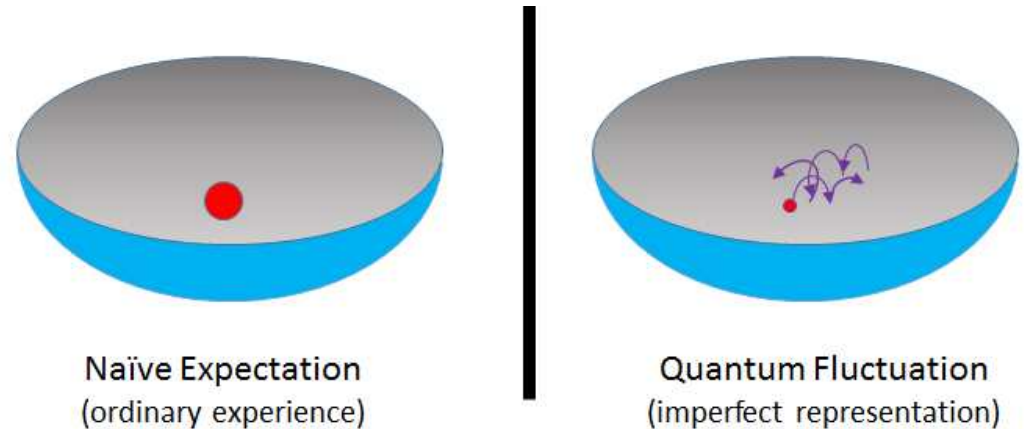
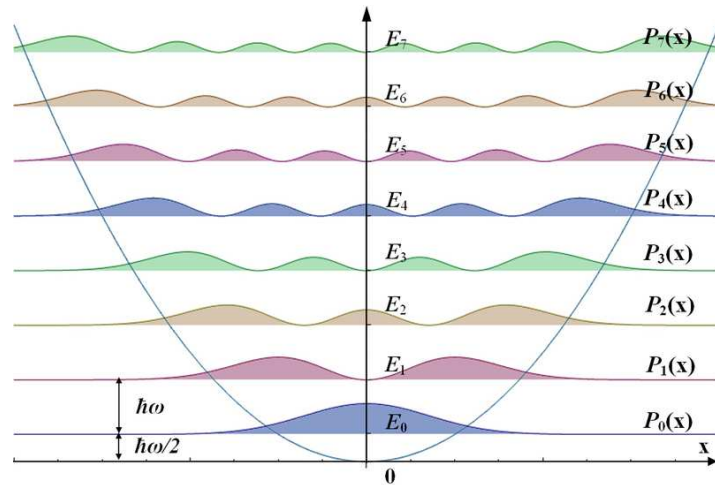
Energía potencial constante $V_0 \neq 0$ induce una cte cosm efectiva $\Lambda_{\text{eff}} = V_0$

En 1934, Lemaître identifica Λ con la energía del vacío: $[\Lambda] = \text{ML}^{-3}$

→ ¿Por qué la energía del vacío es exactamente cero?

En 1934, Lemaître identifica Λ con la **energía del vacío**: $[\Lambda] = \text{ML}^{-3}$
 —→ ¿Por qué la energía del vacío es exactamente cero?

Oscilador armónico cuántico: $H = \frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + \frac{1}{2} m \omega x^2$

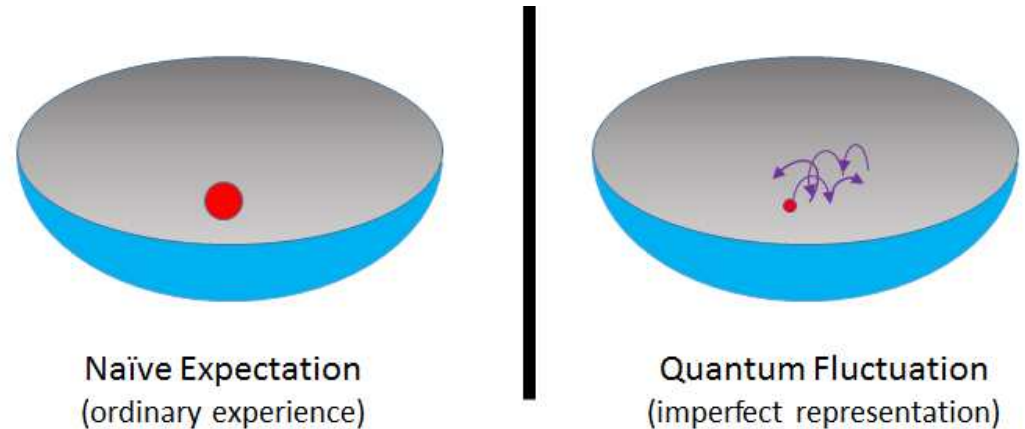
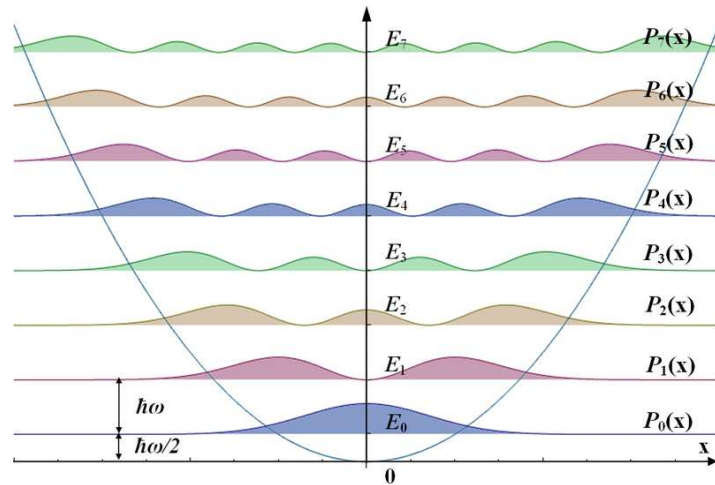


M. Strassler 2013

- **Energía del punto cero**: estado más bajo tiene energía $E_0 = \frac{1}{2} \hbar \omega$
 —→ **Energía del vacío positivo!**

En 1934, Lemaître identifica Λ con la energía del vacío: $[\Lambda] = \text{ML}^{-3}$
 → ¿Por qué la energía del vacío es exactamente cero?

Oscilador armónico cuántico: $H = \frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + \frac{1}{2} m \omega x^2$

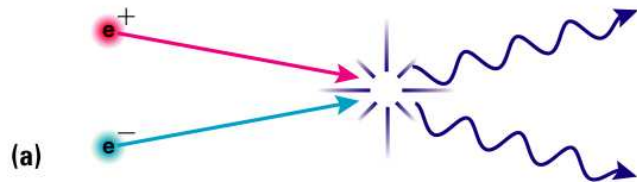


M. Strassler 2013

- **Energía del punto cero:** estado más bajo tiene energía $E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$
 → Energía del vacío positivo!
- Principio de Incertidumbre: $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{1}{2}\hbar$ induce fluctuaciones cuánticas con $E_0 \neq 0$

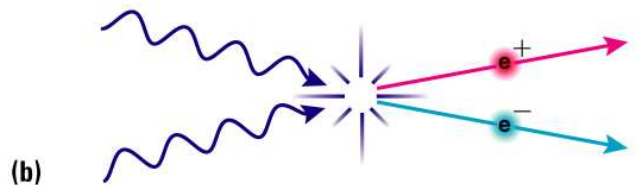
Teoría Cuántica de Campos = Mecánica Cuántica & Relatividad Especial

Einstein: $E = mc^2$



Aniquilación de electrón y positrón:

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma \quad \text{con } E_\gamma \geq m_e$$



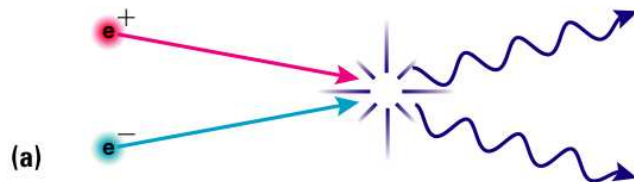
Creación de electrón y positrón:

$$2\gamma \rightarrow e^- + e^+ \quad \text{cuando } E_\gamma \geq m_e$$

Copyright © Addison Wesley

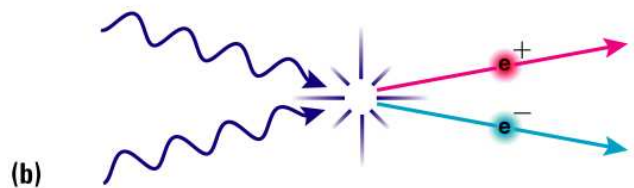
Teoría Cuántica de Campos = Mecánica Cuántica & Relatividad Especial

Einstein: $E = mc^2$



Aniquilación de electrón y positrón:

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma \quad \text{con } E_\gamma \geq m_e$$

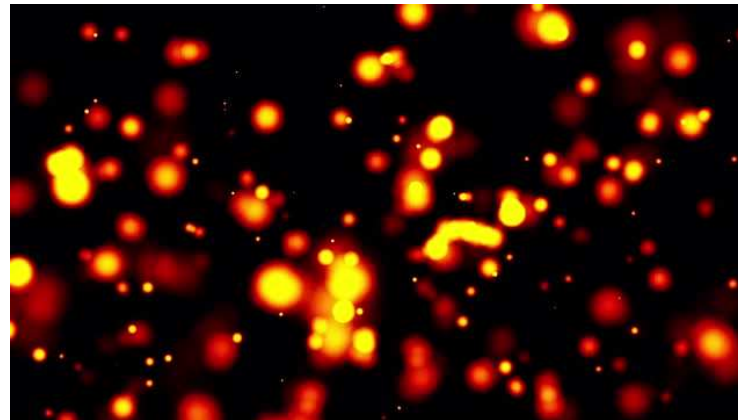
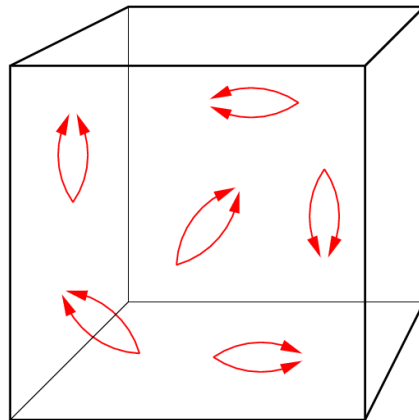


Creación de electrón y positrón:

$$2\gamma \rightarrow e^- + e^+ \quad \text{cuando } E_\gamma \geq m_e$$

Copyright © Addison Wesley

Heisenberg: $\Delta E \cdot \Delta t > \frac{1}{2}\hbar$



—> Vacío cuántico es sopa de partículas virtuales: Efecto Casimir

1967: Zel'dovich: contribución de fluctuaciones cuánticas a Λ



$$\langle 0|H|0\rangle = \frac{1}{2} \delta_k^3(0) \int d^3k \omega_k \not\sim \infty$$

Cut-off a la escala de Planck:

$$\rho_{\text{vac}} \sim 10^{120} \text{ GeV}/m^3$$

No concuerda con observaciones cosmológicas:

$$|\rho_{\text{obs}}| \lesssim 1 \text{ GeV}/m^3$$

1967: Zel'dovich: contribución de fluctuaciones cuánticas a Λ



$$\langle 0|H|0\rangle = \frac{1}{2} \delta_k^3(0) \int d^3k \omega_k \not\sim \infty$$

Cut-off a la escala de Planck:

$$\rho_{\text{vac}} \sim 10^{120} \text{ GeV}/m^3$$

No concuerda con observaciones cosmológicas:

$$|\rho_{\text{obs}}| \lesssim 1 \text{ GeV}/m^3$$

—→ **Peor predicción teórica de la historia!!!**

1967: Zel'dovich: contribución de fluctuaciones cuánticas a Λ



$$\langle 0|H|0\rangle = \frac{1}{2} \delta_k^3(0) \int d^3k \omega_k \not\sim \infty$$

Cut-off a la escala de Planck:

$$\rho_{\text{vac}} \sim 10^{120} \text{ GeV}/m^3$$

No concuerda con observaciones cosmológicas:

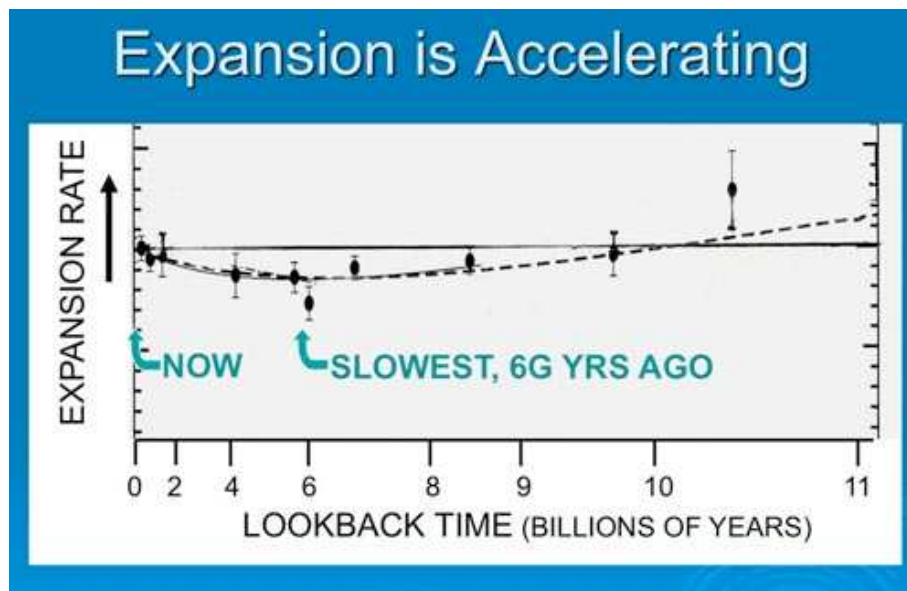
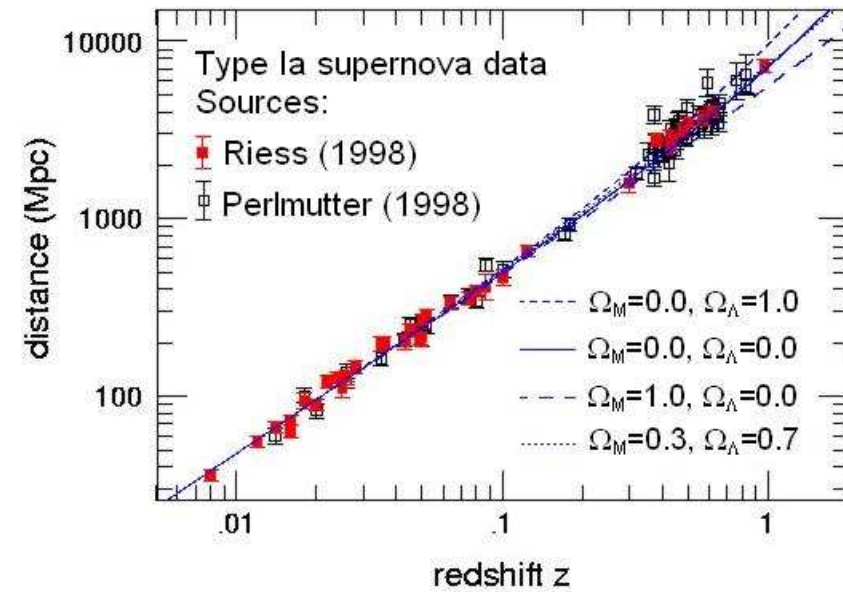
$$|\rho_{\text{obs}}| \lesssim 1 \text{ GeV}/m^3$$

—→ **Peor predicción teórica de la historia!!!**

Problema (viejo) de la constante cosmológica:

¿Por qué la energía de las fluctuaciones cuánticas no contribuyen a la expansión del Universo?

Rastreo de supernovae Tipo Ia: expansión acelerada del universo



Mejor ajuste:

$$\rho_{\text{mat}} \sim 0,3 \rho_{\text{crit}}$$

$$\rho_{\Lambda} \sim 0,7 \rho_{\text{crit}}$$

→ **Energía oscura!**

Expansión acelerada del universo: fluido con presión negativa

Parámetro de estado w caracteriza el tipo de materia:

$$P = w \rho \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{ll} w = 0 & \text{materia fría} \\ w = 1/3 & \text{radiación} \\ w = -1 & \text{constante cosmológica} \\ w = -1,13^{+0,23}_{-0,25} & \text{energía oscura observada} \end{array} \right.$$

—→ ¿Energía oscura = constante cosmológica = energía del vacío?

Expansión acelerada del universo: fluido con presión negativa

Parámetro de estado w caracteriza el tipo de materia:

$$P = w \rho \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{ll} w = 0 & \text{materia fría} \\ w = 1/3 & \text{radiación} \\ w = -1 & \text{constante cosmológica} \\ w = -1,13^{+0,23}_{-0,25} & \text{energía oscura observada} \end{array} \right.$$

→ ¿Energía oscura = constante cosmológica = energía del vacío?

Cálculo teórico versus observaciones cosmológicas:

$$\rho_{\text{DE}} \sim 1 \text{ GeV}/m^3, \quad \ddot{a}(t_0) = 9,2 \cdot 10^{-10} m/s^2$$

$$\rho_{\text{vac}} \sim 10^{65} - 10^{120} \text{ GeV}/m^3$$

Expansión acelerada del universo: fluido con presión negativa

Parámetro de estado w caracteriza el tipo de materia:

$$P = w \rho \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{ll} w = 0 & \text{materia fría} \\ w = 1/3 & \text{radiación} \\ w = -1 & \text{constante cosmológica} \\ w = -1,13^{+0,23}_{-0,25} & \text{energía oscura observada} \end{array} \right.$$

→ ¿Energía oscura = constante cosmológica = energía del vacío?

Cálculo teórico versus observaciones cosmológicas:

$$\rho_{\text{DE}} \sim 1 \text{ GeV}/m^3, \quad \ddot{a}(t_0) = 9,2 \cdot 10^{-10} m/s^2$$

$$\rho_{\text{vac}} \sim 10^{65} - 10^{120} \text{ GeV}/m^3$$

→ Peor predicción teórica de la historia!

Problema (nuevo) de la constante cosmológica:

¿Son las fluctuaciones cuánticas la causa de la aceleración del universo?

- Si lo son, ¿por qué su contribución es tan baja?
- Si no, ¿cuál es la causa de la aceleración?

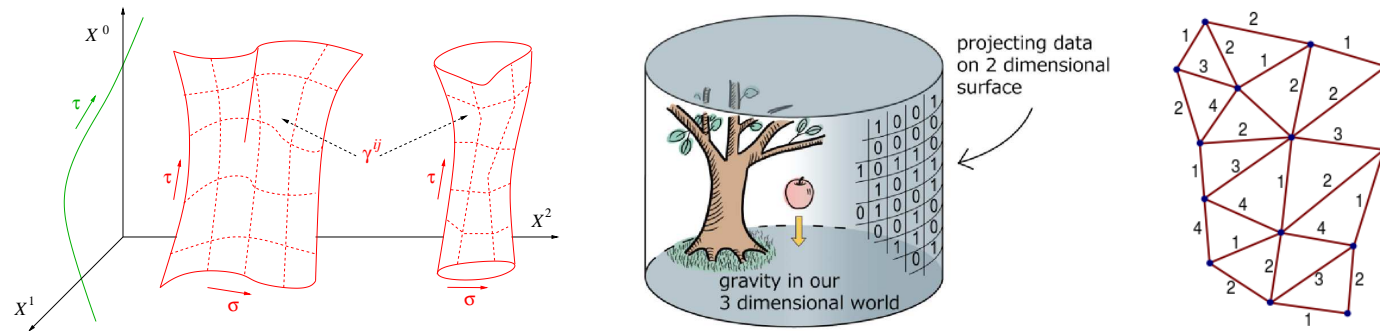
Problema (nuevo) de la constante cosmológica:

¿Son las fluctuaciones cuánticas la causa de la aceleración del universo?

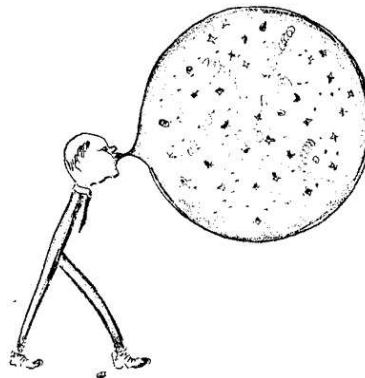
→ Si lo son, ¿por qué su contribución es tan baja?

→ Si no, ¿cuál es la causa de la aceleración?

Aún no conocemos los **grados de libertad cuanticos** de gravedad

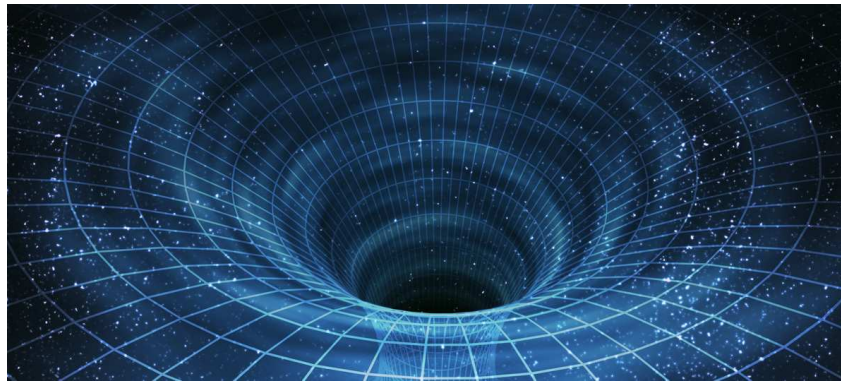
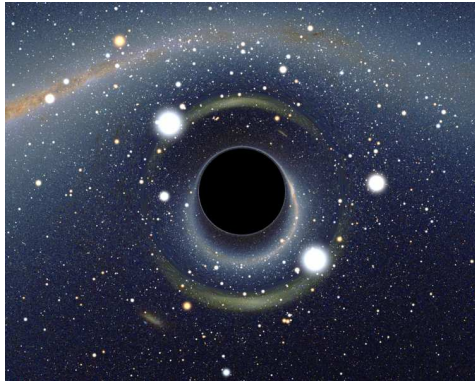


¿Resolverá la gravedad cuántica el problema de la constante cosmológica?



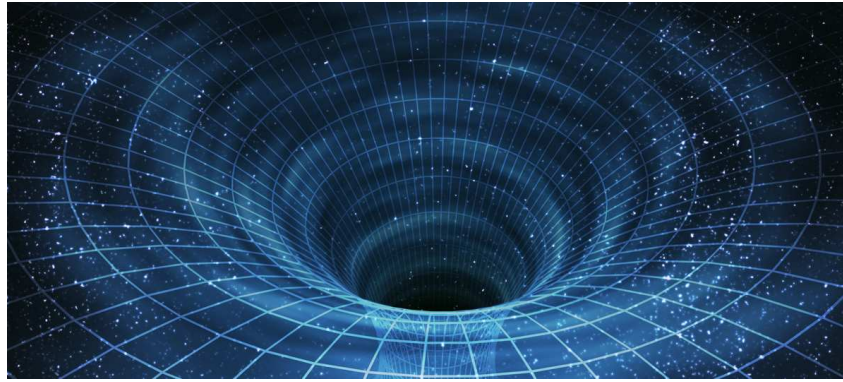
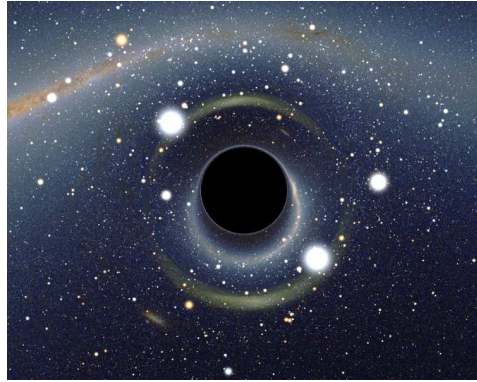
3. Evaporación de agujeros negros

Agujeros negros son objetos emblemáticos de Relatividad General

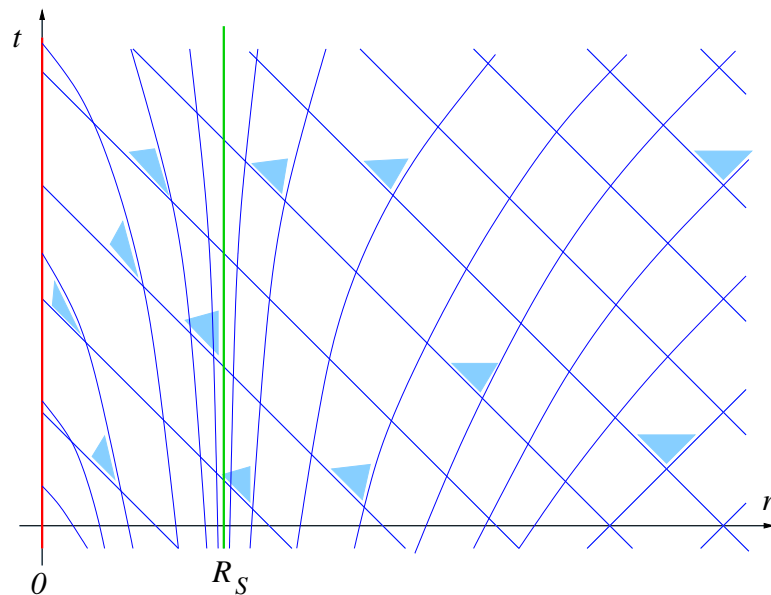


3. Evaporación de agujeros negros

Agujeros negros son objetos emblemáticos de Relatividad General



Agujero negro = zona de campo gravitatorio intenso que **no deja escapar señales causales** hacia fuera



Horizonte = punto de **no retorno**
= **frontera** del agujero negro
= **punto regular**

Singularidad = punto de **curv infinita**
= **final del espaciotiempo**
= **final de la física conocida**

En 1973, Bardeen, Carter y Hawking publicaron 4 teoremas:

Las Leyes de la Mecánica de Agujeros Negros

En 1973, Bardeen, Carter y Hawking publicaron 4 teoremas:

Las Leyes de la Mecánica de Agujeros Negros

- **Ley Cero:** En agujeros negros estacionarios, la **gravedad de superficie κ_H es constante** en todo el horizonte.

NB: Gravedad de superficie κ_H = fuerza ejercida por observador asintótico para mantener partícula estacionaria en el horizonte

En 1973, Bardeen, Carter y Hawking publicaron 4 teoremas:

Las Leyes de la Mecánica de Agujeros Negros

- **Ley Cero:** En agujeros negros estacionarios, la **gravedad de superficie κ_H es constante** en todo el horizonte.

NB: Gravedad de superficie κ_H = fuerza ejercida por observador asintótico para mantener partícula estacionaria en el horizonte

- **Primera Ley:** En procesos casi-estacionarios, M , A y J y Q varían como

$$dM = \frac{\kappa_H}{8\pi G_N} dA + \Omega_H dJ + \Phi_H dQ.$$

En 1973, Bardeen, Carter y Hawking publicaron 4 teoremas:

Las Leyes de la Mecánica de Agujeros Negros

- **Ley Cero:** En agujeros negros estacionarios, la **gravedad de superficie κ_H es constante** en todo el horizonte.

NB: Gravedad de superficie κ_H = fuerza ejercida por observador asintótico para mantener partícula estacionaria en el horizonte

- **Primera Ley:** En procesos casi-estacionarios, M , A y J y Q varían como

$$dM = \frac{\kappa_H}{8\pi G_N} dA + \Omega_H dJ + \Phi_H dQ.$$

- **Segunda Ley:** El **área del horizonte de un agujero negro nunca disminuye** en un proceso físico.

En 1973, Bardeen, Carter y Hawking publicaron 4 teoremas:

Las Leyes de la Mecánica de Agujeros Negros

- **Ley Cero:** En agujeros negros estacionarios, la **gravedad de superficie κ_H es constante** en todo el horizonte.

NB: Gravedad de superficie κ_H = fuerza ejercida por observador asintótico para mantener partícula estacionaria en el horizonte

- **Primera Ley:** En procesos casi-estacionarios, M , A y J y Q varían como

$$dM = \frac{\kappa_H}{8\pi G_N} dA + \Omega_H dJ + \Phi_H dQ.$$

- **Segunda Ley:** El **área del horizonte de un agujero negro nunca disminuye** en un proceso físico.
- **Tercera Ley:** **No es posible reducir la gravedad de superficie κ_H a cero** a través de procesos físicos en un tiempo finito.

→ Teoremas geométricos rigurosamente demostrados

Compara con **Leyes de la Termodinámica (S. XIX):**

- **Ley Cero:** En un sistema en equilibrio termodinámico, la **temperatura T es constante** en todo el sistema.
- **Primera Ley:** En procesos casi-estacionarios, E , S , V y N varían como

$$dE = T dS - P dV + \mu dN,$$

- **Segunda Ley:** **La entropía de un sistema cerrado nunca disminuye** en un proceso físico
- **Tercera Ley:** **No es posible reducir la temperatura T a cero absoluto** a través de procesos físicos en un tiempo finito.

Compara con **Leyes de la Termodinámica (S. XIX):**

- **Ley Cero:** En un sistema en equilibrio termodinámico, la **temperatura T es constante** en todo el sistema.
- **Primera Ley:** En procesos casi-estacionarios, E , S , V y N varían como

$$dE = T dS - P dV + \mu dN,$$

- **Segunda Ley:** **La entropía de un sistema cerrado nunca disminuye** en un proceso físico
- **Tercera Ley:** **No es posible reducir la temperatura T a cero absoluto** a través de procesos físicos en un tiempo finito.

Sugiere: **Agujero negro \sim sistema termodinámico**

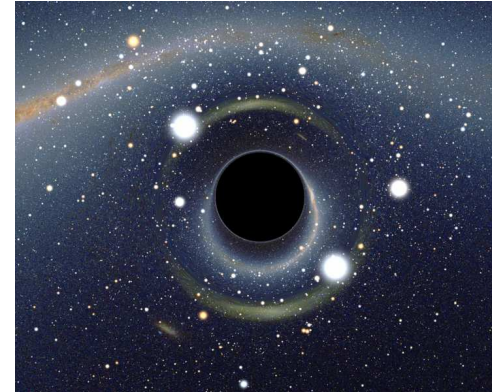
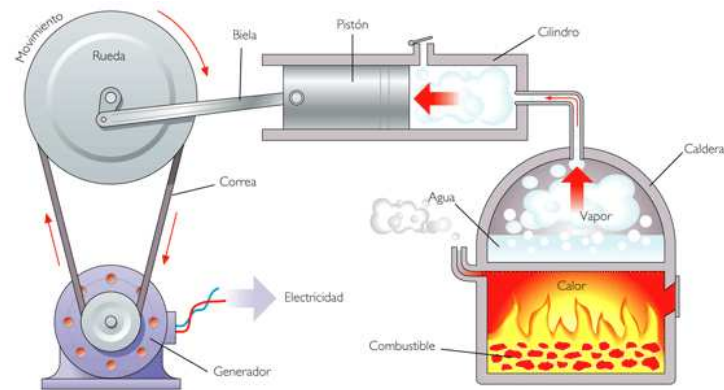
$M \sim E$ masa y energía relativista

$A \sim S$ \Leftrightarrow teorema de no-pelo: $S = 0$

$\kappa_H \sim T$ \Leftrightarrow agujero negro no emite nada: $T = 0$

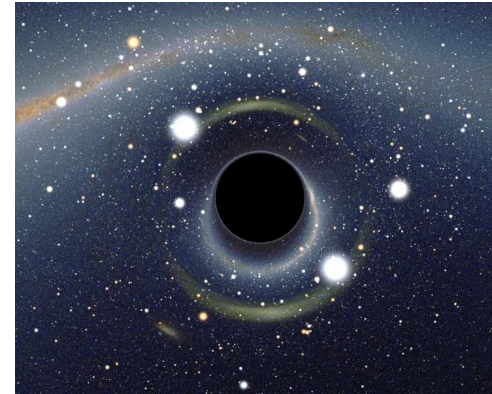
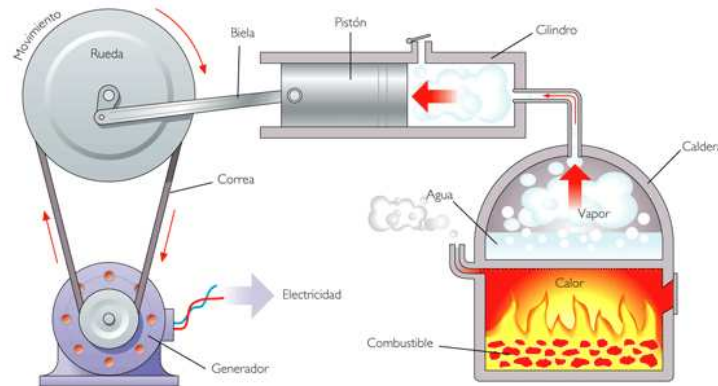
—→ ¿Cuál es la relación con agujeros negros?

Bardeen, Carter, Hawking: solo analogía, no hay relación física...

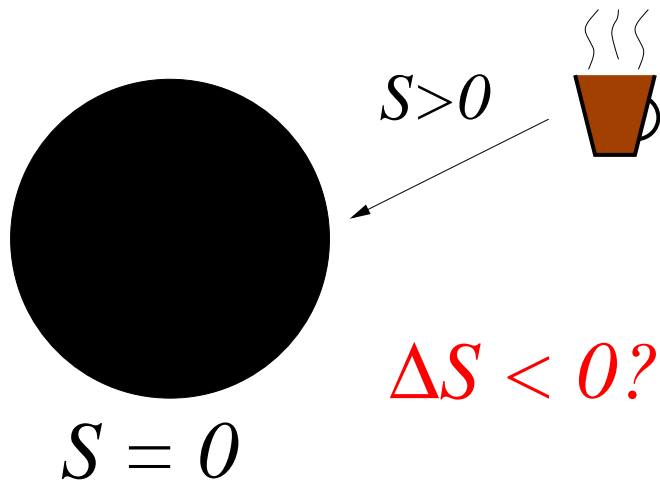


—> ¿Cuál es la relación con agujeros negros?

Bardeen, Carter, Hawking: solo analogía, no hay relación física...



Bekenstein (1973): Relación profunda entre agujeros negros y termodinámica

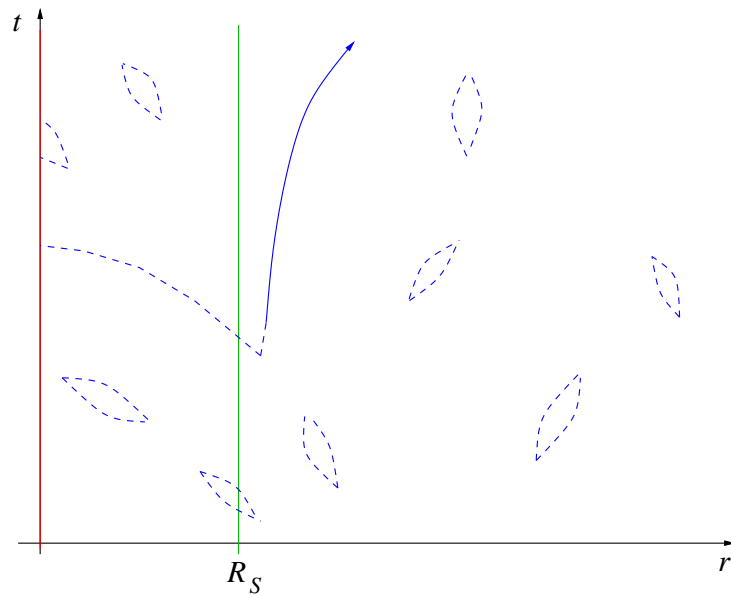


Agujeros negros tienen **entropía no-trivial**, para no violar la Segunda Ley de la termodinámica...

—> **Entropía es real y enorme!** $S \sim A/\ell_P^2$

¿Cómo es posible que un A.N. tenga temperatura, si no emite nada?

TCC en espacios curvos: agujeros negros se comportan como cuerpos negros



Creación de partículas cerca del horizonte

⇒ radiación térmica con

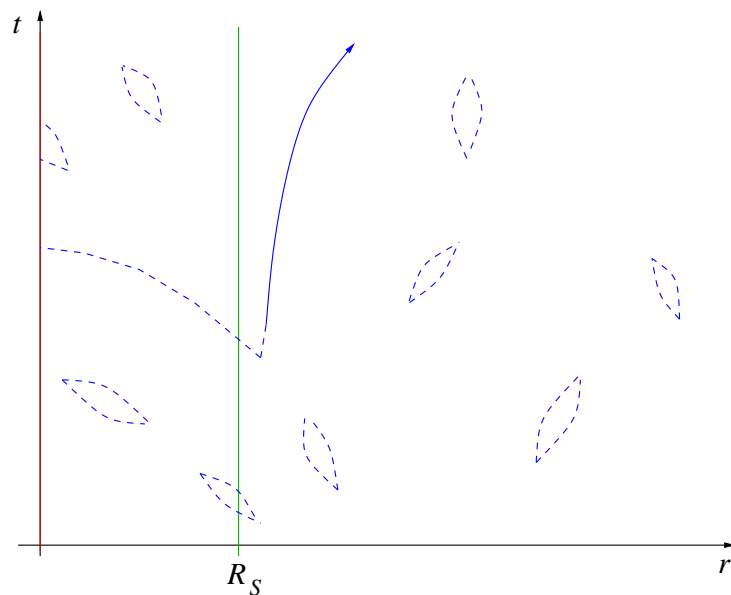
$$T = \frac{\hbar \kappa_H}{2\pi k_B} = \frac{\hbar}{8\pi k_B G_N m}$$

⇒ identifica entropía como

$$S = \frac{k_B A}{4G_N \hbar} = \frac{4\pi k_B G_N m^2}{\hbar}$$

¿Cómo es posible que un A.N. tenga temperatura, si no emite nada?

TCC en espacios curvos: agujeros negros se comportan como cuerpos negros



Creación de partículas cerca del horizonte

⇒ radiación térmica con

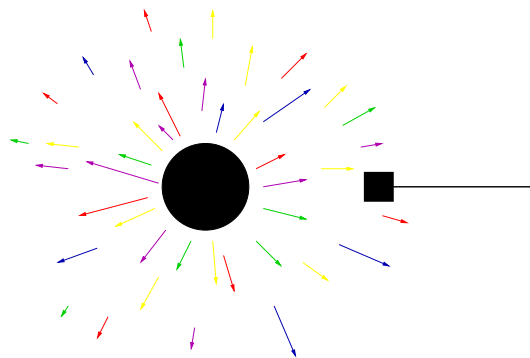
$$T = \frac{\hbar \kappa_H}{2\pi k_B} = \frac{\hbar}{8\pi k_B G_N m}$$

⇒ identifica entropía como

$$S = \frac{k_B A}{4G_N \hbar} = \frac{4\pi k_B G_N m^2}{\hbar}$$

Los agujeros negros emiten una radiación térmica

Los agujeros negros poco a poco se van evaporando



Para agujero negro con $m = m_\odot$:

$$T \sim 10^{-8} K,$$

$$t_{\text{ev}} \sim 10^{67} \text{ años}$$

$$\text{NB: } T_\star \sim 2,7 K,$$

$$t_\star \sim 1,3 \cdot 10^{10} \text{ años}$$

Un agujero negro es un sistema termodinámico

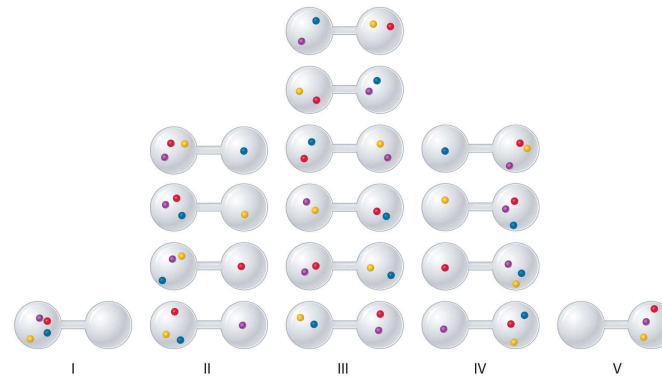
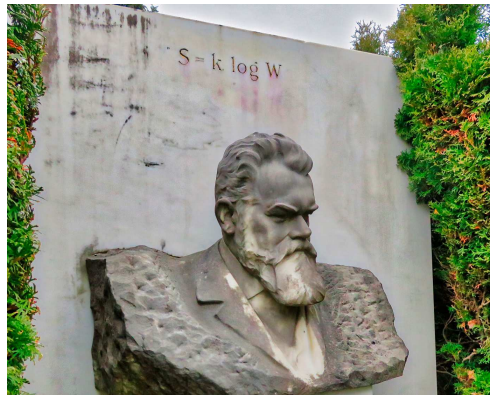
→ Dos problemas gordos aún sin resolver:

Un agujero negro es un sistema termodinámico

→ Dos problemas gordos aún sin resolver:

- **Conteo de los microestados:** ¿Cuál es el origen de la entropía?

Boltzmann: $S = \frac{k_B A}{4G_N \hbar} \equiv k_B \ln N$

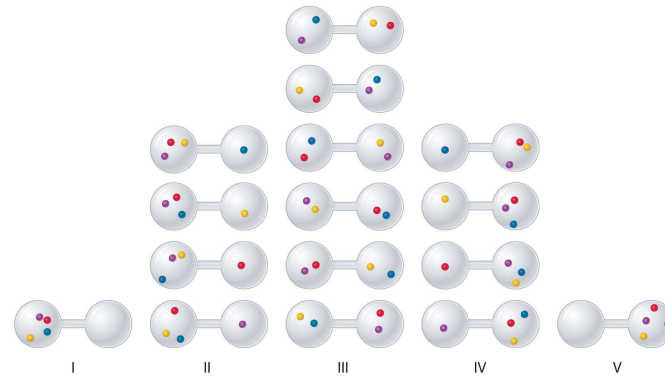
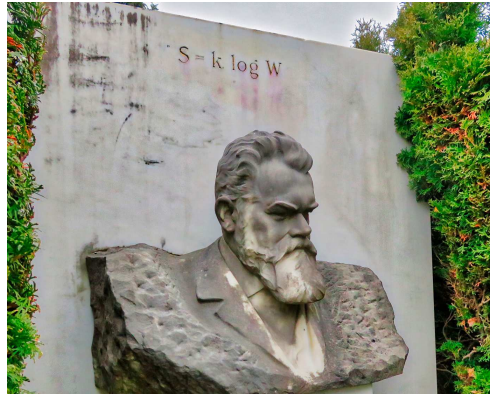


Un agujero negro es un sistema termodinámico

→ Dos problemas gordos aún sin resolver:

- **Conteo de los microestados:** ¿Cuál es el origen de la entropía?

Boltzmann: $S = \frac{k_B A}{4G_N \hbar} \equiv k_B \ln N$



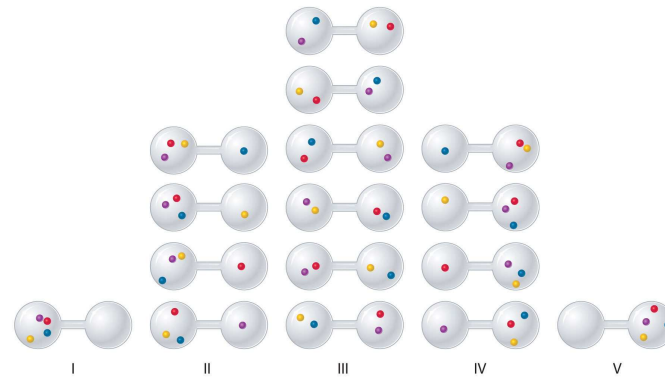
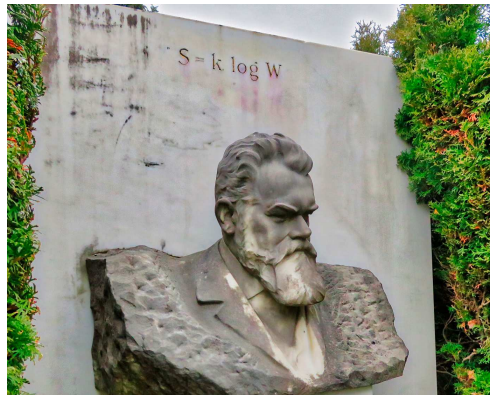
$$\text{Para } m = m_{\odot} \quad \Rightarrow \quad S \sim 10^{77} k_B \quad \Rightarrow \quad N \sim e^{10^{77}} \sim 10^{10^{76}}$$

Un agujero negro es un sistema termodinámico

→ Dos problemas gordos aún sin resolver:

- **Conteo de los microestados:** ¿Cuál es el origen de la entropía?

Boltzmann: $S = \frac{k_B A}{4G_N \hbar} \equiv k_B \ln N$



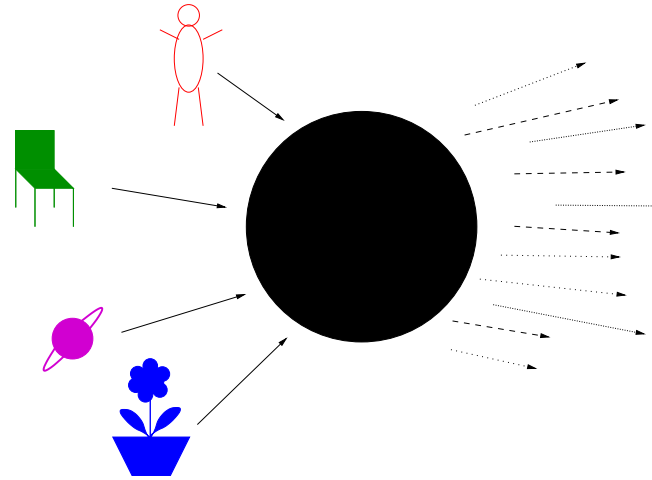
$$\text{Para } m = m_{\odot} \quad \Rightarrow \quad S \sim 10^{77} k_B \quad \Rightarrow \quad N \sim e^{10^{77}} \sim 10^{10^{76}}$$

Cota de Bekenstein: $S_V \leq \frac{2\pi}{\hbar} k_B E R_0 \leq S_{BH} = \frac{2\pi}{\hbar} k_B m R_s$

→ Agujero negro tiene máxima densidad de entropía posible!

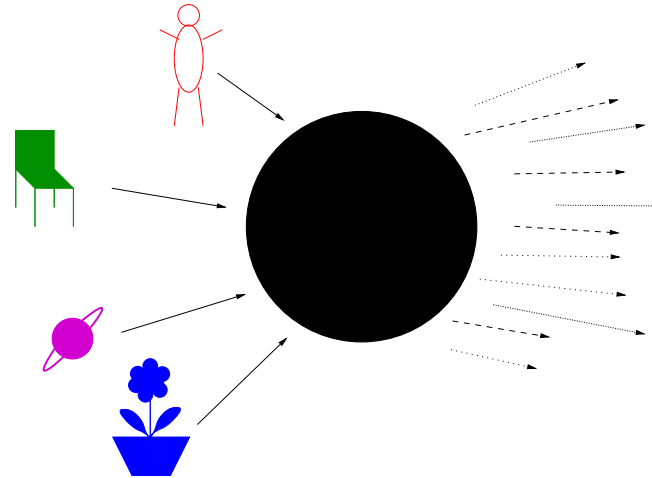
¿Cuáles son los microestados?

- Paradoja de la información: ¿Es evolución unitaria?



¿Dónde está la información sobre la materia que la entrado?

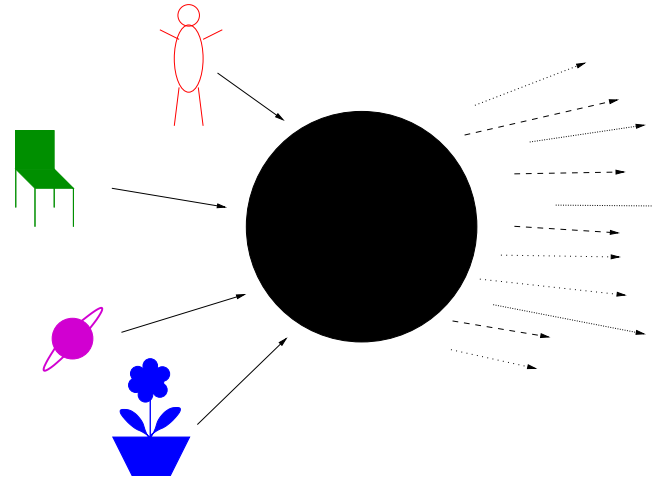
- **Paradoja de la información:** ¿Es evolución unitaria?



¿Dónde está la información sobre la materia que la entrado?

- **Clásicamente:** dentro del agujero negro, inaccesible...

- **Paradoja de la información:** ¿Es evolución unitaria?



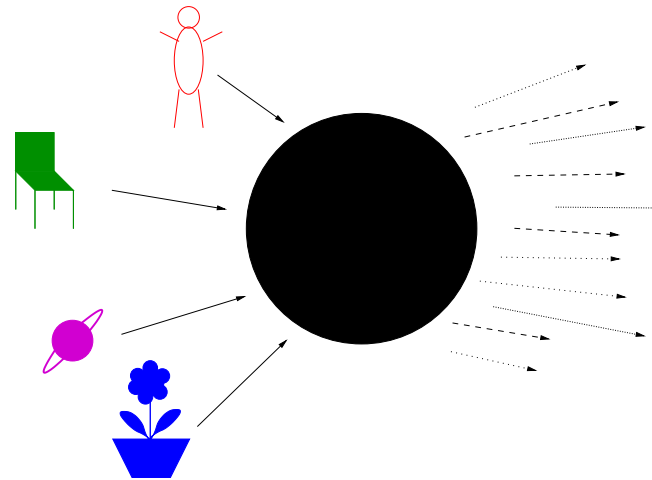
¿Dónde está la información sobre la materia que la entrado?

- **Clásicamente:** dentro del agujero negro, inaccesible...
- **Cuánticamente:** evaporación de agujeros negros \rightarrow dispersión

In-state = (suma de) estados puros; Out-state = estado térmico

\rightarrow **Viola unitaridad de la Mecánica Cuántica!**

- **Paradoja de la información:** ¿Es evolución unitaria?



¿Dónde está la información sobre la materia que la entrado?

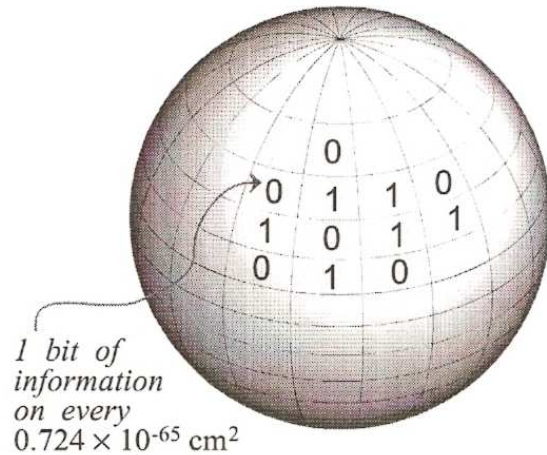
- **Clásicamente:** dentro del agujero negro, inaccesible...
- **Cuánticamente:** evaporación de agujeros negros \rightarrow dispersión

In-state = (suma de) estados puros; Out-state = estado térmico

\rightarrow **Viola unitaridad de la Mecánica Cuántica!**

- ¿Cuál es **producto final** de evaporación?
 - \rightarrow ¿Singularidad desnuda? ¿Tiene singularidad?
 - \rightarrow ¿Remnante? ¿Violaría la cota de entropía?

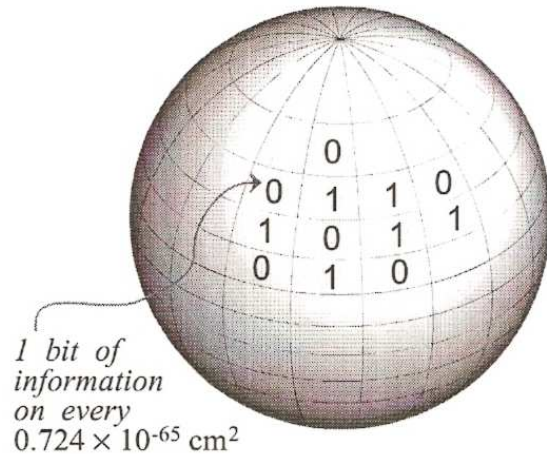
Entropía del agujero negro crece con área del horizonte, no como volumen



$$S = \frac{k_B A}{4G_N \hbar} = \frac{4\pi k_B R_s^2}{G_N \hbar}$$

—→ Información del interior almacenada en superficie del agujero negro

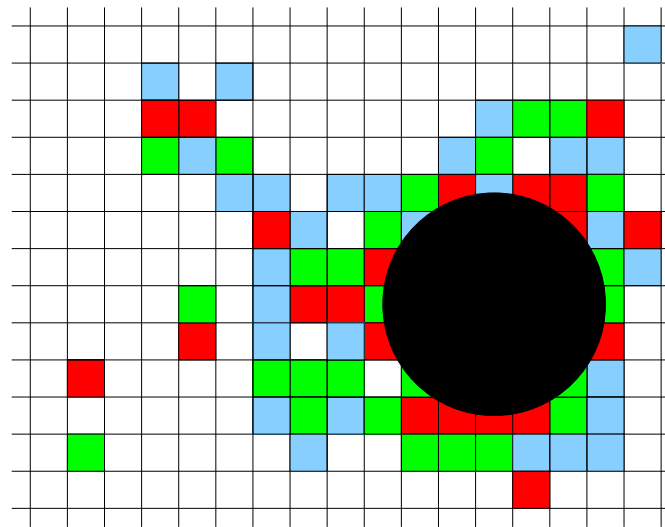
Entropía del agujero negro crece con área del horizonte, no como volumen



$$S = \frac{k_B A}{4G_N \hbar} = \frac{4\pi k_B R_s^2}{G_N \hbar}$$

—→ Información del interior almacenada en superficie del agujero negro

Grados de libertad gravitacionales locales no son independientes



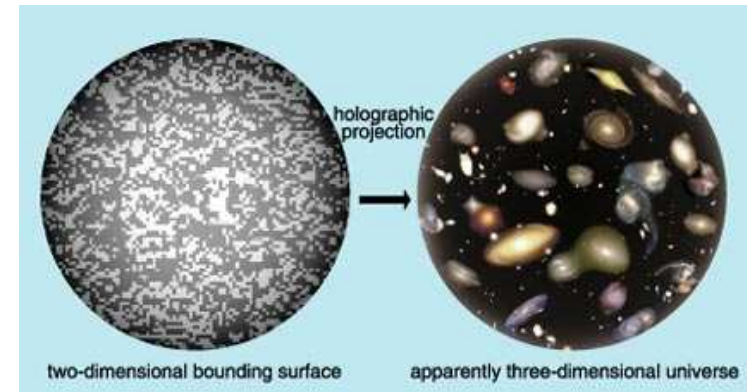
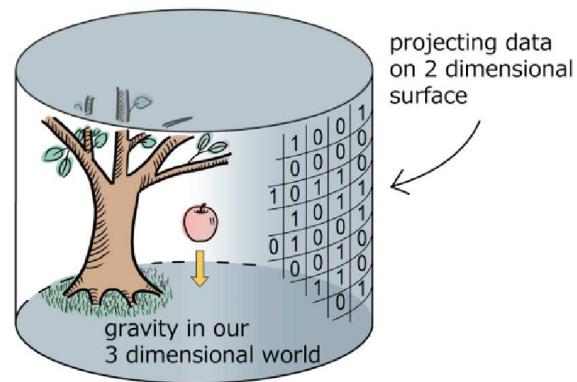
—→ número de grados de libertad no crece con V , sino con A

Principio Holográfico:

Teoría con gravedad en $(3+1)$ -dim codificado en frontera $(2+1)$ -dim

→ No solo horizonte de eventos

También pasa con horizontes cosmológicos, Rindler, ...

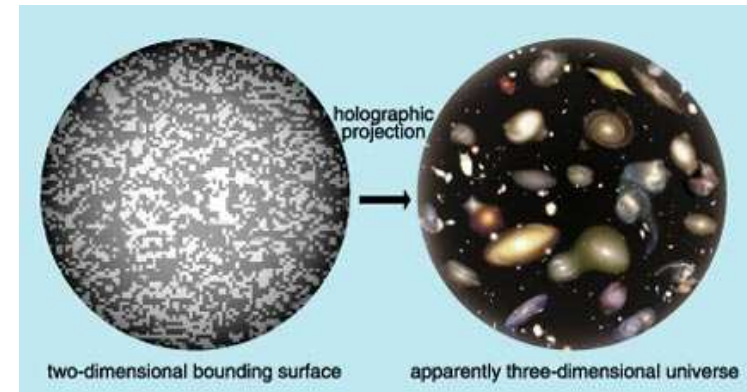
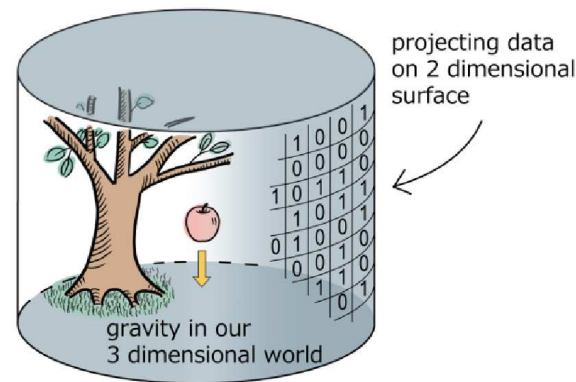


Principio Holográfico:

Teoría con gravedad en $(3+1)$ -dim codificado en frontera $(2+1)$ -dim

→ No solo horizonte de eventos

También pasa con horizontes cosmológicos, Rindler, ...



→ **Propiedad fundamental?**

→ Es gravedad un fenómeno emergente?

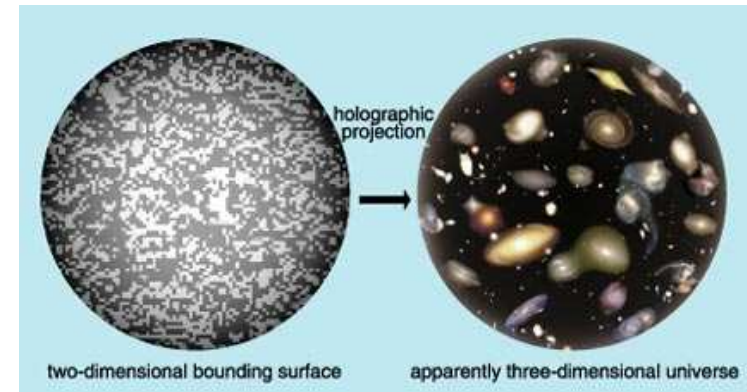
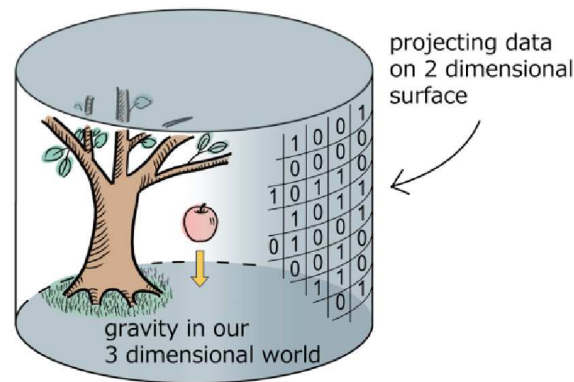
→ Es espaciotiempo 4-dim un fenómeno emergente?

Principio Holográfico:

Teoría con gravedad en $(3+1)$ -dim codificado en frontera $(2+1)$ -dim

→ No solo horizonte de eventos

También pasa con horizontes cosmológicos, Rindler, ...



→ **Propiedad fundamental?**

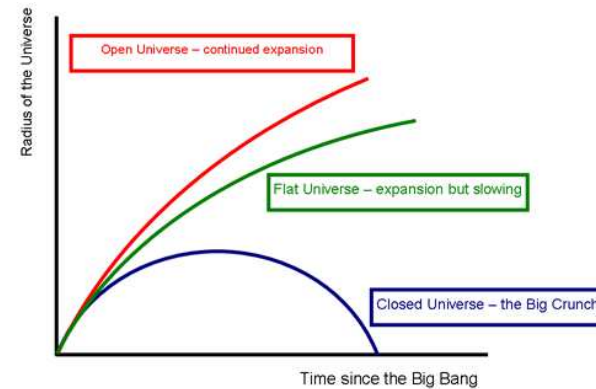
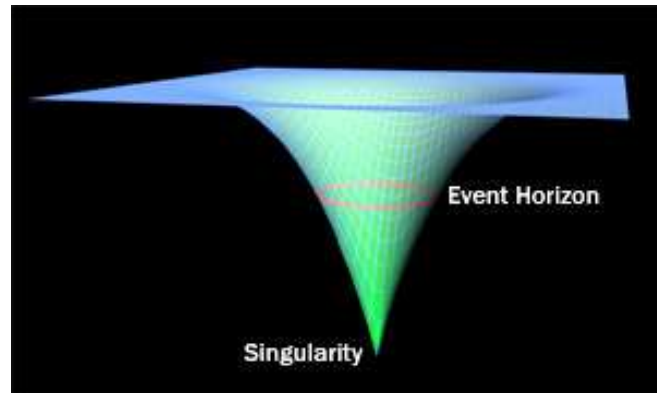
→ Es gravedad un fenómeno emergente?

→ Es espaciotiempo 4-dim un fenómeno emergente?

→ **No entendemos bien los grados de libertad cuánticos de la gravedad!!**

4. Más indicaciones

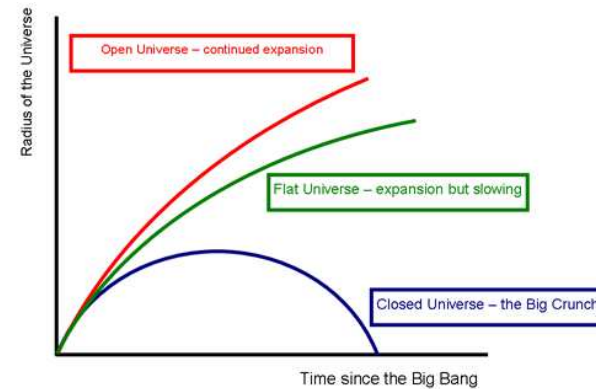
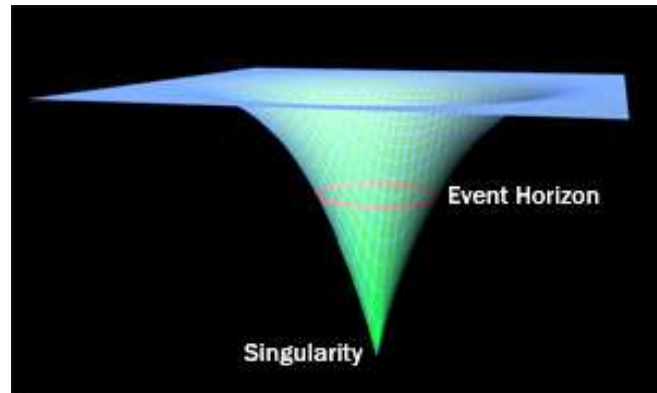
- Relatividad General está plagada de **singularidades de curvatura**



→ Nueva física (cuántica) debería **resolver singularidades**

4. Más indicaciones

- Relatividad General está plagada de **singularidades de curvatura**



→ Nueva física (cuántica) debería **resolver singularidades**

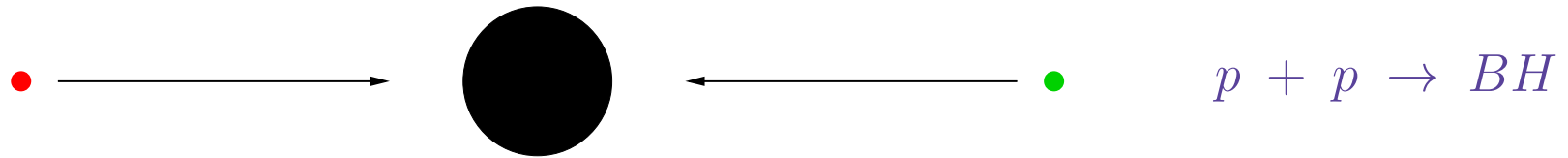
- Relatividad General **no es renormalizable**

→ **No se puede cuantizar** de manera habitual

→ Relatividad General es **teoría efectiva** a bajas energías

Gravedad Cuántica es **nueva física muy distinta**

- **Escala de longitud mínima explorable:** procesos de colisiones forman agujeros negros e impiden explorar escalas $\leq R_s$



- **Escala de longitud mínima explorable:** procesos de colisiones forman agujeros negros e impiden explorar escalas $\leq R_s$



- **Problema de jerarquía:** ¿Por qué la gravedad es tan débil?, comparada con la escala eletrodébil

$$M_{Pl} \sim 10^{19} GeV \quad \longleftrightarrow \quad M_{ew} \sim 100 GeV$$

5. Gravedad cuántica de lazos



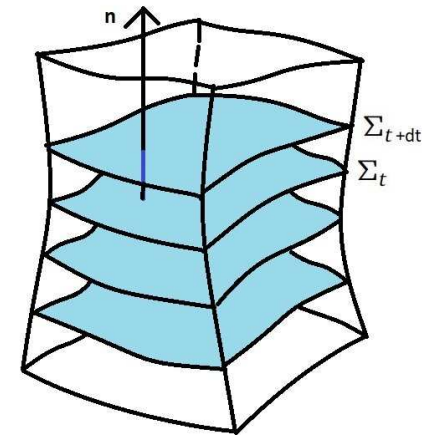
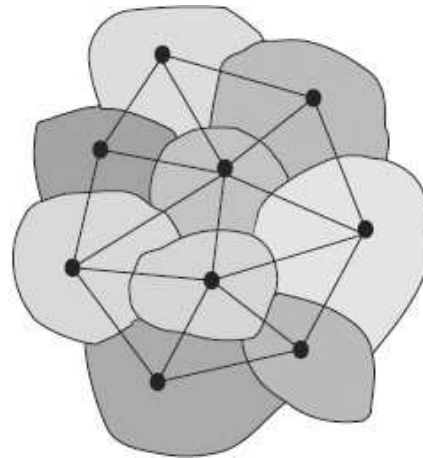
Teoría no comprobada!

5. Gravedad cuántica de lazos



Teoría no comprobada!

Idea básica: espaciotiempo es **red de espín** discreta a escala $L \sim \ell_P$



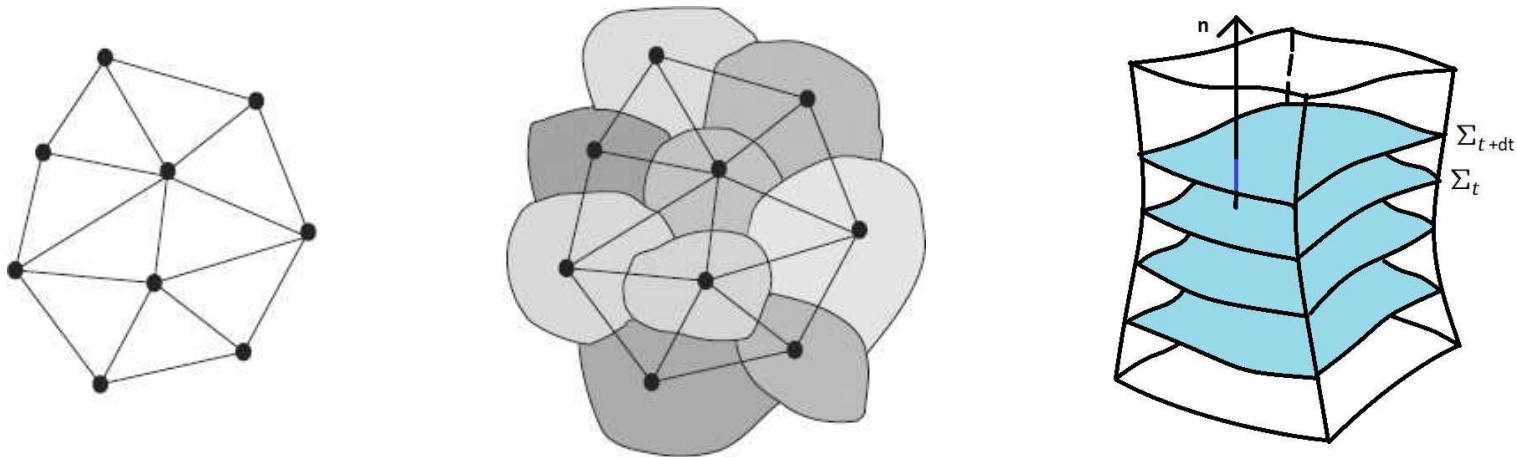
—→ **cuantización de Dirac** sobre Relatividad General en formalismo ADM

5. Gravedad cuántica de lazos



Teoría no comprobada!

Idea básica: espaciotiempo es **red de espín** discreta a escala $L \sim \ell_P$

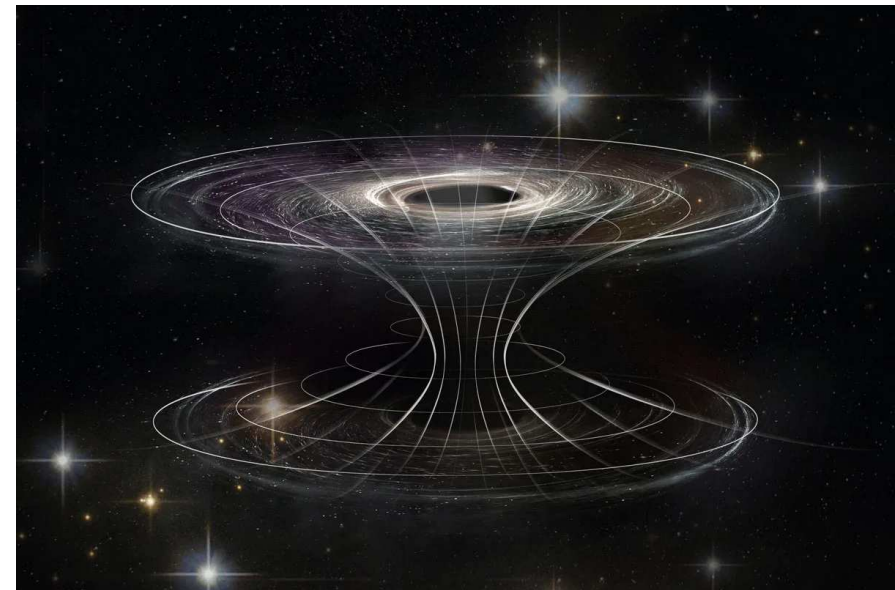
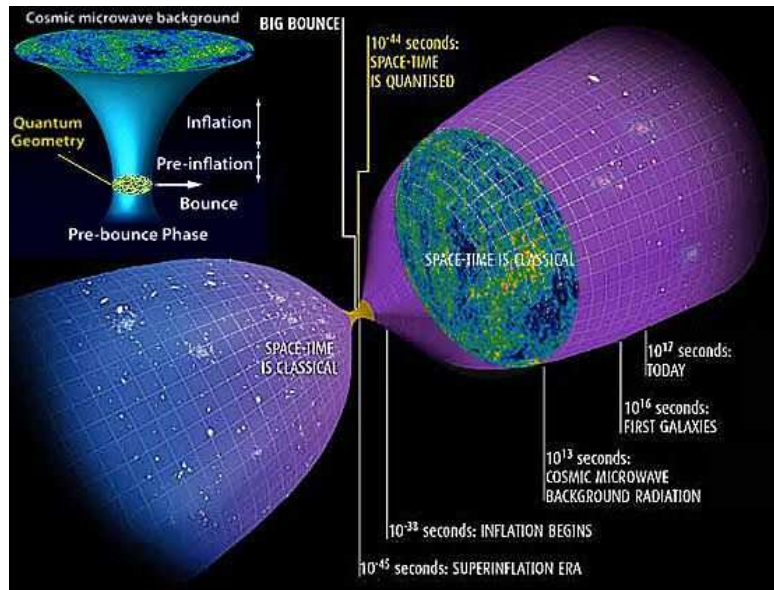


- > **cuantización de Dirac** sobre Relatividad General en formalismo ADM
- > ecuaciones dinámicas & ligaduras: resolver con **variables de Ashtekar**
- > ligadura escalar sin resolver: **teoría aún incompleta**

Loop Quantum Cosmology

Aplicación de LQG a casos con mucha simetría

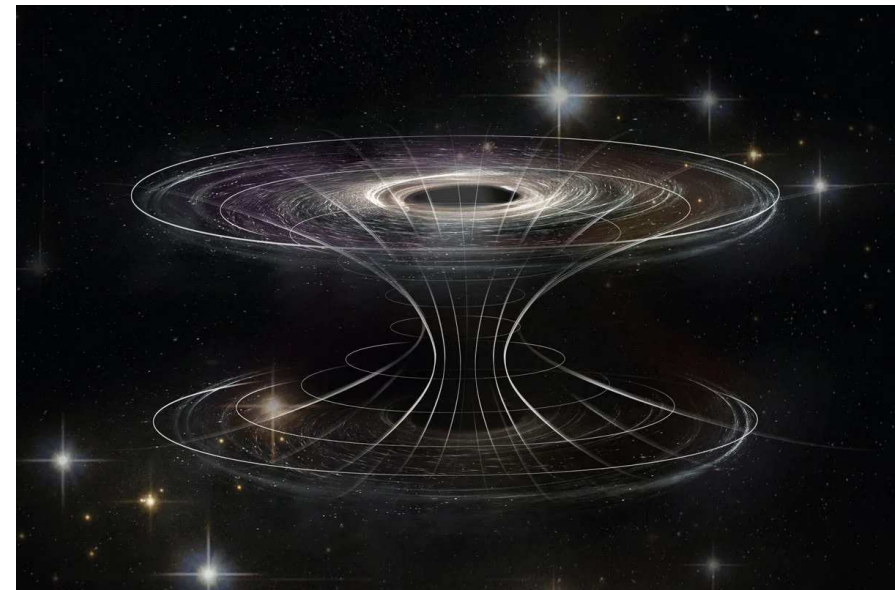
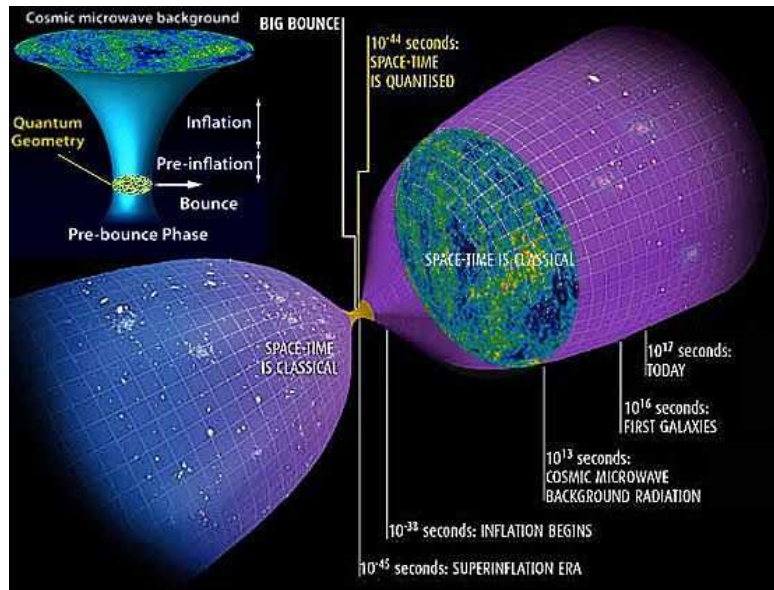
- modelos cosmológicos: homogeneidad & isotropía
- agujeros negros: simetría esférica & estaticidad



Loop Quantum Cosmology

Aplicación de LQG a casos con mucha simetría

- modelos cosmológicos: homogeneidad & isotropía
- agujeros negros: simetría esférica & estaticidad



- Fuerza repulsiva a escala de Planck por geometría cuántica
- Resolución de singularidades
- Big Bounce & agujeros de gusano
- Relatividad General recuperada a baja curvatura

6. Teoría de Cuerdas



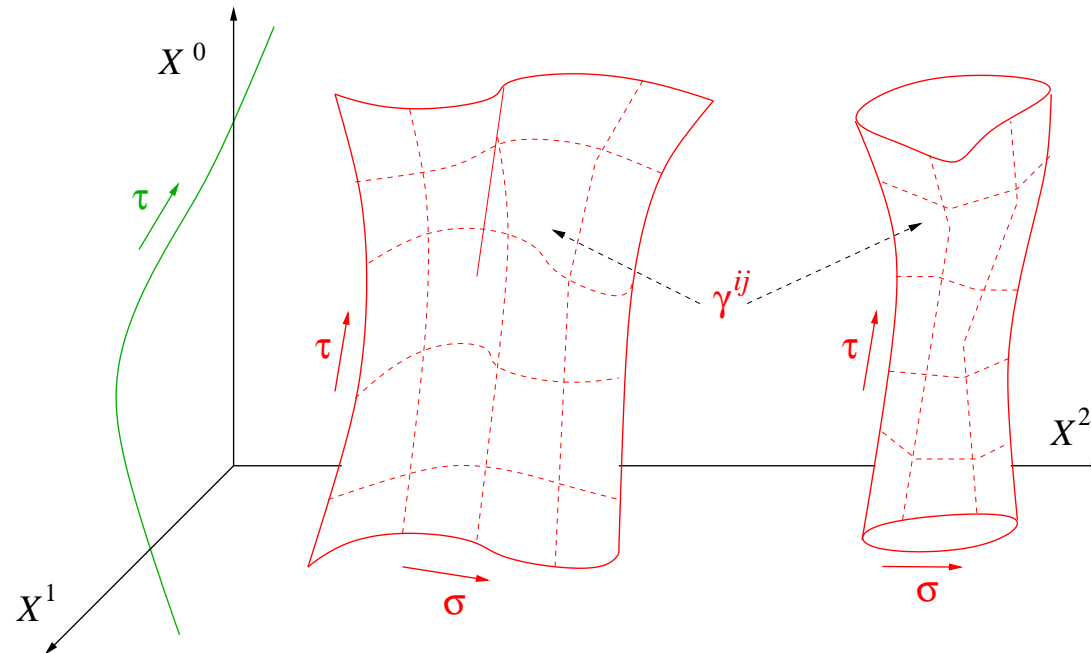
Teoría no comprobada!

6. Teoría de Cuerdas



Teoría no comprobada!

Idea básica: Materia consiste de **objetos unidimensionales**



Espectro consiste de una **serie infinita de oscilaciones**, que corresponde con las **partículas conocidas** ($m \sim 0$) y **mucho más** ($m \sim nM_{Pl}$)

Comentarios generales

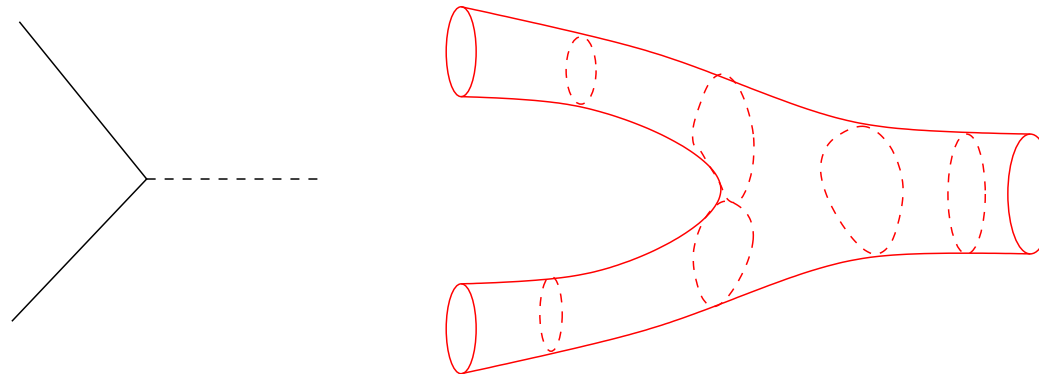
- Cuerda cerrada: partícula de espín 2 sin masa: gravitón
→ Teoría de gravedad!!! (sin haberlo pedido)

Comentarios generales

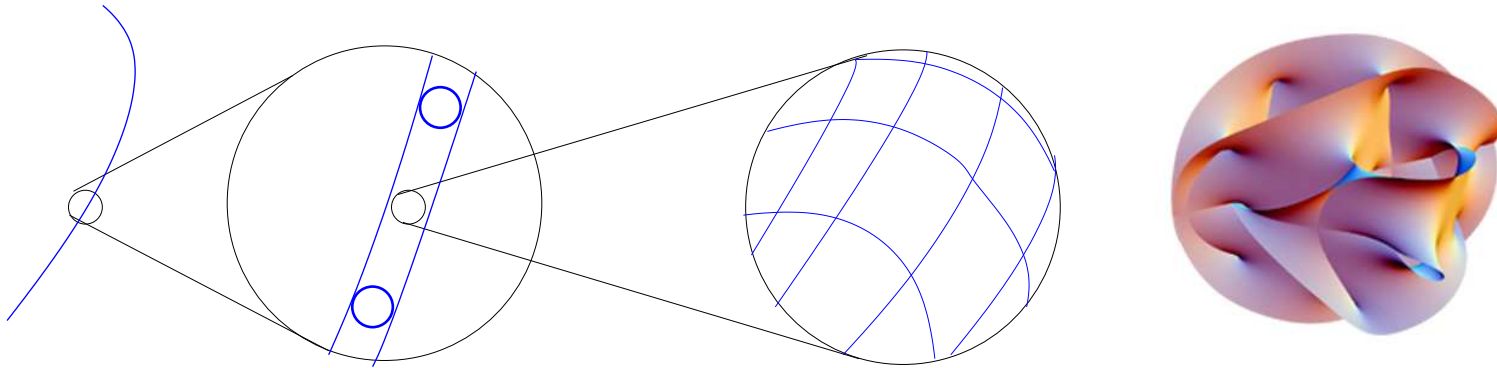
- Cuerda cerrada: partícula de espín 2 sin masa: **gravitón**
→ **Teoría de gravedad!!!** (sin haberlo pedido)
- gravitón $\iff \ell_s = 10^{-35}m \sim \ell_P \sim 10^{-19}R_p$
→ **escala de cuerdas $\sim M_{Pl} \sim 10^{19} GeV \sim 10^{15} E_{LHC}$**
→ fuera de alcance de verificación experimental: **Problema!**

Comentarios generales

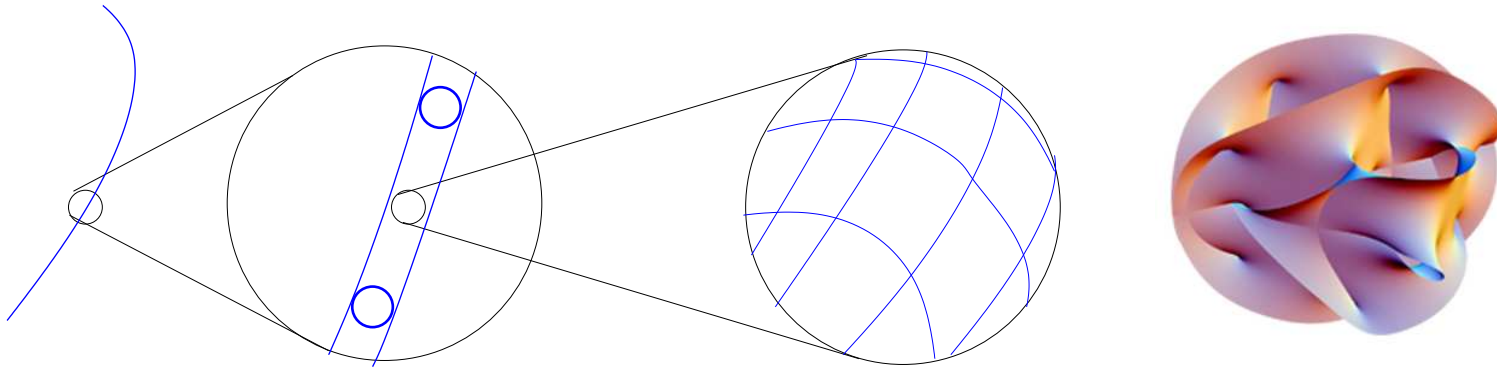
- Cuerda cerrada: partícula de espín 2 sin masa: **gravitón**
→ **Teoría de gravedad!!!** (sin haberlo pedido)
- gravitón $\iff \ell_s = 10^{-35}m \sim \ell_P \sim 10^{-19}R_p$
→ **escala de cuerdas** $\sim M_{Pl} \sim 10^{19} GeV \sim 10^{15} E_{LHC}$
→ fuera de alcance de verificación experimental: **Problema!**
- Amplitudes de dispersión son UV finitas! **Gravedad es renormalizable!**



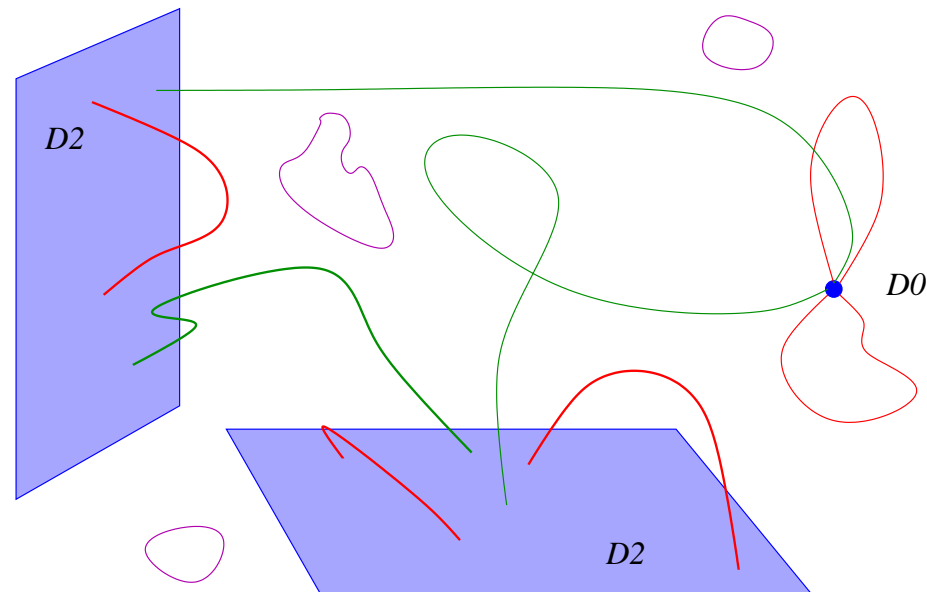
- Consistencia: **espacio es 10-dimensional** (9+1)
 - reducción dimensional (Kaluza-Klein)
 - geometría muy especial



- Consistencia: **espacio es 10-dimensional** (9+1)
 - reducción dimensional (Kaluza-Klein)
 - geometría muy especial



- Aparte de cuerdas, hay un **zoo de p -branas**



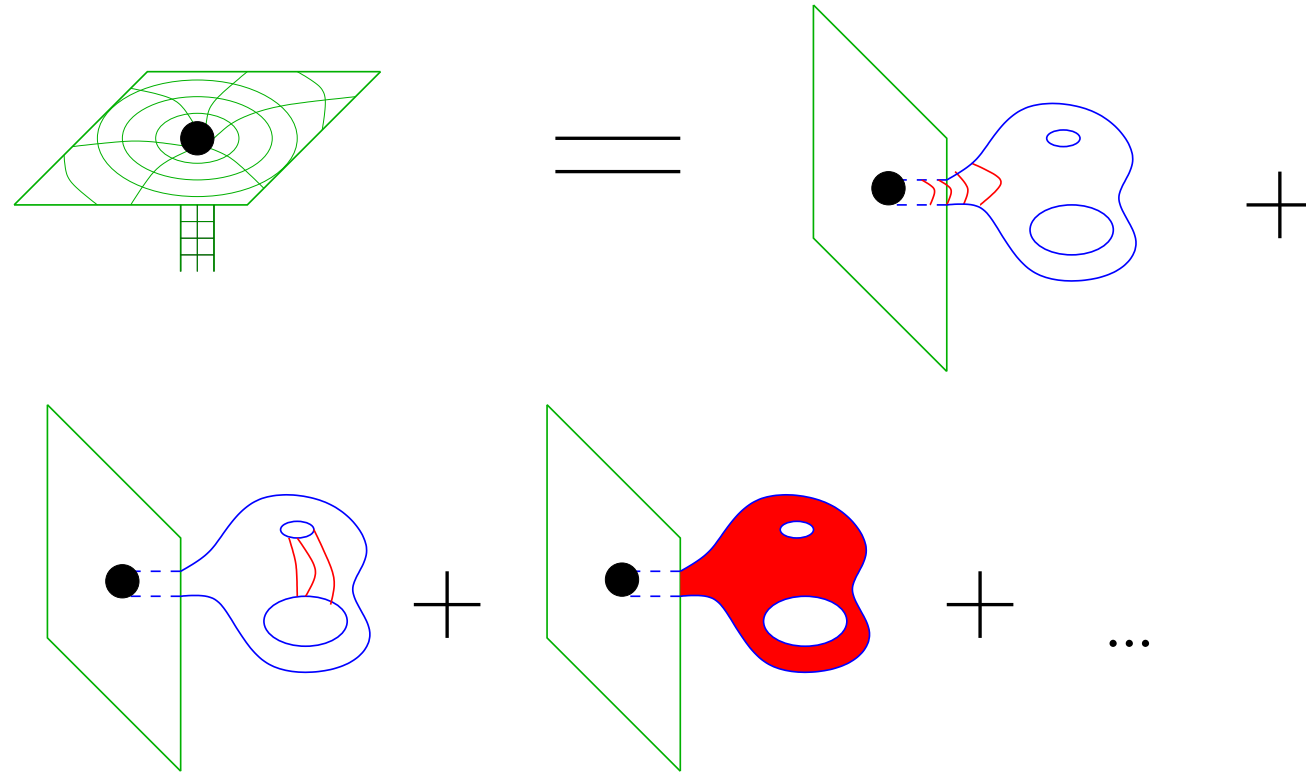
- Entropía de agujeros negros (extremos): Recuento de los microestados

$$S = k_B A / 4\ell_{Pl} \longleftrightarrow S = -k_B \ln N$$

- Entropía de agujeros negros (extremos): Recuento de los microestados

$$S = k_B A / 4\ell_{Pl} \longleftrightarrow S = -k_B \ln N$$

Agujeros negros extremales en D=5: micro-estados = *p*-branas enroscadas

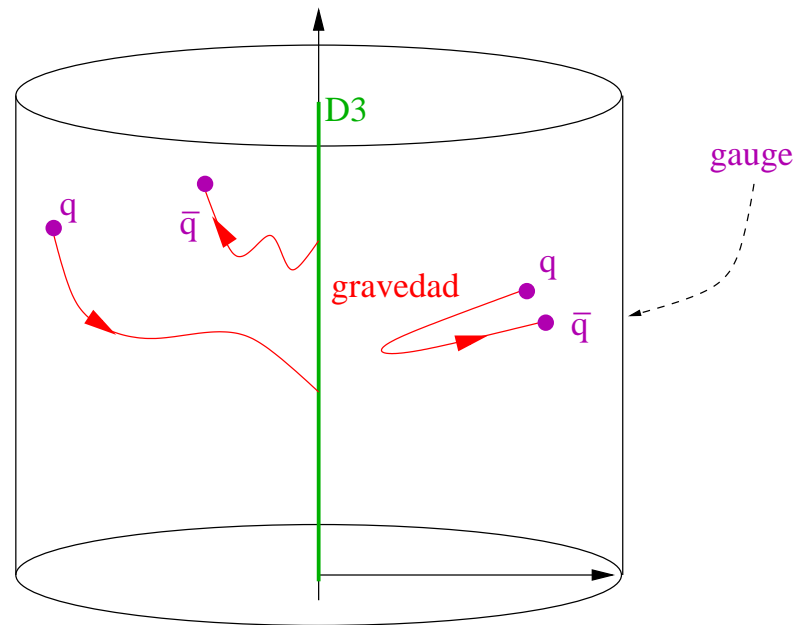


→ nunca se ha conseguido resultados similares para casos más realistas...

- Conjetura AdS/CFT: ejemplo concreto de holografía

Type IIB Supergravedad (cuerdas) en $AdS_5 \times S^5$
 $\sim \mathcal{N} = 4$ Super Yang-Mills con grupo gauge $SU(N)$

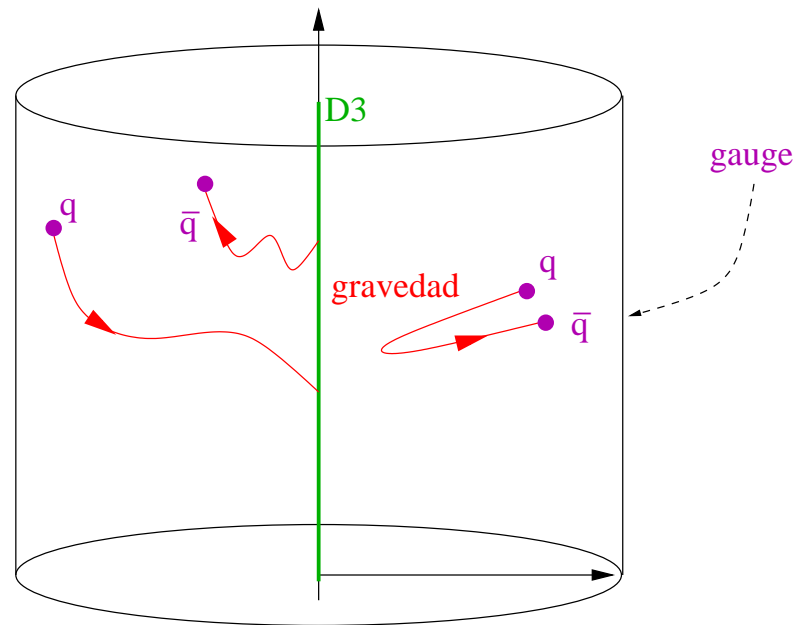
→ teoría de partículas 4-dim capta holográficamente gravedad 10-dim



- Conjetura AdS/CFT: ejemplo concreto de holografía

Type IIB Supergravedad (cuerdas) en $AdS_5 \times S^5$
 $\sim \mathcal{N} = 4$ Super Yang-Mills con grupo gauge $SU(N)$

—→ teoría de partículas 4-dim capta holográficamente gravedad 10-dim

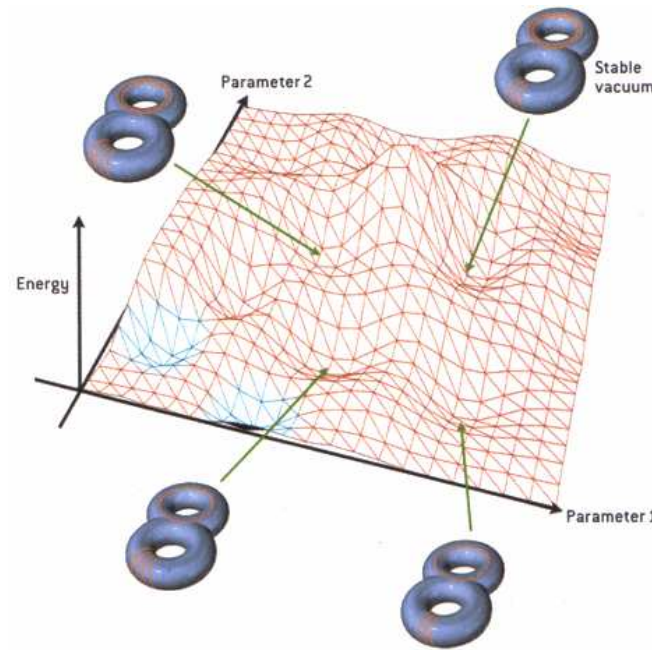


—→ Diccionario concreto entre teoría gauge 4-dim y gravedad 10-dim

Quark en SYM \sim cuerda colgando desde la frontera hasta el horizonte

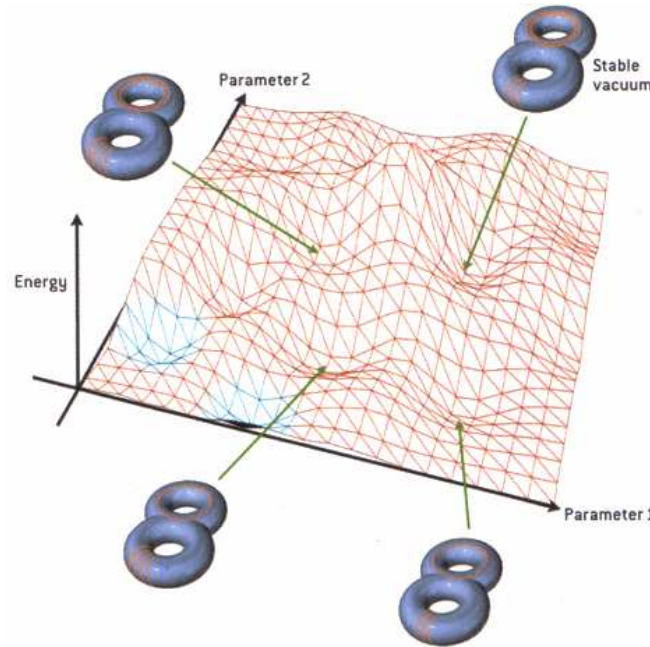
Mesón en SYM \sim cuerda colgando desde frontera hasta interior

- El **landscape**: ¿Cuál es el vacío de teoría de cuerdas?
 - Compactificaciones: $Mink_4 \times T^6$? $Mink_4 \times CY_3$? $Mink_4 \times CY'_3$?
 - Branas enrolladas:



"The Landscape" (Picture from *Scientific American*)

- El **landscape**: ¿Cuál es el vacío de teoría de cuerdas?
 - Compactificaciones: $Mink_4 \times T^6$? $Mink_4 \times CY_3$? $Mink_4 \times CY'_3$?
 - Branas enrolladas:



"The Landscape" (Picture from *Scientific American*)

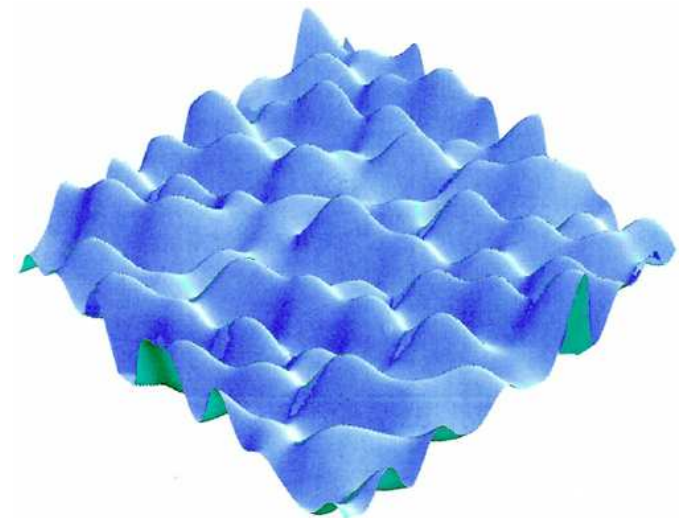
→ $\sim 10^{500}$ vacíos: **Landscape!**

Problema enorme de predictibilidad

Mecanismo de selección de vacío

↔ Aproximación estadística

↔ Principio antrópico



- ¿Hemos aprendido algo de gravedad cuántica?
 - > Sólo descripción perturbativa alrededor de (algunos) espacios fijos
 - > Sólo primera cuantización, nadie sabe String Field Theory
 - > No sabemos nada sobre carácter cuántico del espaciotiempo...



- ¿Hemos aprendido algo de gravedad cuántica?
 - Sólo descripción perturbativa alrededor de (algunos) espacios fijos
 - Sólo primera cuantización, nadie sabe String Field Theory
 - No sabemos nada sobre carácter cuántico del espaciotiempo...



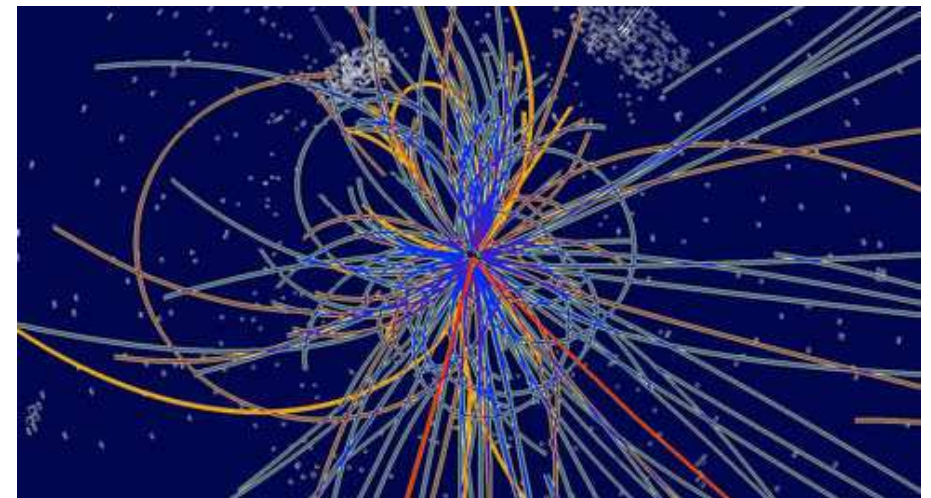
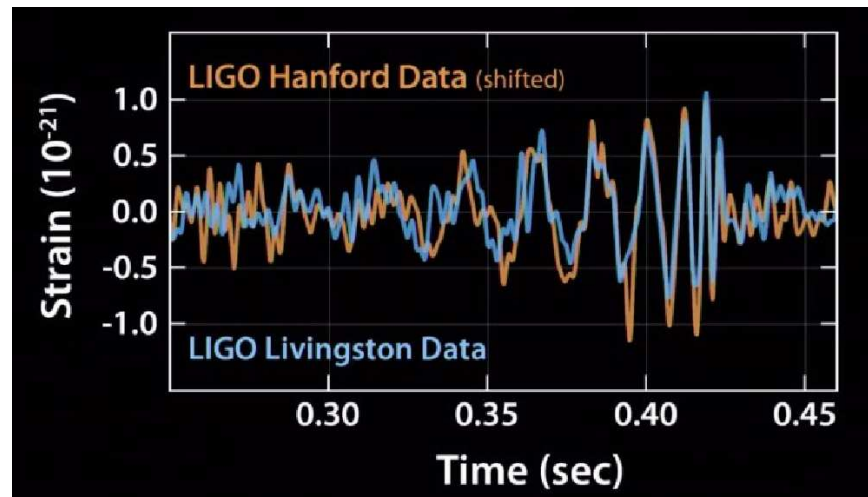
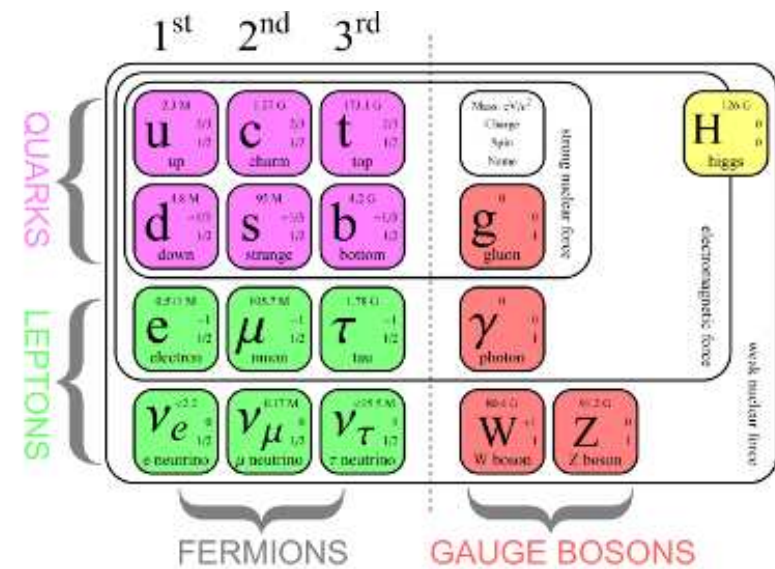
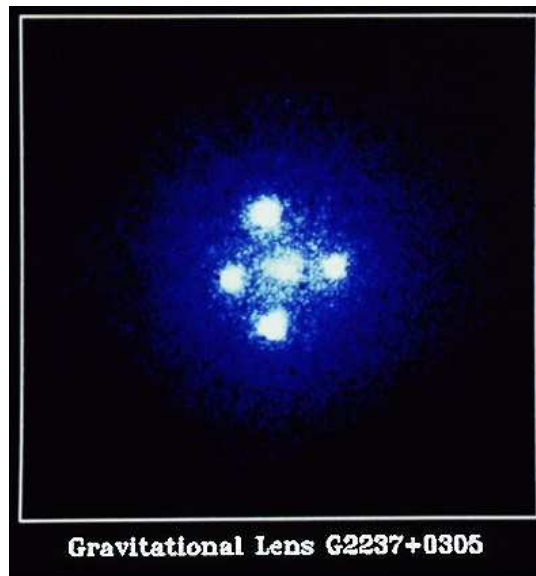
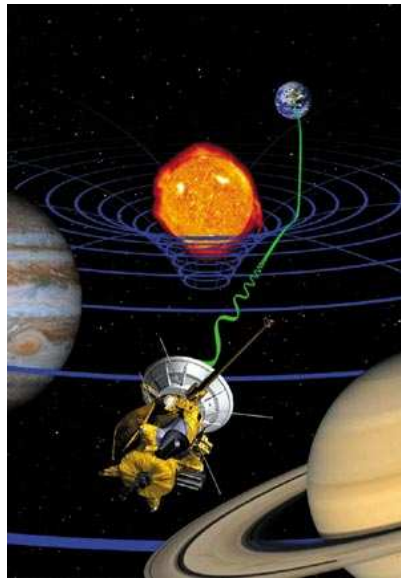
Opinión personal: Mixed feelings

Matemáticas impresionantes! \longleftrightarrow Realidad física?

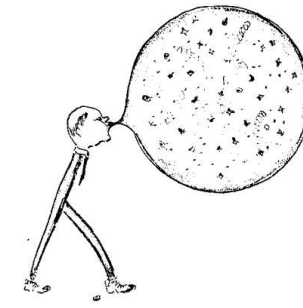
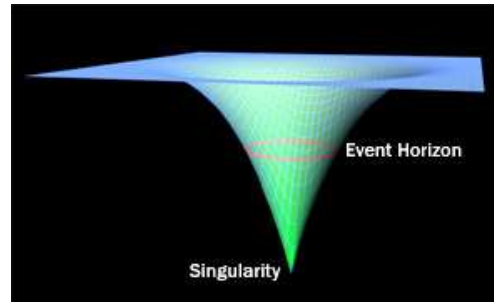
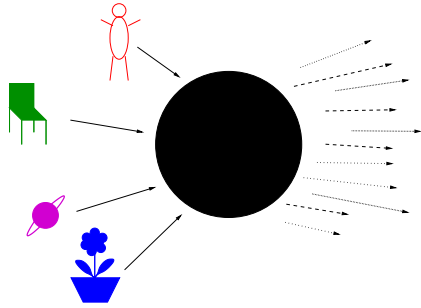
→ ¿inherente a gravedad cuántica?

Resumen:

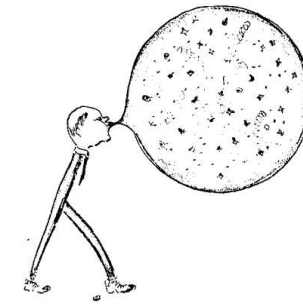
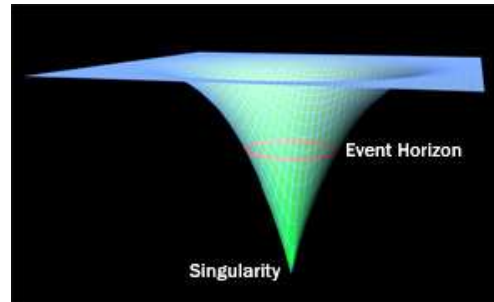
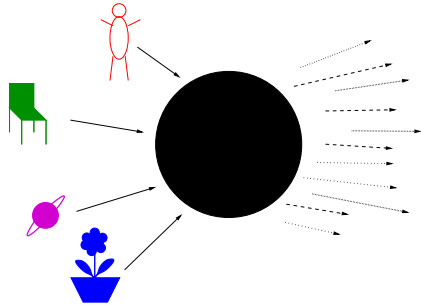
- Relatividad General & Modelo Estándar: éxitos impresionantes



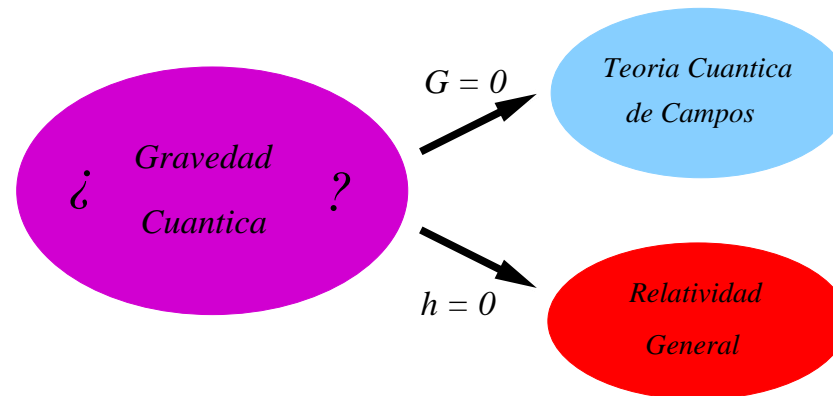
- Varios problemas que **transcenden el régimen** de física conocida



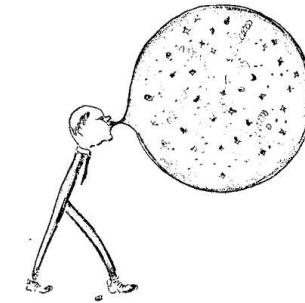
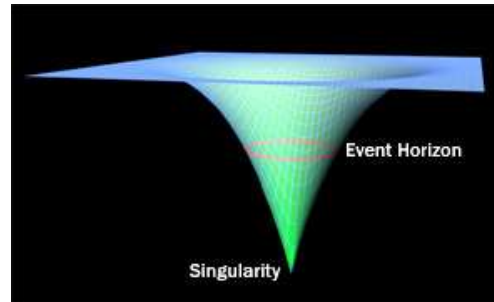
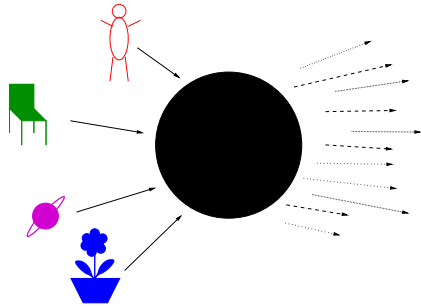
- Varios problemas que **transcenden el régimen** de física conocida



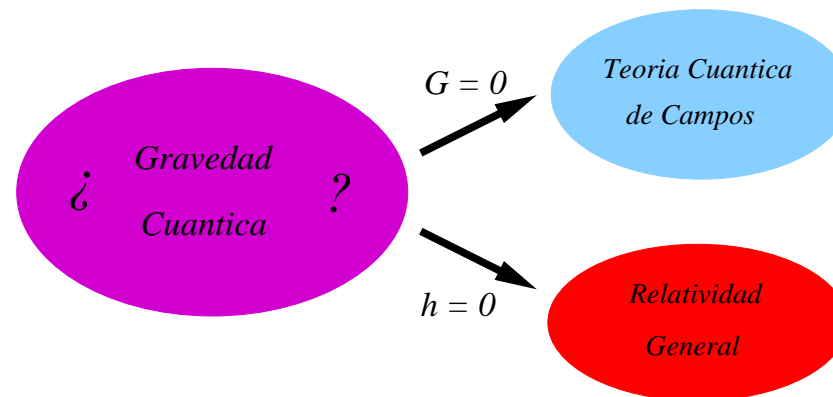
- Debe haber un régimen de **gravedad cuántica**



- Varios problemas que **transcenden el régimen** de física conocida



- Debe haber un régimen de **gravedad cuántica**



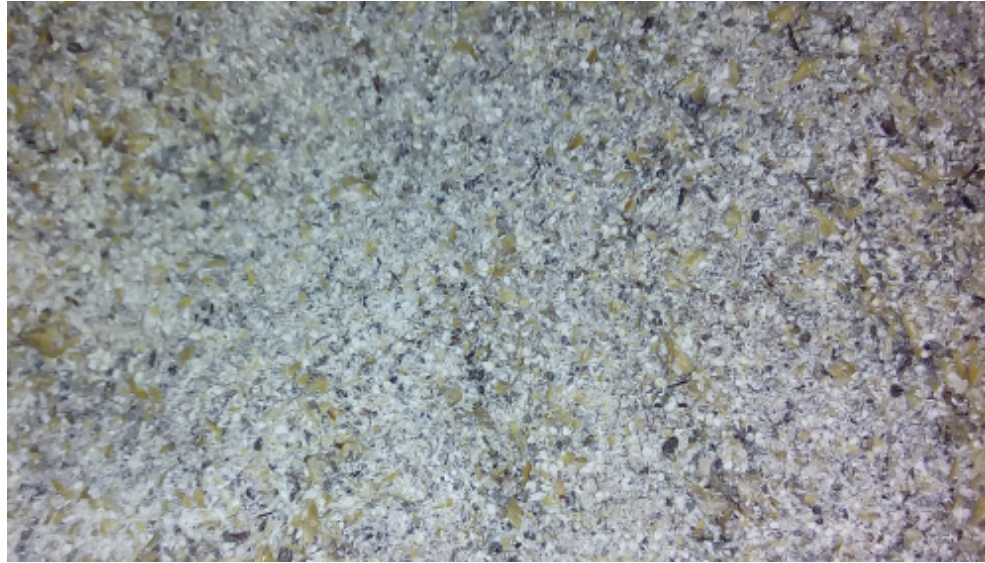
- Cae fuera de alcañca experimental: $m_P \sim 10^{15} E_{LHC}$

Bosón de Higgs: 1964 \leftrightarrow 2013

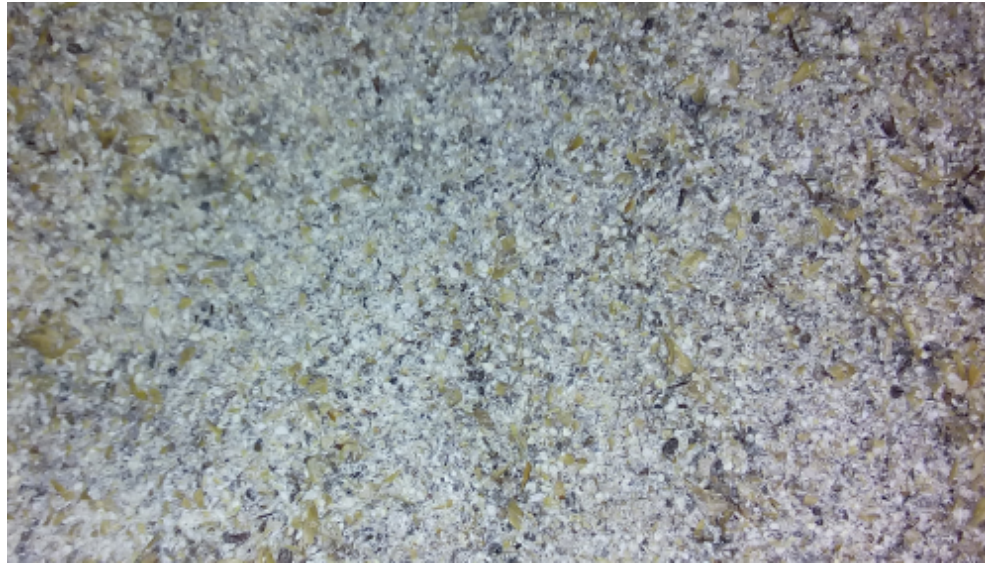
Condensado de Bose-Einstein: 1925 \leftrightarrow 1995

Ondas gravitacionales: 1916 \leftrightarrow 2016

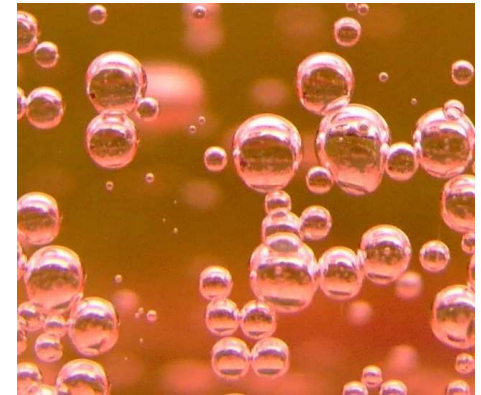
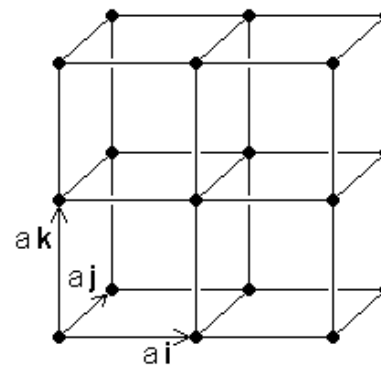
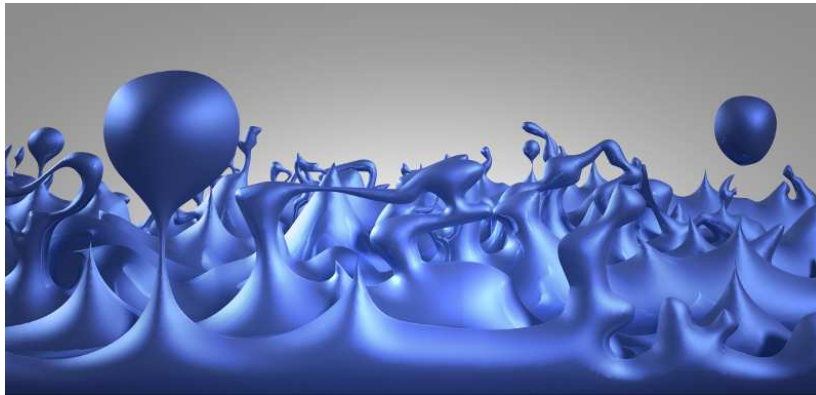
- Relatividad General es *descripción granulada*, (semi-)clásica de un sistema cuántico subyacente...



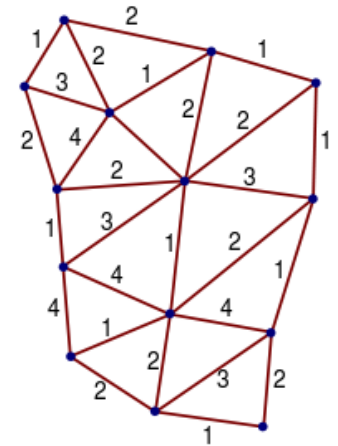
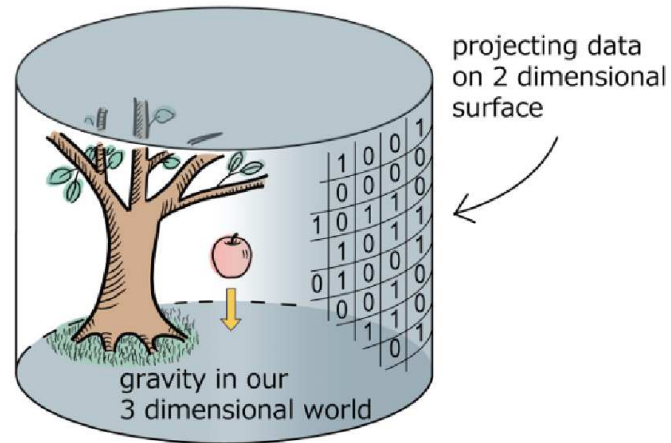
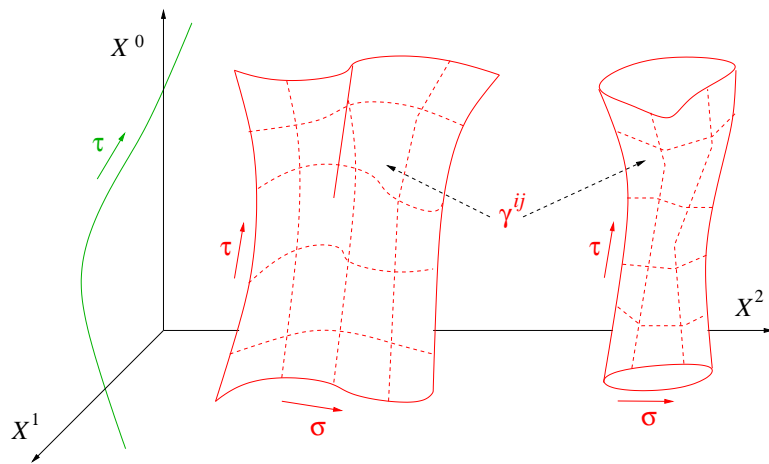
- Relatividad General es **descripción granulada**, (semi-)clásica de un sistema cuántico subyacente...



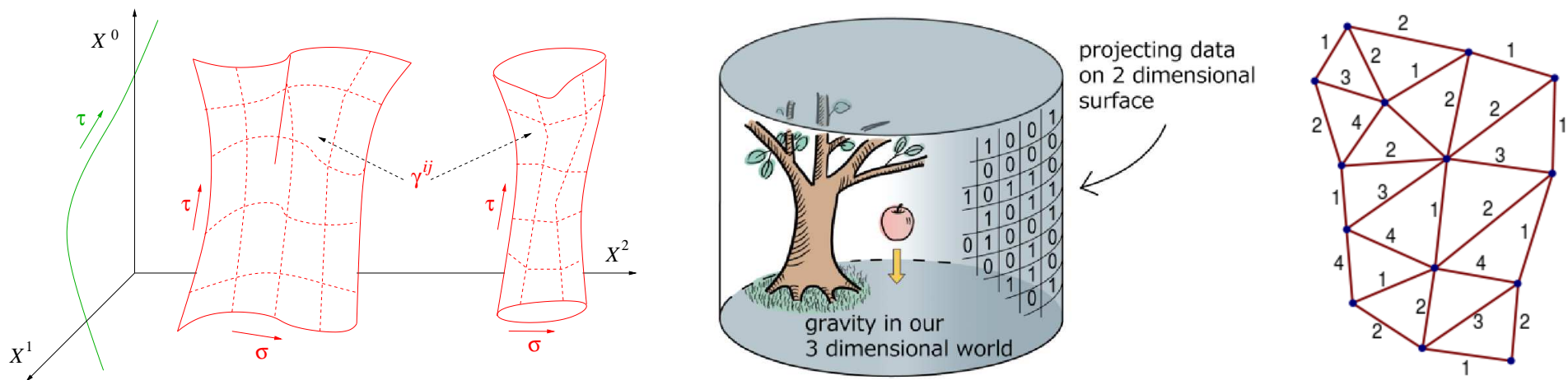
- Gravedad cuántica debe dar **descripción cuántica del espaciotiempo**



- Aún no tenemos una teoría clara de gravedad cuántica
 → No entendemos los grados de libertad cuánticos de gravedad



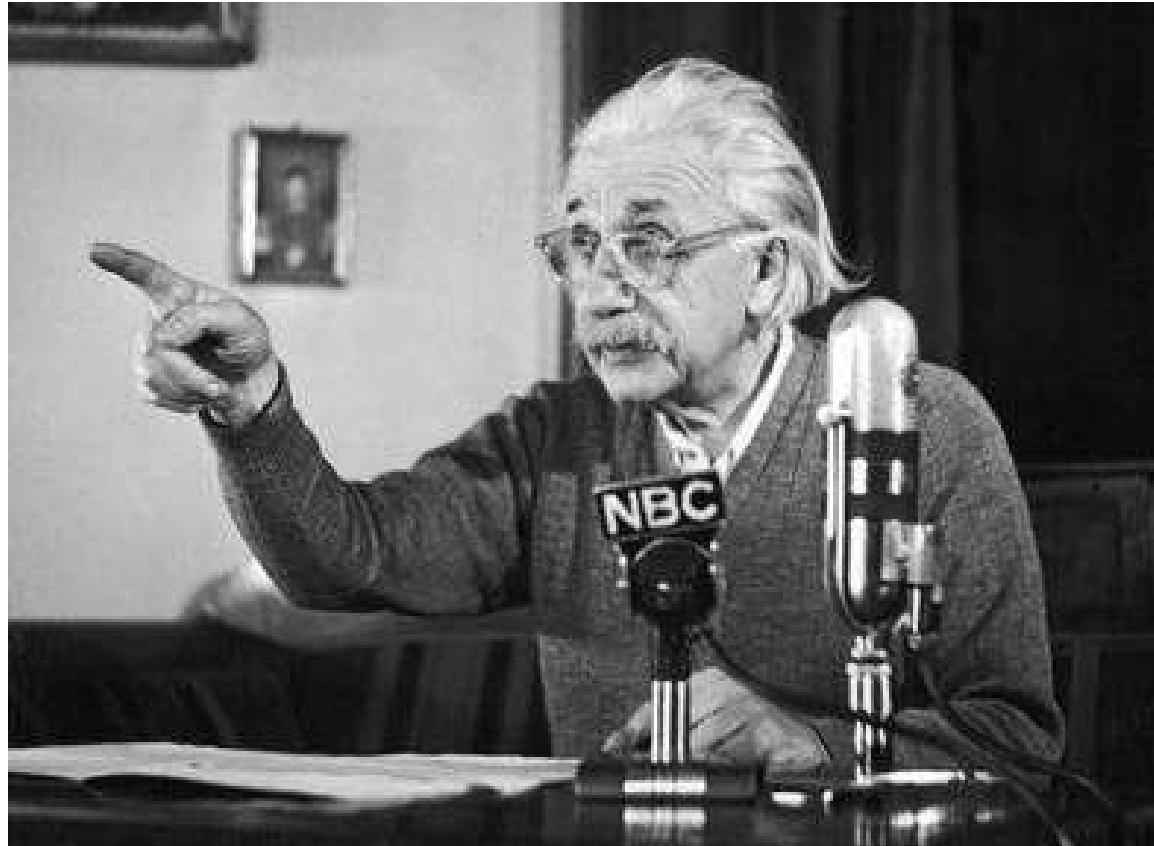
- Aún **no** tenemos una teoría clara de gravedad cuántica
 → **No entendemos los grados de libertad cuánticos de gravedad**



- Pero queda mucho por descubrir...



Muchas gracias!



¿Preguntas?

Información es una entidad física, con energía, volumen, ...

—→ problema del extraterrestre y la Wikipedia



“Sí” —→ $S \sim 20$; $I \sim 09$ —→ 2009 —→ 0,2009 m

Información es una entidad física, con energía, volumen, ...
—→ problema del extraterrestre y la Wikipedia



“Sí” —→ $S \sim 20$; $I \sim 09$ —→ 2009 —→ $0,2009 \text{ m}$

En seguida te topas con el carácter cuántico de la Naturaleza:

“Wikipedia” (9 letras): $\Delta x \sim 10^{-18} \text{ m} \sim 10^{-3} \cdot R_p$

Información es una entidad física, con energía, volumen, ...

—→ problema del extraterrestre y la Wikipedia



“Sí” —→ $S \sim 20$; $I \sim 09$ —→ 2009 —→ $0,2009 \text{ m}$

En seguida te topas con el carácter cuántico de la Naturaleza:

“Wikipedia” (9 letras): $\Delta x \sim 10^{-18} \text{ m} \sim 10^{-3} \cdot R_p$

“Esternocleidomastoideo” (22 letras): $\Delta x \sim 10^{-44} \text{ m} \sim 10^{-9} \cdot L_P$

Información es una entidad física, con energía, volumen, ...
—→ problema del extraterrestre y la Wikipedia



“Sí” —→ $S \sim 20$; $I \sim 09$ —→ 2009 —→ $0,2009 m$

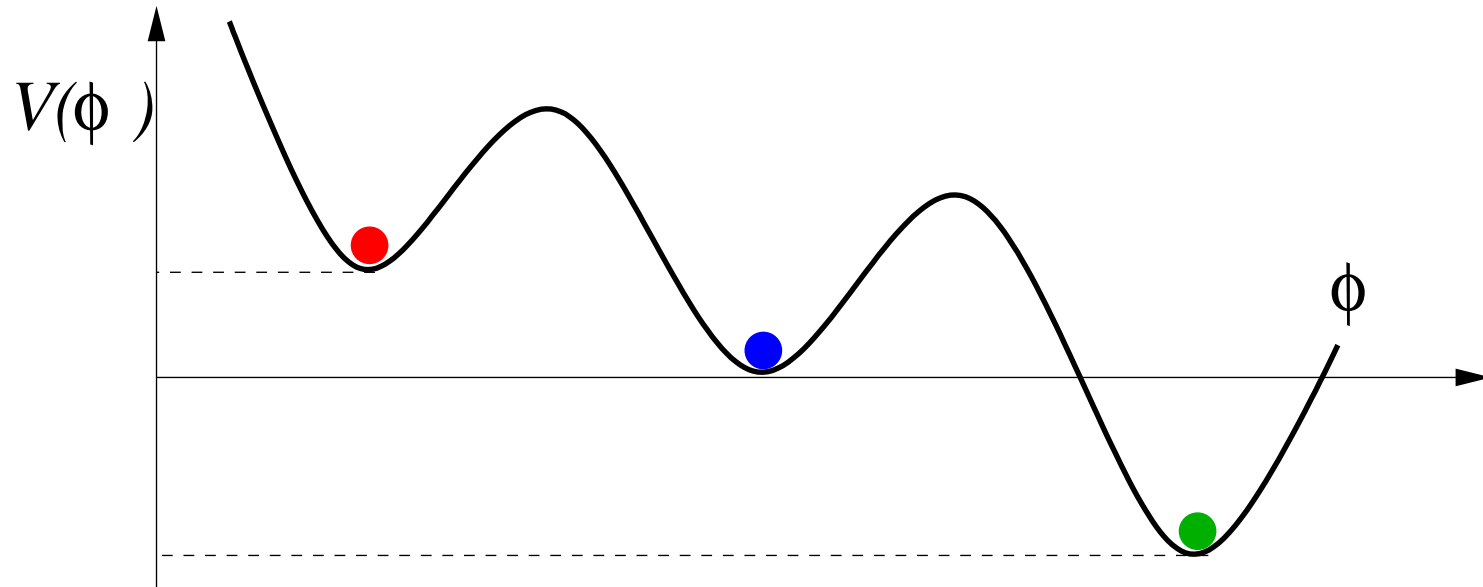
En seguida te topas con el carácter cuántico de la Naturaleza:

“Wikipedia” (9 letras): $\Delta x \sim 10^{-18} m \sim 10^{-3} \cdot R_p$

“Esternocleidomastoideo” (22 letras): $\Delta x \sim 10^{-44} m \sim 10^{-9} \cdot L_P$

“En un lugar de La Mancha, de cuyo nombre no quiero acordarme”

En relatividad general: cualquier tipo de energía contribuye a $T_{\mu\nu}$
incluso energía potencial...

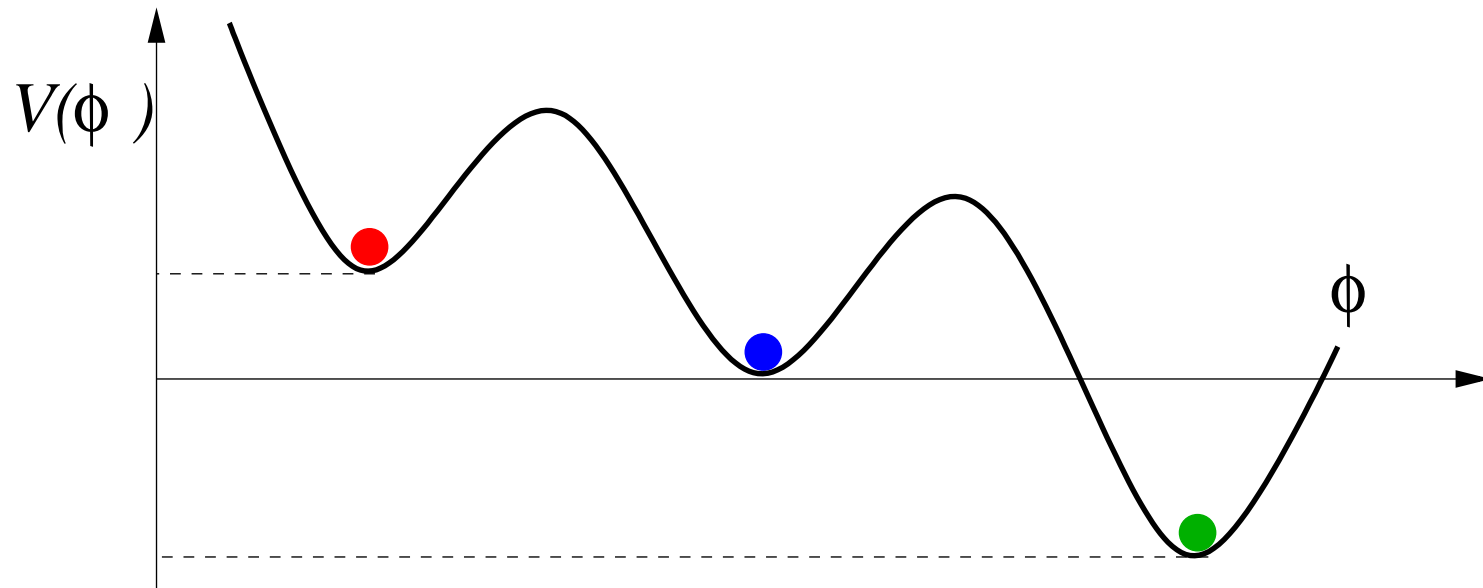


Ejemplo: Gravedad & escalar mínimamente acoplado

$$S = \int d^4x \sqrt{|g|} \left[\frac{1}{2\kappa} R + \frac{1}{2} (\partial\phi)^2 - V(\phi) \right]$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\kappa \left[\partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} (\partial\phi)^2 + g_{\mu\nu} V(\phi) \right], \quad \nabla^2 \phi = -V'(\phi)$$

En relatividad general: cualquier tipo de energía contribuye a $T_{\mu\nu}$
incluso energía potencial...



Ejemplo: Gravedad & escalar mínimamente acoplado

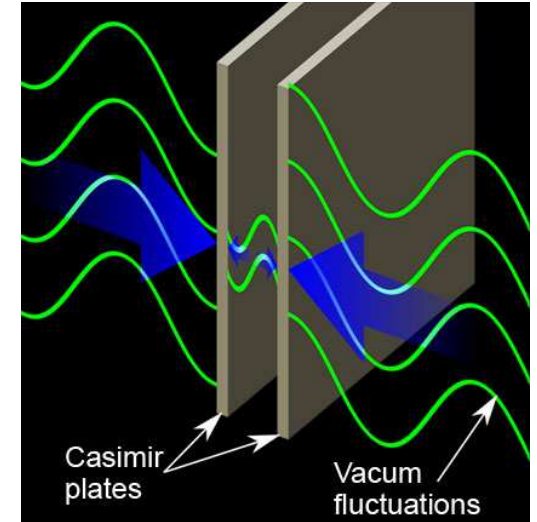
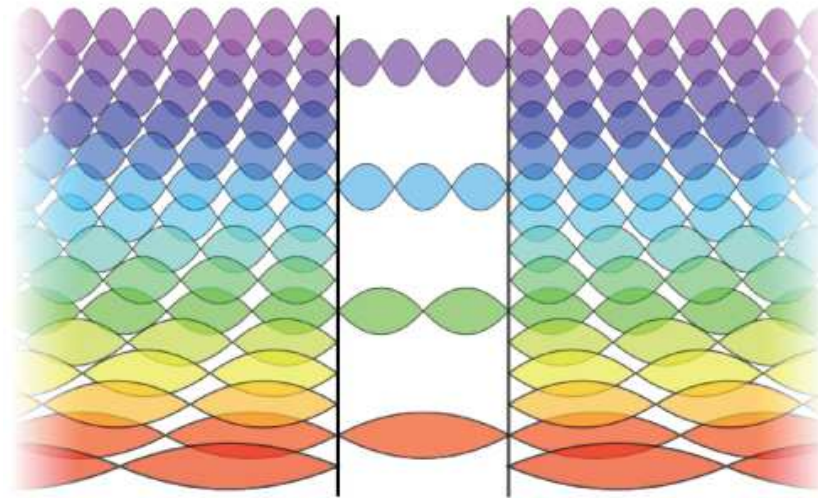
$$S = \int d^4x \sqrt{|g|} \left[\frac{1}{2\kappa} R + \frac{1}{2} (\partial\phi)^2 - V(\phi) \right]$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\kappa \left[\partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} (\partial\phi)^2 + g_{\mu\nu} V(\phi) \right], \quad \nabla^2 \phi = -V'(\phi)$$

Solución particular: escalar congelado comporta como constante cosmológica

$$\partial_\mu \phi = 0, \quad V(\phi_0) = V_0 \quad \implies \quad R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\kappa g_{\mu\nu} V_0$$

El efecto Casimir (1947): Fuerza atractiva entre espejos paralelos, debido a energía del vacío



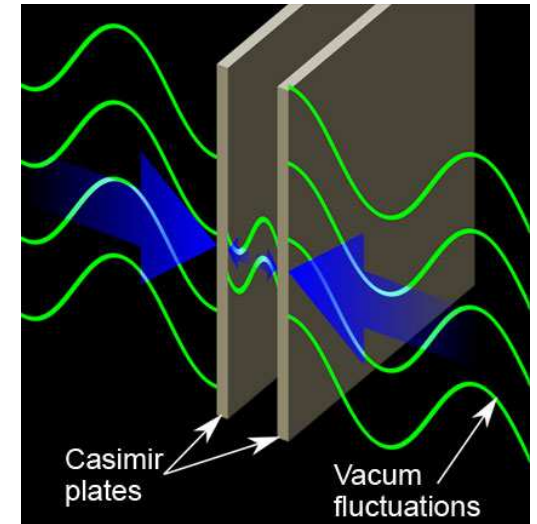
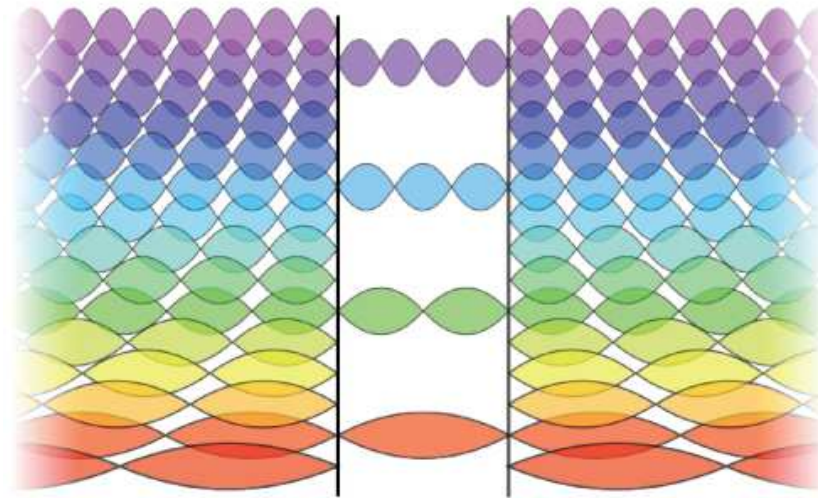
—> Hay menos modos cuánticos entre las placas que fuera de las placas

—> Presión del vacío neta hacía dentro: **Fuerza de Casimir**

$$d = 1 \mu m, \quad A = 1 cm^2 \quad \Rightarrow \quad F \sim 10^{-7} N$$

$$d = 1 nm, \quad A = 1 cm^2 \quad \Rightarrow \quad P \sim 1 atm$$

El efecto Casimir (1947): Fuerza atractiva entre espejos paralelos, debido a energía del vacío



→ Hay menos modos cuánticos entre las placas que fuera de las placas

→ Presión del vacío neta hacía dentro: **Fuerza de Casimir**

$$d = 1 \mu m, \quad A = 1 cm^2 \quad \Rightarrow \quad F \sim 10^{-7} N$$

$$d = 1 nm, \quad A = 1 cm^2 \quad \Rightarrow \quad P \sim 1 atm$$

Lamoreaux (1997): **Comprobación experimental** con error relativo de 15 %

→ verificación experimental extremadamente complicada

Extraordinaria acuerdo entre datos independientes: Λ CDM

$$\Omega_{\text{bar}} \approx 0,048 \quad \Omega_{\text{DM}} \approx 0,264, \quad \Omega_{\Lambda} \approx 0,685$$

